

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

PART II

MÈTODES DE SÍSMICA ACTIVA:

CARACTERITZACIÓ ESTRUCTURAL

Capítol 7

7.- PERFILS DE GRAN ANGLE MARCONI. DESCRIPCIÓ DE L'EXPERIMENT I DEL PROCESSAT

Un dels objectius essencials del projecte MARCONI va ser l'adquisició de noves dades geofísiques i geològiques a la part centro-oriental del marge Cantàbric. Aquest procés d'adquisició es va portar a terme en dues campanyes oceanogràfiques, que corresponen a dos nivells diferents i complementaris d'estudi: un experiment a escala litosfèrica i un altre d'alta resolució superficial. La campanya d'adquisició de dades geofísiques profundes es va portar a terme entre els dies 30 d'agost i 20 de setembre del 2003, a bord del vaixell d'investigacions oceanogràfiques Hespérides (Figura 7.1), on simultàniament a l'adquisició de perfils de sísmica de reflexió multicanal, es va abordar el registre de les reflexions/refraccions de gran angle mitjançant estacions de terra i de fons marí (OBS/OBH), i també es registraren de forma continua dades gravimètriques, magnètiques i de batimetria multifeix al llarg de tots els perfils.

En aquest capítol ens centrarem en l'anàlisi de les dades de gran angle adquirides en aquest experiment, fent una breu descripció del material emprat en l'adquisició i de les tècniques desenvolupades en el processat de les dades obtingudes, per continuar, en el següent capítol, amb l'anàlisi i interpretació de varis perfils.

7.1.- Descripció i objectius de l'experiment

Els experiments portats a terme a finals de l'estiu del 2003, durant la primera campanya oceanogràfica del projecte MARCONI, es varen dissenyar amb l'objectiu d'obtenir dades geofísiques a escala cortical que permetessin assolir els següents objectius:

- Determinar l'estructura cortical de les conques sedimentàries del marge continental i els canvis d'estil d'edificació des del Mesozoic fins a l'actualitat, definint els sistemes sedimentaris i determinant la distribució i espessor d'aquests sistemes.

- Caracteritzar l'estructura cortical del marge cantàbric entre els perfils de sísmica de reflexió multicanal ESCIN-4 i ECORS- Golf de Biscaia.
- Determinar el model de distribució vertical de velocitats i les seves variacions laterals.
- Delimitació de la subducció cap al nord de l'escorça Ibèrica en les àrees compreses entre el Pirineu i la Serralada Cantàbrica.
- Investigació de la importància i extensió lateral del prisma acrecional que se situa al peu del talús continental i la seva correlació amb la zona Nord-Pirinenca.
- Establiment d'un model 3D de densitats de l'escorça a el fi de contrastar la interpretació de les dades sísmiques.



Figura 7. 1. Vista aèria del BIO Hespérides navegant, durant el procés desplegament dels OBS de la campanya MARCONI 2003, cap al següent punt de la xarxa. Visió parcial de la popa del vaixell, on s'aprecia la bobina del *streamer* emprat per a la sísmica de reflexió vertical, el contenidor dels compressors per alimentar els canons d'aire comprimit i el dispositiu mecànic emprat per arriar els canons pel mirall de popa del vaixell.

Per a la realització de l'experiment de sísmica s'empraren el "streamer" de 2400 m i els canons d'aire comprimit d'una capacitat total de 2690 in³ disponibles al BIO Hespérides i a la Unitat Tecnològica Marina (UTM) del CSIC (Figura 7.1). A més a més, es va comptar amb la col·laboració i l'instrumental (OBS) de la Unitat d'Investigació Geodinàmica de l'Institut de Ciències Marines IFM-GEOMAR (Universitat de Kiel, Alemanya), els quals aportaren, via contracte amb el "pool" europeu d'OBS que gestiona aquest centre, la major part d'estacions sísmiques marines emprades en l'experiment. A terra, a més a més de les estacions disponibles en els grups del projecte, es va disposar d'estacions addicionals de l'Institut de Physique du Globe de París que varen ser essencials per a assolir totes les fites de la

campanya.

L'objectiu principal d'aquest treball ha estat l'obtenció dels models de distribució vertical de velocitats a llarg dels perfils, mitjançant l'anàlisi de les dades de gran angle obtingudes per les estacions de terra i de fons marí (Figura 7.2).

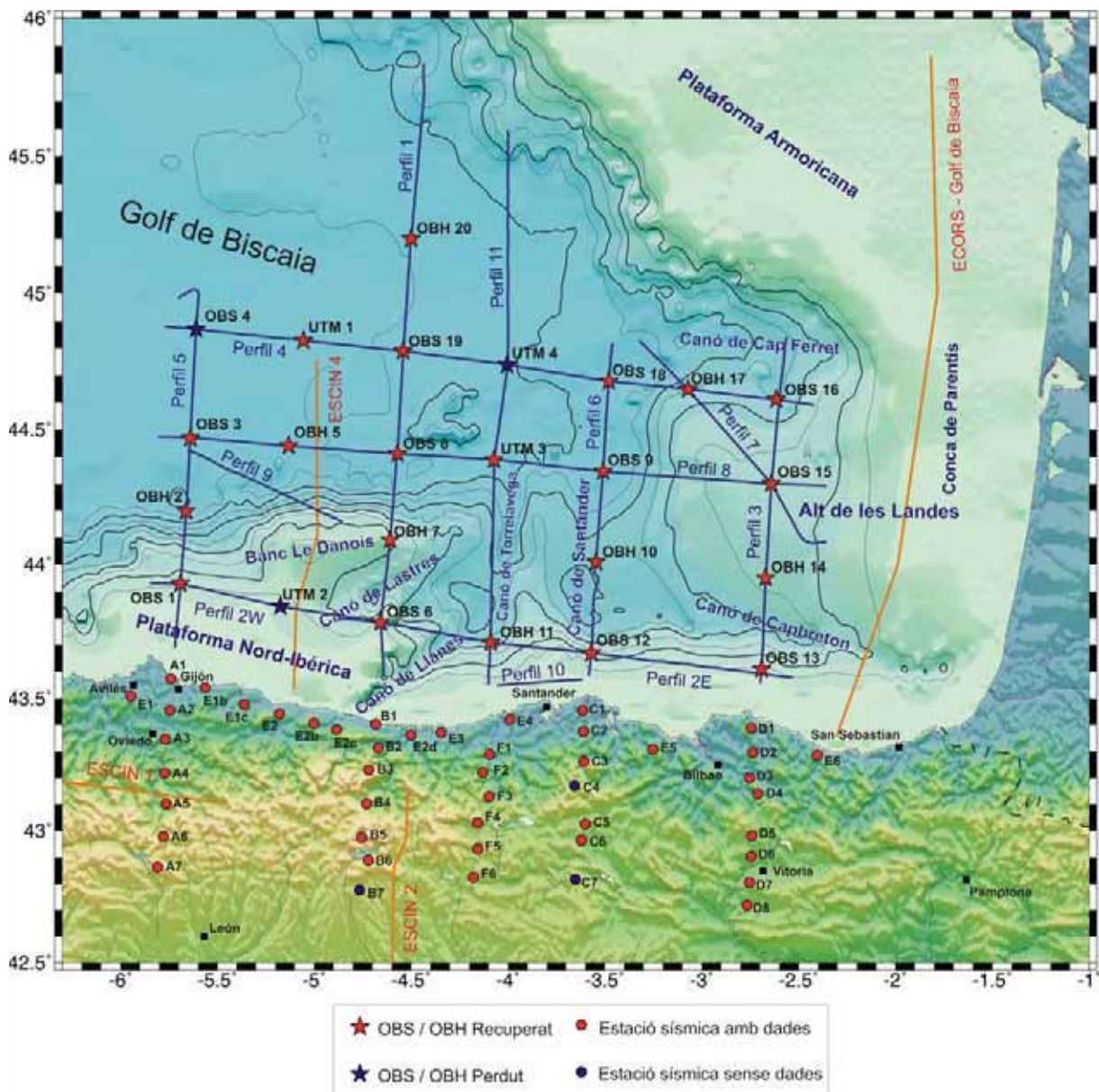


Figura 7. 2.- Mapa de situació dels instruments de registre sísmic fondejats en aigües del Cantàbric (estrelles) i posicions de les estacions sísmiques terrestres (cercles) durant la campanya MARCONI 2003. Els punts assenyalats en blau indiquen instruments perduts o que no van enregistrar cap dada.

Les dades de sísmica vertical són objecte d'altres treballs de doctorat i post-doctorat al

si dels altres grups participants en el projecte. Durant la modelització dels perfils de gran angle, els resultats dels perfils de sísmica multicanal s'han emprat com a eina de control de les capes més superficials (sediments) dels models de velocitat.

Els resultats obtinguts ajudaran a caracteritzar l'estructura cortical del marge Cantàbric, delimitar la geometria de la subducció de l'escorça Ibèrica i caracteritzar les propietats de les conques sedimentàries.

7.2.- Adquisició dels perfils de sísmica vertical i reflexió/refracció de gran angle

En la primera fase d'aquest experiment es varen adquirir un total d'aproximadament 2000 km de dades de sísmica de reflexió vertical profunda, gravimètriques i magnètiques al llarg de 11 perfils, de longitud variable, en el sector oriental del Golf de Biscaia, on la fondària del fons marí oscil·la entre 100 i els casi 5000 m. Tres dels perfils, amb una longitud aproximada de 270 km, es varen enregistrar en la direcció E-O entre les longituds 2° O i 6° O. Aquests perfils eren interseccionats per cinc perfils N-S d'entre 140 i 250 km de longitud, que anaven des de la costa Cantàbrica fins, en el cas del perfil més llarg, a aproximadament la latitud 46° N. A més a més, es varen realitzar tres línies de menor longitud, dues d'elles en la direcció NO-SE, i una tercera en la direcció E-O sobre la plataforma de Santander (Figura 7.2 i Taula 7.1).

Els perfils 1, 5 i 11 tallen transversalment el talús continental Cantàbric, amb el perfil 5 arribant fins a la part central del Golf de Biscaia i els perfils 1 i 11 travessant-lo totalment fins assolir el talús continental del marge Armoricà. El perfil 6 talla el marge Cantàbric en la zona dels grans canons submarins N-S, mentre que el perfil 3 travessa tot l'Alt de les Landes, entre els canons E-O de Capbreton i Cap Ferret. Els perfils 4 i 8 recorren des del fons abissal del Golf de Biscaia fins l'Alt de les Landes, mentre que el perfil 2 segueix el límit entre la plataforma i el talús continental Nord-Ibèric. El perfil 7 recorre travessant transversalment l'Alt de les Landes i el 9 mostreja bona part del talús continental Cantàbric (Figura 7.2). Tota aquesta retícula de línies sísmiques ha permès completar la informació prèvia existent a la zona, perfils ESCIN-4, ECORS-Golf de Biscaia i d'altres d'exploració petrolífera, i permetrà disposar d'una imatge sísmica completa de la terminació oriental del Golf de Biscaia.

Taula 7. 1.- Dades generals dels perfils de sísmica multicanal i gran angle enregistrats durant la campanya MARCONI 2003. El percentatge entre parèntesis que acompanya a les dades dels canons indica la longitud del perfil realitzada amb aquella configuració. La pressió de dispar va ser sempre de 140 bars.

	Coordenades		Fondària	Longitud	Sentit de registre	Configuració dels Canons
	Inici	Final	Inici / Final			
Perfil 1	45.84132° N	43.58298° N	3768.4 m	251 km	N-S	2690 in ³ (79%)
	-4.43937° E	-4.64210° E	177.0 m			1690 in ³ (21%)
Perfil 2E	43.78505° N	43.57697° N	583.1 m	196 km	O-E	1435 in ³ (100%)
	-4.93723° E	-2.52695° E	653.1 m			
Perfil 2W	43.93163° N	43.66590° N	983.9 m	188 km	O-E	2435 in ³ (8%)
	-5.85305° E	-3.54220° E	1614.7 m			1435 in ³ (92%)
Perfil 3	43.55407° N	44.84237° N	225.2 m	143 km	S-N	2435 in ³ (100%)
	-2.69942° E	-2.56115° E	2848.9 m			
Perfil 4	44.59040° N	44.88080° N	1778.9 m	267 km	E-O	2435 in ³ (47%)
	-2.41527° E	-5.76957° E	4842.0 m			1435 in ³ (53%)
Perfil 5	45.01232° N	43.68830° N	4842.0 m	147 km	N-S	2435 in ³ (78%)
	-5.60845° E	-5.71852° E	108.2 m			1435 in ³ (22%)
Perfil 6	44.82593° N	43.58168° N	3588.6 m	138 km	N-S	1935 in ³ (100%)
	-3.46358° E	-3.58425° E	343.5 m			
Perfil 7	44.07897° N	44.83015° N	983.5 m	109 km	SE-NO	1935 in ³ (100%)
	-2.43388° E	-3.32518° E	3797.3 m			
Perfil 8	44.47562° N	44.29110° N	4792.9 m	276 km	O-E	1935 in ³ (100%)
	-5.813220 E	-2.35367° E	1171.9 m			
Perfil 9	44.15575° N	44.42598° N	2023.8 m	71 km	SE-NO	1935 in ³ (100%)
	-4.84905° E	-5.65458° E	4754.0 m			
Perfil 10	43.57185° N	43.54697° N	125.9 m	36 km	E-O	1935 in ³ (100%)
	-3.60908° E	-4.06028° E	132.0 m			
Perfil 11	43.54800° N	45.59963° N	136.3 m	228 km	S-N	1935 in ³ (35%)
	-4.10172° E	-4.00040° E	2358.6 m			1435 in ³ (65%)

La primera fase d'adquisició es va portar a terme en 22 dies. Es va salpar del port de Musel de Gijón el dia 30 d'agost, i un cop desplegats tots els sismòmetres de profunditat, streamer i els canons d'aire comprimit, es va iniciar el registre dels perfils sísmics, el qual es va estendre des del dia 2 al 13 de setembre. Finalment es va procedir a la recuperació de tots els equips sísmics, tocant port a primera hora del matí del dia 20 de setembre.

La font emprada per a la generació de les ones sísmiques va consistir en una sèrie de canons d'aire comprimit de tipus *Bolt*, carregats a una pressió de 140 bars, i arrossegats a 48 m de distància de la popa del vaixell i a 9 m de fondària (Figura 7.3). La potència del conjunt de canons va variar al llarg de l'experiment entre un mínim de 1435 in³ i un màxim de 2690 in³, degut a diversos problemes tècnics que van afectar a alguns dels canons. Així doncs, la major part del perfil 1 es va registrar a una potència de 2690 in³, les línies 3, 4 i 5

s'enregistraren a 2435 in³, encara que la 4 i 5 es van finalitzar a 1435 in³, els perfils 6, 7, 8, 9 i 10 es varen disparar sense problemes a 1935 in³, i per últim les línies 2W, 2E i 11 es varen realitzar en la seva major extensió a 1435 in³ (Taula 7.1). Els successius disbars es varen realitzar amb un espaiat temporal constant de 40 s, els quals navegant a una velocitat de 5 nusos equivalien a una distància mitja entre tir i tir de 100 m aproximadament. Aquest espaiat era un compromís entre les necessitats de la sísmica multicanal i la de gran angle.



Figura 7. 3.- Conjunt de canons d'aire comprimit emprats com a font sísmica i dispositiu mecànic destinat a facilitar al seu arriat i hissat a bord. Es mostra un detall de l'enfilall de canons penjant del flotador i una vista de la bombolla d'aire generada, a 9 m de fondària sota el flotador, pels canons en ple funcionament.

Aquest tipus d'experiments geofísics corticals, on s'enregistren de forma simultània les reflexions sísmiques verticals a bord del vaixell mitjançant una sèrie d'hidròfons o *streamer*, i alhora s'enregistren les ones que han patit una reflexió de gran angle o refraccions en el subsòl, és una pràctica que permet obtenir imatges sísmiques de gran angle que es completen amb les de reflexió profunda (Ex: Flueh et al., 1998; Korenaga et al., 2000; Pérez-Gussinyé et al., 2003; Thinon et al., 2003). Actualment però, per a treure el màxim profit de la tecnologia marina, aquests experiments se solen realitzar per separat, enregistrant primer els perfils de gran angle i després les línies multicanal, o viceversa, ajustant la configuració i freqüència de dispar que fa òptima la resolució de cada una de les metodologies. A la campanya MARCONI es va realitzar tot alhora, a fi de poder realitzar el màxim nombre de perfils sísmics amb el temps disponible de vaixell. Amb l'objectiu d'enregistrar l'arribada de les ones sísmiques que han viatjat a gran distància de la font d'emissió, es varen disposar sismòmetres de profunditat a les interseccions de les diferents línies sísmiques, i aprofitant que aquest experiment es va realitzar prop la costa, part dels sensors es varen poder

col·locar en terra com una prolongació cap al sud dels cinc perfils N-S. A més a més, es varen desplegar algunes estacions en la direcció E-O seguint la línia de costa (Figura 7.2).

La campanya MARCONI 2003 va constituir una fita en aquesta regió ja que es va ser el primer cop que el BIO Hespérides participava en un experiment en el mar Cantàbric, on, a més a més, s'hi desplegaren per primera vegada sismòmetres de profunditat.

7.2.1.- Descripció de les estacions sísmiques marines

Per enregistrar les refraccions i reflexions de gran angle a la part marina dels perfils, es varen emprar un total de 24 instruments de registre sísmic, 16 dels quals eren sismòmetres de fons marí (OBS – *Ocean-Bottom Seismometer*) i 8 eren hidròfons de profunditat (OBH – *Ocean-Bottom Hydrophone*) (Taula 7.2). Quatre dels OBS han estat desenvolupats per *Bullard Laboratoires* de la Universitat de Cambridge i són gestionats per la Unitat Tecnològica Marina (UTM) del CSIC (Figura 7.4), la resta d'instruments han estat desenvolupats i gestionats per la Unitat d'Investigació en Geodinàmica de l'Institut de Ciències Marines IFM-GEOMAR (Universitat de Kiel, Alemanya) (Flueh i Bialas, 1996; Bialas i Flueh, 1999) (Figura 7.5).

Els diferents tipus d'instruments, OBS o OBH, només es diferencien, en teoria, en el tipus de sensor emprat per a registrar les ones sísmiques, un geòfon de tres components que enregistra els moviments del fons marí o un hidròfon que enregistra les variacions de pressió de l'aigua, respectivament. A la pràctica, tots els OBS enregistraven, a part dels tres canals del geòfon, un quart canal amb el senyal d'un hidròfon. La resta de l'equip que integra l'estació sísmica marina, salvant les diferències de disseny, són molt similars entre ells: un ordinador que s'encarrega de gravar les dades sobre les unitats d'emmagatzament, un sistema de temps precís per evitar les derives temporals dels registres i un sistema d'alimentació format per bateries, tot això encabit dins d'esferes de vidre o cilindres de titani capaços de suportar les pressions que es troben a més de 6000 m de fondària (Figura 7.6). A més a més, és indispensable un llast que permeti que l'instrument s'enfonsi fins al fons marí, i boies o elements que donin flotabilitat al conjunt i permetin recuperar l'aparell un cop alliberat el pes que el mantenia al fons (Figura 7.5). En el cas dels aparells de la UTM la pròpia esfera de vidre on va allotjada tota l'electrònica té una flotabilitat positiva i són per tant innecessaris elements extres per garantir l'ascens de l'aparell. L'electrònica dels instruments de GEOMAR va encabida dins de cilindres de titani, per tant en aquest cas sí que són indispensables elements de flotació, els quals estan compostos d'espuma sintètica capaç de suportar la pressió del fons sense malmetre's (Figura 7.6).

Taula 7. 2.- Descripció i localització de les estacions de fons marí desplegades durant la campanya MARCONI 2003 al Golf de Biscaia.

Nom	Tipus Instrument	Latitud (° N)	Longitud (° E)	Fondària (m)	Comentaris
OBS01	Sismòmetre GEOMAR	43.92964	-5.69057	414.5	
OBH02	Hidròfon GEOMAR	44.19723	-5.66189	4700.8	
OBS03	Sismòmetre GEOMAR	44.46713	-5.63682	4752.7	
OBS04	Sismòmetre GEOMAR	44.87018	-5.60995	4804.0	Perdut
OBH05	Hidròfon GEOMAR	44.44095	-5.12786	4635.0	
OBS06	Sismòmetre GEOMAR	43.78555	-4.65763	1301.4	
OBH07	Hidròfon GEOMAR	44.09024	-4.60828	605.0	
OBS08	Sismòmetre GEOMAR	44.40891	-4.57129	4490.0	
OBS09	Sismòmetre GEOMAR	44.34497	-3.50946	3718.0	No P6
OBH10	Hidròfon GEOMAR	44.00980	-3.54554	3696.0	
OBH11	Hidròfon GEOMAR	43.70931	-4.09176	2717.5	
OBS12	Sismòmetre GEOMAR	43.67007	-3.56937	1617.8	Només P2E
OBS13	Sismòmetre GEOMAR	43.59275	-2.69024	476.8	
OBH14	Hidròfon GEOMAR	43.95098	-2.66979	1242.8	
OBS15	Sismòmetre GEOMAR	44.30050	-2.64165	1190.4	
OBS16	Sismòmetre GEOMAR	44.61161	-2.59859	2542.4	
OBH17	Hidròfon GEOMAR	44.64819	-3.06839	2859.8	
OBS18	Sismòmetre GEOMAR	44.67842	-3.47854	3900.6	No P6
OBS19	Sismòmetre GEOMAR	44.79040	-4.54116	4447.6	
OBH20	Hidròfon GEOMAR	45.19875	-4.49913	4510.8	
UTM01	Sismòmetre UTM	44.82889	-5.05550	4666.0	
UTM02	Sismòmetre UTM	43.84499	-5.17544	671.0	Perdut
UTM03	Sismòmetre UTM	44.38805	-4.07220	4315.0	
UTM04	Sismòmetre UTM	44.73863	-4.00380	4107.0	Recup. 12/05



Figura 7. 4.- Sismòmetres profunds (OBS) gestionats per la UTM del CSIC. Equip tècnic de la UTM preparant-se per a fondejar un dels seus instruments.

El desplegament i recollida d'aquests instruments és un procés complex, ja que els aparells són autònoms i han de deixar-se caure lliurement en el punt on es vol fer la mesura. Un cop finalitzat l'experiment, cal enviar-li un senyal que el faci alliberar-se del llast que el

mantenia fondejat i torni a la superfície per poder recuperar l'instrument i les dades emmagatzemades al seu interior. Per aquest motiu, un dels punts de major importància en el disseny d'aquests aparells, a part de la cuirassa que protegeix els dispositius electrònics de l'alta pressió del medi on han d'operar, és el sistema d'alliberació. Normalment, aquest sistema està basat en dispositius electrolítics o electromecànics que s'accionen quan l'aparell rep una ordre acústica des de la superfície (Figura 7.6). Per seguretat, tots els aparells disposen d'un sistema d'alliberació automàtica, programat per obrir-se un dia i una hora concreta posterior a l'experiment per que, donat el cas de que aquest no revés el senyal d'alliberament, l'aparell torni a la superfície de forma automàtica i sigui possible la seva recuperació.



Figura 7. 5.- Diferents tipus d'instruments aportats i gestionats per GEOMAR. La fotografia de l'esquerra mostra un hidròfon de profunditat (OBH) preparat per a ser fondejat, i les dues fotografies restants mostren els dos tipus de sismòmetres de fondària (OBS) emprats en aquest experiment.

Tots els geòfons emprats en aquest experiment anaven col·locats penjant d'extremitats que permeten allunyar el sensor del cos principal de l'aparell, i evitar així interferències tant electromagnètiques, produïdes per l'electrònica de l'instrument, com de vibracions mecàniques degudes a moviments del cos de l'aparell (Figures 7.4 i 7.5). El geòfon va unit a aquesta prolongació lateral mitjançant un alliberador electrolític que es desfà mitjançant el corrent d'una pila i el medi salí de l'aigua de mar en un període d'entre 1h i 1.5h, permetent que l'aparell toqui fons i s'assenti en les sediments abans de que s'alliberi el sensor. Això fa possible que el cable del geòfon no quedi atrapat pel pes de l'àncora i no impedeixi el seu posterior ascens cap a la superfície.

L'OBS/OBH sol viatjar a una velocitat d'entre 1.0 i 1.2 m/s en el seu procés d'ascens i un cop l'aparell ha pujat a la superfície és del tot necessari localitzar-lo de forma ràpida, per

evitar la seva pèrdua per les derives produïdes pels corrents marins. Per aquest motiu tots els instruments van equipats amb una bandera de color ben viu, un reflector de radar, un emissor de radio direccional i un flaix per a que pugui ser localitzat fàcilment tant de dia com de nit quan està surant en superfície (Figures 7.4 i 7.5).

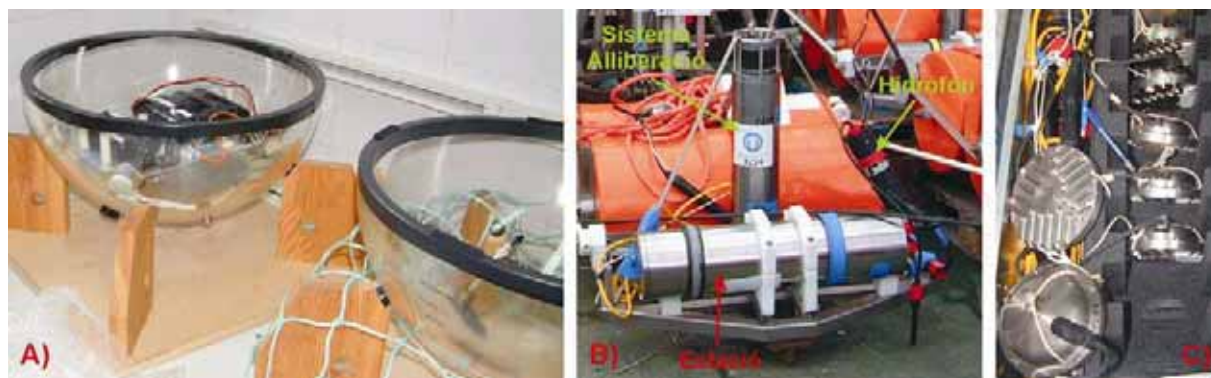


Figura 7. 6- A) Semiesferes de vidre d'un OBS de la UTM amb les bateries i una part de l'electrònica instal·lada. B) Primer pla d'un OBS de GEOMAR on es mostren els cilindres de titani que contenen l'estació sísmica i el sistema d'alliberament. Es mostra també la posició de l'Hidrófon. C) Geòfons de tres components emprats en els OBS de GEOMAR.

Els OBS de GEOMAR poden operar amb una gran varietat de geòfons de període curt (4.5, 15 i 30 Hz) i sensors de banda ampla, segons les necessitats de l'experiment. En aquest cas s'empraren geòfons de 3 components de 15 Hz (Figura 7.6) i s'emmagatzemaven les dades amb una freqüència de mostreig de 250 mps, mentre que els OBH van funcionar a 200 mps.

L'experiment MARCONI, concebut com una aproximació a l'estructura cortical a nivell regional, es va dissenyar amb un únic desplegament dels OBS, a l'inici, i la seva recollida al final. D'aquesta manera es va poder enregistrar un nombre elevat de perfils, encara que amb una densitat pobre d'OBS a cadascú d'ells, ja que l'espaiat mig entre els instruments marins va ser d'uns 30-40 km. Les diferents orientacions dels perfils permeten obtenir una aproximació més fiable de la complexa estructura tridimensional del Golf de Biscaia. Els perfils N-S, perpendiculars a les estructures Alpines, constitueixen a priori les millors seccions per estudiar la deformació associada a aquesta etapa. No obstant, la sísmica de refracció resulta poc efectiva per a caracteritzar estructures amb inclinacions molt fortes, especialment si no porten associada una juxtaposició de materials amb un fort contrast de velocitats. Això fa que sigui especialment interessant combinar els perfils transversals amb els longitudinals (E-O), en els quals la variació estructural és molt més gradual i més idònia per a les característiques de la sísmica de refracció. A més a més, els punts de tall entre els diferents perfils permeten un control addicional de l'estructura (Pedreira, 2004).

Dels 24 instruments desplegat en aquest experiment, només 3 OBS no es van poder recuperar correctament (OBS04, UTM04 i UTM02) (Figura 7.2 i Taula 7.2). La resta van enregistrar tots els perfils excepte 3 instruments que van presentar problemes puntuals durant la realització d'alguna de les línies sísmiques: l'OBS12 només va enregistrar el perfil 2E, i els instruments OBS09 i OBS18 van deixar de funcionar abans de l'inici del perfil 6, però van enregistrar correctament els altres (Taula 7.2). La resta d'incidències van ser menors: a l'OBS19 no li va funcionar l'hidròfon durant el perfil 4 però va enregistrar correctament els canals del geòfon. Als instruments OBS01 i OBS09 els va fallar el geòfon, però va funcionar el canal de l'hidròfon, i a l'OBS03 no li va funcionar l'hidròfon, però sí el geòfon. L'OBS UTM04, que s'havia donat per perdut durant la campanya, va ser recuperat el desembre del 2005, més de 2 anys després de finalitzar l'experiment, però malauradament només contenia dades del perfil 1. Els altres dos instruments continuen a hores d'ara desapareguts.

7.2.2.- Descripció de les estacions sísmiques terrestres

Pel registre de les refraccions i reflexions de gran angle a terra es va disposar d'un total de 35 estacions sísmiques digitals, que es van ubicar sobre 46 emplaçaments (Figura 7.2 i Taula 7.3).

En la realització de la part terrestre de l'experiment es van emprar tres tipus d'instruments de registre sísmic procedents de diferents institucions: 4 estacions Lennartz Mars Lite de la Universitat d'Oviedo, 7 estacions Reftek i 8 Hathor de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera', CSIC, i 16 estacions Hathor de l'Institut de Physique du Globe de Paris (Figura 7.7 i Taula 7.3).

Les estacions es van equipar amb geòfons de curt període (2 Hz i 1 s) i de banda ampla (20s) (Taula 7.3). Tots els equips van funcionar en registre continu amb una freqüència de mostreig de 100 mps. La majoria d'estacions estaven equipades amb sistemes GPS per a obtenir constantment el temps UTC, evitant la deriva de les dades, i les posicions geogràfiques dels emplaçaments. El sistema de recepció de temps via radio DCF-77 va ser emprat també per les quatre estacions Mars Lite, encara que en el moment de la seva instal·lació i recollida es va emprar una antena GPS per a sincronitzar-les i obtenir la posició del punt de mesura. Els instruments es van alimentar amb bateries, la majoria dels casos retroalimentades per energia solar mitjançant panells solars.

Taula 7. 3.– Localització dels emplaçaments i descripció de les estacions de terra emprades per a registrar les reflexions/refraccions de gran angle durant la campanya MARCONI 2003.

Nom	Tipus Instrument	Geófon	Latitud (°N)	Longitud (°E)	Alçada (m)	Comentaris
A1	Hathor	2 Hz	43.57409	-5.73917	147	
A2	Hathor	2 Hz	43.45588	-5.74447	219	
A3	Hathor	2 Hz	43.34654	-5.76818	502	
A4	Hathor	2 Hz	43.21899	-5.77133	650	
A5	Hathor	2 Hz	43.10269	-5.76360	650	
A6	Hathor	2 Hz	42.97839	-5.77945	1583	
A7	Hathor	2 Hz	42.86358	-5.80818	1580	
B1	Hathor	2 Hz	43.40215	-4.68334	92	
B2	Hathor	2 Hz	43.31300	-4.66821	227	
B3	Hathor	2 Hz	43.22957	-4.71825	1472	
B4	Hathor	1 s	43.10299	-4.72976	898	
B5	Hathor	2 Hz	42.97464	-4.75572	1501	
B6	Hathor	2 Hz	42.88901	-4.72120	1377	
B7	Hathor	2 Hz	42.77639	-4.76504	1226	No té dades
C1	Mars Lite	1 s	43.45443	-3.61482	45	
C2	Hathor	2 Hz	43.37471	-3.60929	307	
C3	Hathor	20 s	43.26280	-3.60997	386	
C4	Hathor	2 Hz	43.17067	-3.65584	1363	No té dades
C5	Hathor	1 s	43.02563	-3.60092	704	
C6	Hathor	1 s	42.96433	-3.62216	761	
C7	Hathor	2 Hz	42.81719	-3.65247	1006	No té dades
D1	Mars Lite	20 s	43.38912	-2.74430	200	
D2	Reftek	20 s	43.29568	-2.73558	228	
D3	Reftek	20 s	43.19990	-2.75413	315	
D4	Reftek	20 s	43.14050	-2.71067	423	
D5	Reftek	20 s	42.98030	-2.74168	633	
D6	Reftek	20 s	42.90492	-2.74450	564	
D7	Reftek	20 s	42.80568	-2.75258	657	
D8	Reftek	20 s	42.71955	-2.76537	639	
F1	Reftek	20 s	43.28935	-4.09375	300	
F2	Hathor	2 Hz	43.22016	-4.13093	326	P11 parcial
F3	Reftek	20 s	43.12928	-4.09857	585	
F4	Hathor	2 Hz	43.03064	-4.15599	1089	
F5	Reftek	20 s	42.93308	-4.15568	1065	
F6	Reftek	20 s	42.82440	-4.17946	1017	
E1	Hathor	2 Hz	43.50803	-5.94566	235	
E1b	Hathor	2 Hz	43.53950	-5.56334	179	
E1c	Hathor	2 Hz	43.47671	-5.36091	256	
E2	Hathor	2 Hz	43.44202	-5.18072	466	
E2b	Hathor	2 Hz	43.40556	-5.00202	638	
E2c	Hathor	2 Hz	43.38239	-4.82783	601	
E2d	Hathor	2 Hz	43.37300	-4.52131	615	
E3	Hathor	1 s	43.37136	-4.34385	82	
E4	Hathor	2 Hz	43.42073	-3.99025	136	
E5	Mars Lite	1 s	43.30783	-3.25243	201	
E6	Mars Lite	1 s	43.28607	-2.40488	222	

Al marge de la qualitat de les dades enregistrades per les estacions, que en alguns casos es van veure condicionades per la disminució de potència dels dispars i per la qualitat d'alguns emplaçaments, el 91 % van funcionar correctament. Només van existir alguns problemes d'adquisició en quatre instruments: Les estacions B7, C4 i C7 no van registrar res, i l'estació F2 va deixar de funcionar a mig registre del perfil 11 (Taula 7.3).



Figura 7. 7.- Laboratori de la Universitat d'Oviedo amb part de les estacions sísmiques Reftek, MarsLite i Hathor emprades durant la campanya MARCONI 2003 en el moment de la seva revisió prèvia a l'inici de l'experiment. Visió general d'un dels emplaçaments en el moment de la instal·lació d'un instrument Hathor. En primer pla apareix el panell solar emprat per alimentar les bateries de l'estació.

7.2.3.- Pre-processat de les dades: construcció de les seccions sísmiques

- Dades dels OBS i OBH de GEOMAR

Els instruments alemanys estaven equipats amb dos tipus diferents de sismòmetres, dissenyats i fabricats per l'empresa SEND GmbH amb el suport de GEOMAR (Flueh i Bialas, 1996; Bialas i Flueh, 1999). Els OBS empraven el model MBS (*Marine BroadBand Seismic recorder*) mentre que els OBH funcionaven amb el model MLS (*Marine Longtime Seismograph*), els quals enregistren les dades en formats propis comprimits sobre targetes PCMCIA. Així doncs, el primer pas del processat de les dades obtingudes, un cop extretes les targetes de memòria, va consistir en la descompressió dels registres i en una conversió de format per tal de passar del format intern propi dels diferents models d'estacions sísmiques a un format únic (Figura 7.8). En aquest cas es varen convertir les dades seguint l'esquema del format internacional PASSCAL, amb l'objectiu de poder emprar les rutines desenvolupades per *The IRIS Consortium* per a les estacions Reftek.

A continuació es van corregir les derives internes dels rellotges de les estacions mitjançant els temps GPS introduïts als instruments en el moment de la seva programació i després de recollir-los. Les derives mitges dels instruments van ser de ± 2.5 ms diaris, essent el màxim 9.0 i el mínim 0.26 ms per dia. Aquestes derives es van distribuir linealment al llarg de tot el període de registre. A més a més, als OBH la freqüència del rellotge intern de les estacions MLS és funció de la temperatura, donant lloc a salts a la

freqüència de mostreig. Típicament, es produeix un error cada 1 o 2 hores, donant lloc a errors acumulats d'entre 1.5 a 5 segons al llarg de tot el període de funcionament. El moment en que es produeixen aquests salts queden anotats als fitxers de control de les estacions i es poden corregir posteriorment omplint amb mostres d'amplitud zero els salts de temps.

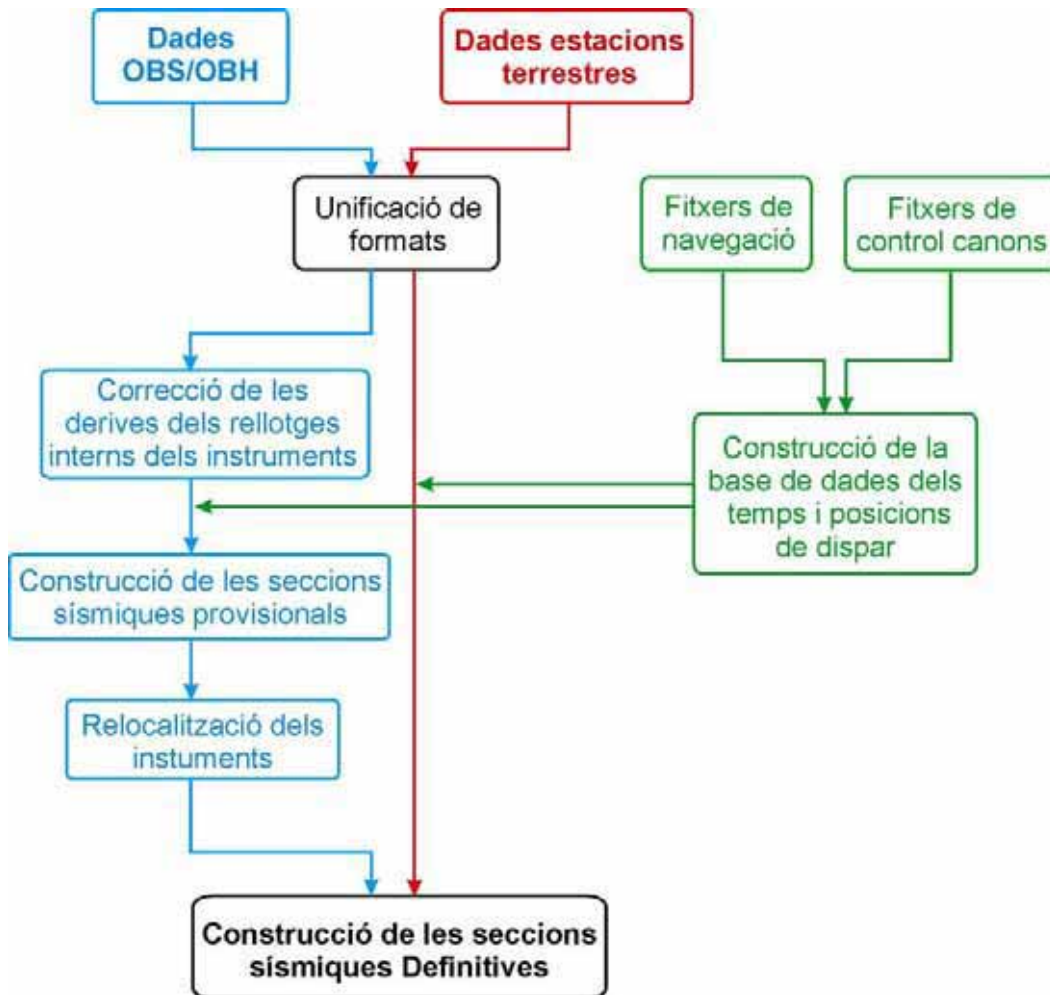


Figura 7. 8- Esquema del flux de pre-processament de les dades sísmiques de gran angle obtingudes a terra i mar.

Posteriorment es va construir la base de dades dels temps de dispar dels canons. Per a cada un dels perfils, es va assignar als temps de dispar exactes, obtinguts del fitxer de control dels canons, la seva posició geogràfica i batimètrica, mitjançant els fitxers de navegació del vaixell (Figura 7.8). Aquesta informació es va emprar per a extreure de les dades en brut de cada una de les estacions, els fitxers SEGY amb les seccions sísmiques dels perfils corresponents. Tot seguit es va procedir a relocalitzar els instruments mitjançant el procediment de fer coincidir les primeres arribades de l'ona d'aigua teòrica amb l'observada. Per a tots els aparells es va realitzar una relocalització 2D, corregint la seva posició només en la direcció del perfil sobre el que es trobava. En el cas dels instruments

posicionats sobre els encreuaments de dos o més perfils, va ser possible realitzar una relocalització 3D, precisant millor la posició d'aquestes estacions. Les correccions efectuades varien entre un mínim de 11 m i un màxim de 304 m, essent la correcció mitja de l'ordre de 100 m.

Un cop obtingudes les posicions correctes de tots els instruments i les derives temporals corregides, es va procedir a tallar els fitxers SEGY definitius de tots els perfils i estacions. Els fitxers SEGY resultants es varen obtenir reduïts a una velocitat de 8 km/s.

- Dades dels OBS de la UTM

En el cas dels OBS gestionats per la UTM, un cop descomprimides les dades i corregides les derives internes mitjançant els temps GPS introduïts al inici i final de l'experiment, es van extreure els fitxers SEGY amb les seccions sísmiques. En aquest cas no es va realitzar la relocalització dels 2 instruments recuperats.

- Dades de les estacions sísmiques terrestres

El processat de les estacions sísmiques terrestres va ser menys laboriós que el dels instruments de registre sísmic marí. En primer lloc no va ser necessari efectuar correccions de derives internes dels rellotges dels instruments ja que les estacions estaven rebent constantment el temps UTC via GPS o DCF. En segon lloc, el fet d'emprar el sistema GPS, tant de forma continuada, en la major part dels instruments, com en el moment de la seva instal·lació i recollida, en el cas dels instruments sincronitzats via DCF, ens permet conèixer amb precisió la localització de l'instrument, i per tant tampoc és necessària cap mena de relocalització posterior.

En aquest cas, l'únic pre-processat que es va haver de fer és unificar els diferents formats interns del tres tipus d'instruments emprats, passant tots els registres al format SEGY, i extreure, del continu de dades obtingudes a cada emplaçament, l'ensamblatge del perfil sísmic corresponent via els catàlegs de temps de dispars construïts anteriorment (Figura 7.8).

7.2.4.- Filtrat de les dades

Un cop obtinguts, per a cada una de les estacions, els fitxers SEGY amb les seccions sísmiques dels perfils corresponents, es van realitzar una sèrie de processos a fi de

potenciar les fases sísmiques enregistrades.

En el cas dels OBS/OBH de GEOMAR, en primer lloc es va procedir a efectuar una anàlisi freqüencial del senyal enregistrat als diferents canals, les tres components del geòfon i la de l'hidròfon, per buscar el rang de freqüències en la que es troba la senyal sísmica (Figura 7.9). Es va observar que la senyal es trobava concentrada en una finestra de 4 a 18 Hz, però, com és natural, el contingut d'altres freqüències és major per a offsets propers mentre que aquestes es van atenuant a mesura que s'augmenta la distància, reduint-se a una finestra de 4 a 11 Hz per les fases més profundes.

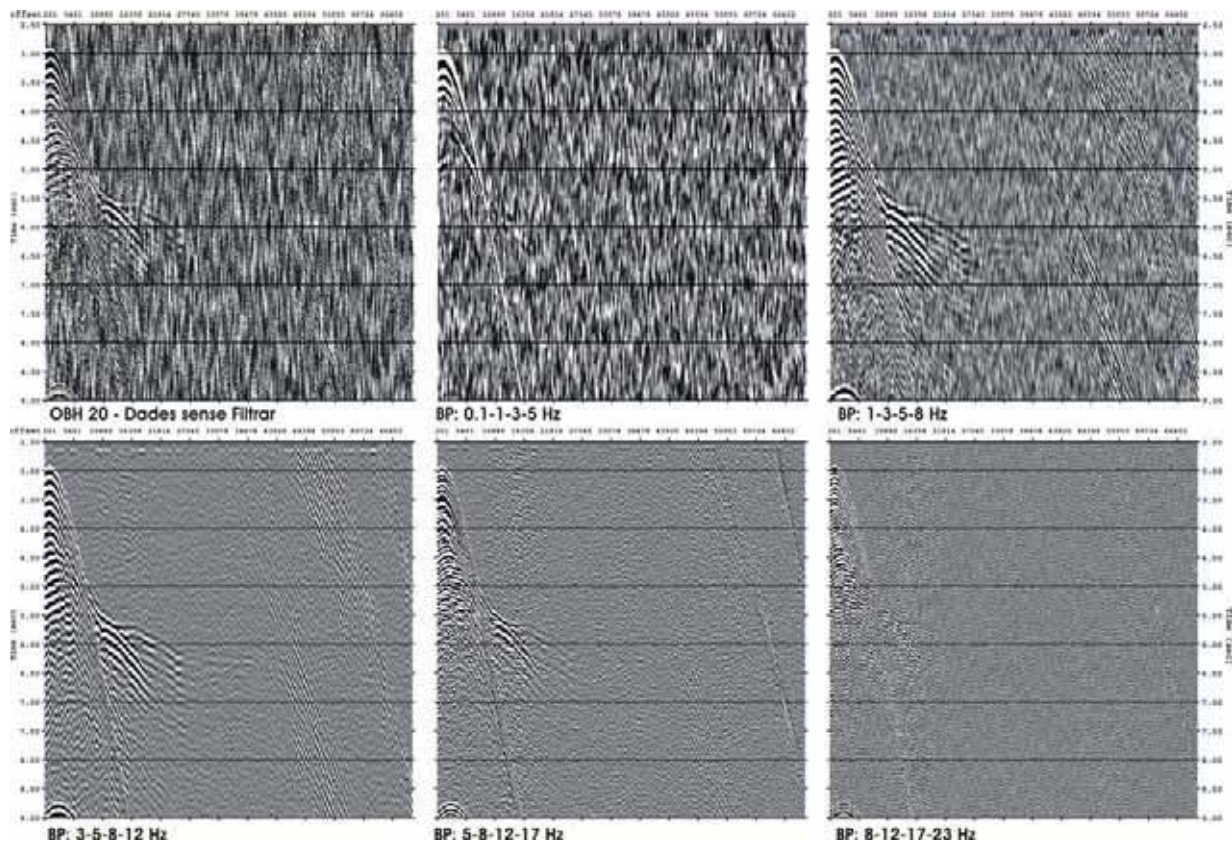


Figura 7. 9- Anàlisi freqüencial pel canal de l'hidròfon de l'OBH 20, Perfil 1. Es pot observar com el senyal es troba concentrat en la finestra d'entre 4 i 18 Hz.

Per aquest motiu, es va procedir a filtrar els fitxers SEG-Y aplicant un filtre passa-banda no desfasant, de tipus Ormsby, i depenent de la distància. Es va aplicar BP 3-5-12-17 Hz entre els 0 i 105 km i 3-5-8-12 Hz a partir dels 105 km fins al final dels perfils.

Abans però, a fi de millorar la resolució temporal del senyal es va aplicar una deconvolució de tipus Wiener. El senyal enregistrat pot tenir moltes components incloent la signatura de la font, la resposta dels sensors i del filtre del propi aparell de registre. Idealment, la deconvolució hauria de comprimir les components de la forma d'ona deixant

només a la traça sísmica la resposta de la Terra. Amb aquest objectiu, es varen realitzar tests de deconvolució aplicant al senyal sense filtrar operadors de diferent longituds per tal d'escollir el més adient (Figura 7.10).

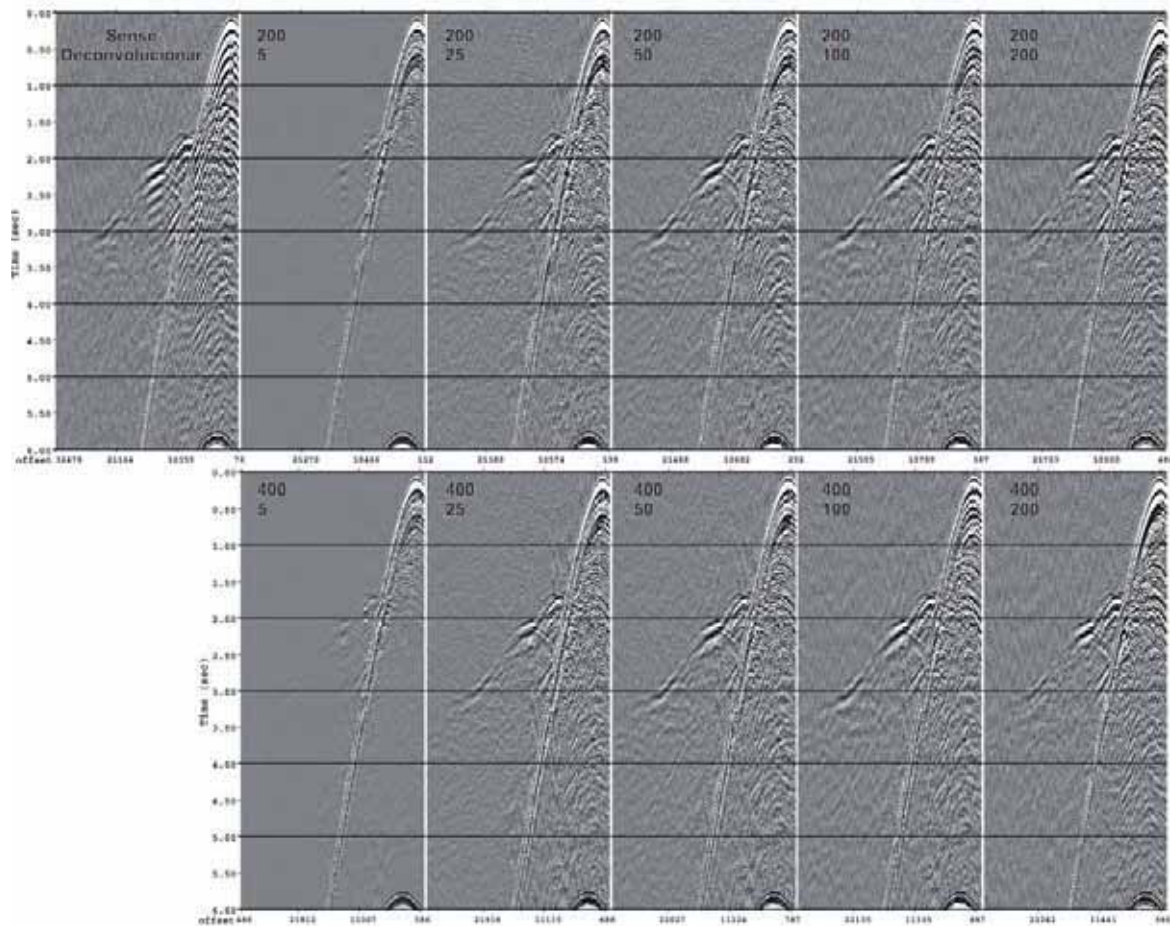


Figura 7. 10.- Senyal sense filtrar de l'hidròfon del OBS08, Perfil 1. Exemples de deconvolució aplicant varis operadors de diferents longituds.

Es va observar que els millors resultats s'obtenien aplicant un operador de longitud 200 ms amb un operador predictor de 50 ms, dividint cada traça en finestres de 3000 ms que es superposen 1000 ms en els extrems amb la següent finestra.

Un cop deconvolucionats i filtrats els fitxers SEG-Y aplicant els paràmetres que millor s'ajustaven a aquestes dades, se'ls va aplicar un filtrat F-K dependent de la distància per tal d'eliminar l'amplitud de l'ona d'aigua. Per a offsets propers, en els 30 primers km entorn la posició de l'instrument, es va aplicar un F-K amb pendents 0.30-0.35-0.7-0.9 s/km per eliminar l'ona d'aigua directa, i per a offsets llunyans, a distàncies superiors a 30 km, es va aplicar un F-K, amb pendents 0.15-0.20-0.6-0.7 s/km per eliminar l'ona d'aigua dels tirs anteriors (Figura 7.11).

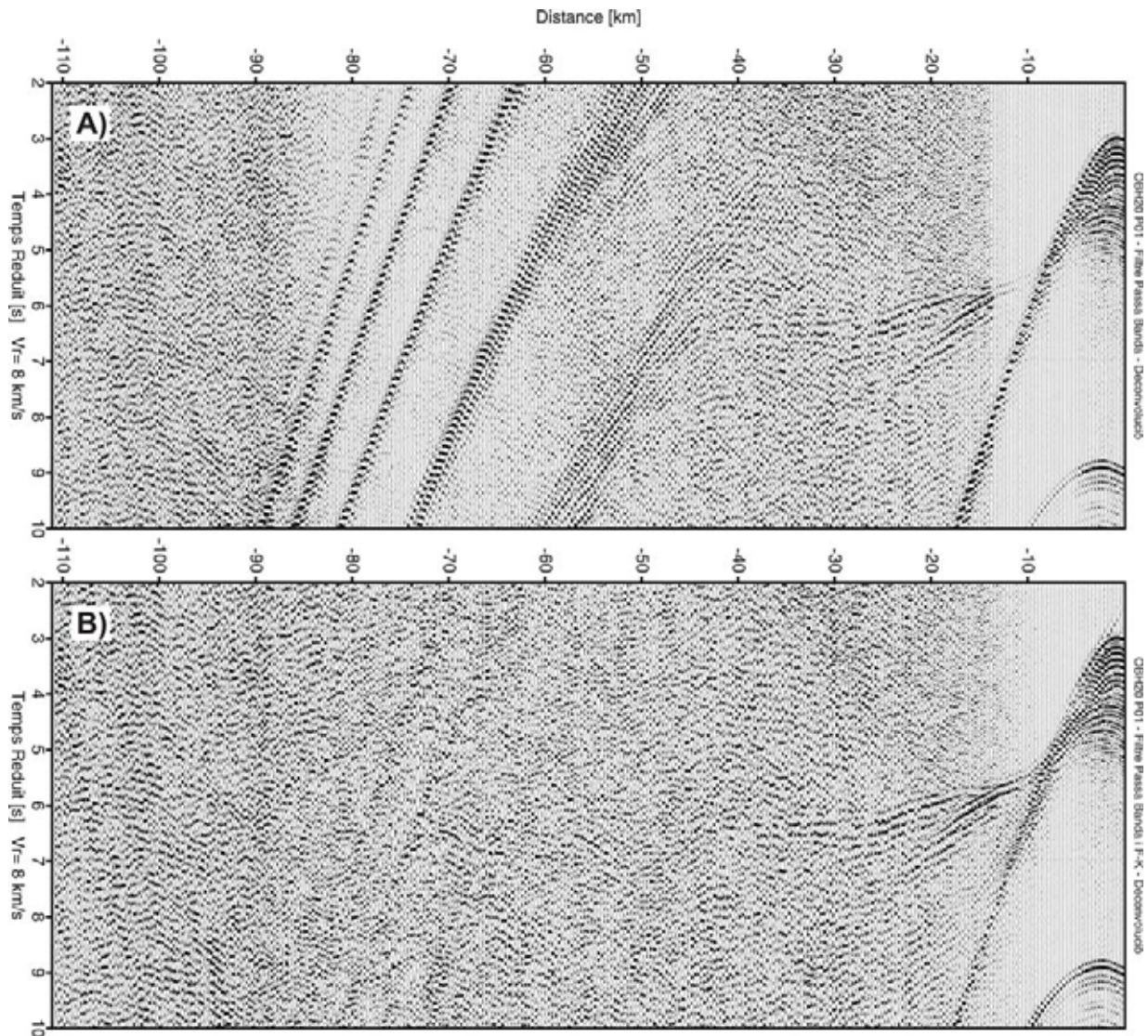


Figura 7. 11. A) Senyal de l'OBH20, perfil 1 deconvolucionat i filtrat amb un filtre passa-banda Ormsby dependent de la distància. B) Resultat d'aplicar a aquest senyal pre-tractat un filtre F-K dependent de la distància per eliminar l'amplitud de l'ona d'aigua. Es mostren, a les dues planxes, 1 de cada 3 traces enregistrades.

Posteriorment es va procedir a aplicar un filtre de coherència lateralment dependent de la freqüència (*frequency-dependent lateral coherence filter*) per potenciar les senyals coherents de la secció, mitjançant l'atenuació les seves components incoherents (Schimmel i Gallart, 2007) (Figures 7.12 i 7.13).

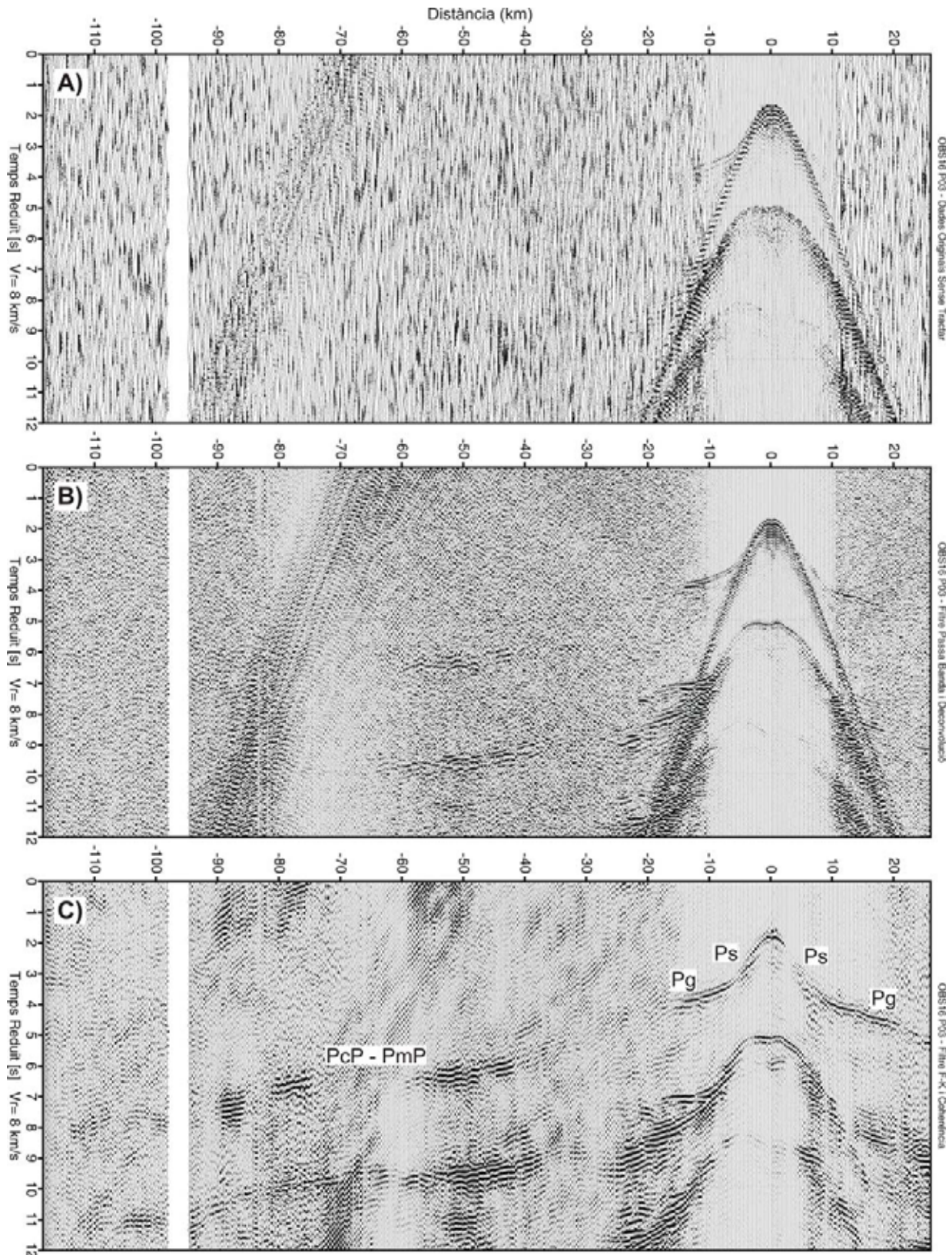


Figura 7. 12.- Senyal de l'hidròfon de l'OBS16, Perfil 3. Es mostren només 1 de cada 3 traces enregistrades. A) Sense aplicar cap mena de tractament a les dades. B) Pre-processat del senyal: deconvolució i filtre passa-bandes aplicant els paràmetres detallats al text. C) Aplicació al senyal pre-processat d'un filtre F-K i un filtre de coherència per tal d'eliminar els senyals no desitjats i incoherents. S'indiquen les fases identificades.

Aquest mètode es basa en la determinació de la coherència lateral de les fases sísmiques en funció de la distància, el temps, la freqüència i la lentitud o *slowness*. Aquesta funció de coherència és emprada posteriorment, en la representació dels registres sísmics en el domini temps-freqüència, per atenuar les components incoherents del senyal, i finalment, s'obtenen les seccions filtrades mitjançant una altra transformació cap al domini temporal (Schimmel i Gallart, 2007). Així doncs, per tal d'optimitzar el temps de processat va ser necessari reduir la freqüència de mostreig a 40 mps. El filtre de coherència es va aplicar en el rang de freqüències comprès entre 3 i 15 Hz. Per a offsets propers, inferiors a ± 30 km, es va potenciar el rang de *slowness* comprès entre -0.20 i 0.35 s/km, i per a offsets llunyans, superiors a ± 30 km, el rang de -0.15 a 0.15 s/km (Figura 7.12 C).

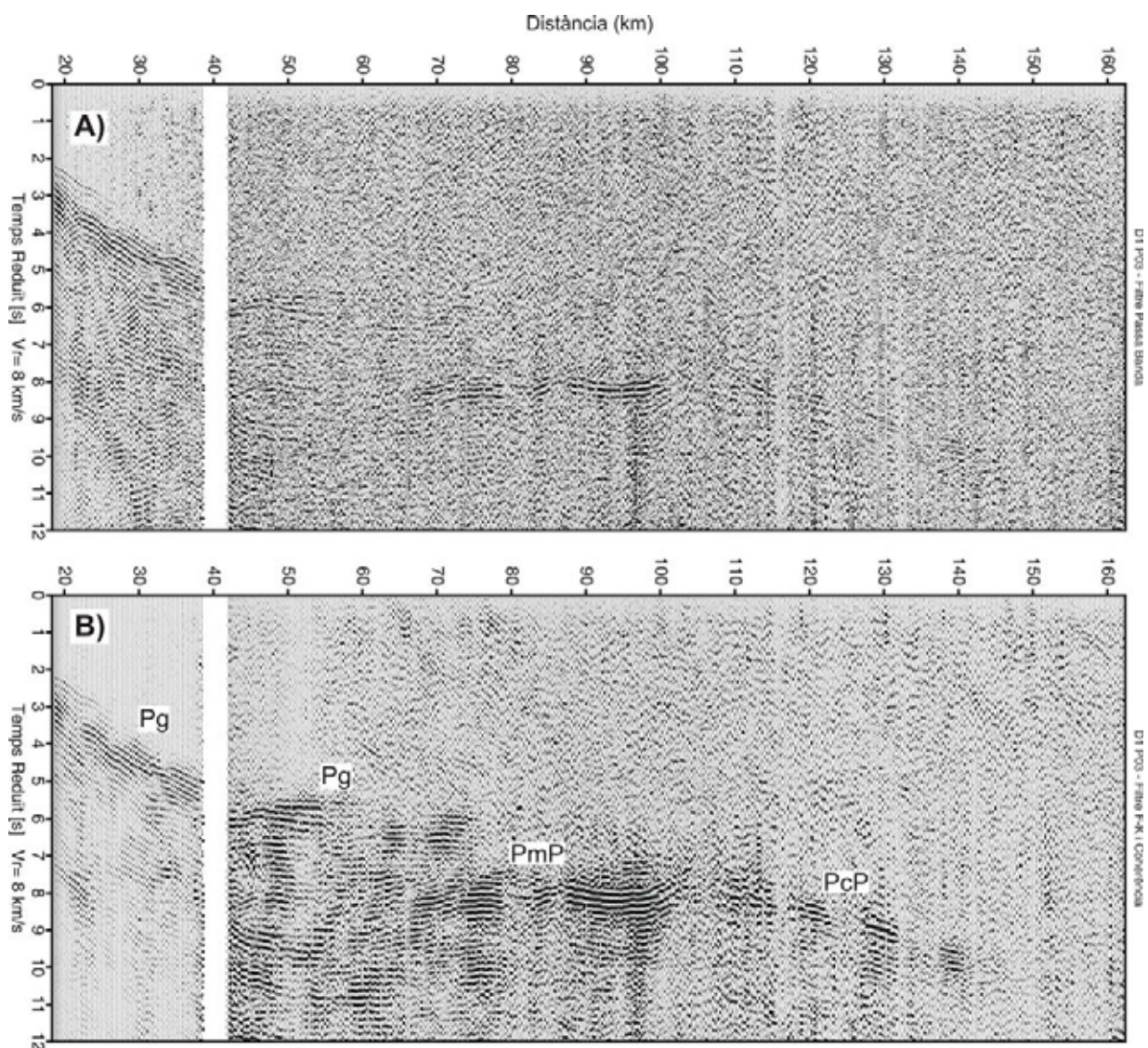


Figura 7. 13.- A) Senyal del canal vertical de l'estació D1, Perfil 3, després d'aplicar un filtre passabandes. B) Dades filtrades a les que se'ls ha aplicat un filtre F-K i el filtre de coherència. S'han indicat les fases identificades en aquest instrument. Per claredat, a les dues figures es mostren només 1 de cada 3 traces enregistrades.

En el cas de les dades obtingudes a les estacions de terra es va aplicar un filtre passa-banda de tipus Butterworth 2-3-15-16 Hz, un FK de pendents 0.30-0.32-0.75-0.90 s/km i el filtre de coherència. En aquest cas també es tenien les dades reduïdes a una velocitat de 8 km/s, i es van remostrejar a 40 mps per tal de reduir el temps de càlcul del filtre de coherència, el qual es va aplicar en el rang de freqüències 3-15 Hz i en 2 passos: per a offsets inferiors a 40 km es va potenciar el rang de *slowness* de -0.20 a 0.30 s/km i per a offsets llunyans, de -0.15 a 0.15 s/km (Figura 7.13 B).

7.3.- Mètodes d'interpretació

El primer pas en l'etapa d'interpretació de les dades obtingudes va consistir en la identificació i correlació de les principals fases sísmiques presents en els registres, corresponents a ones refractades i reflectides en els diferents nivells estructurals de l'escorça. L'obtenció dels models de velocitat-fondària es va portar a terme mitjançant la modelització directa, per assaig i error, tant en el traçat de raigs com d'amplituds, mitjançant el paquet de software *RayInvr* (Zelt i Ellis, 1988; Zelt i Smith, 1992). Es varen fer proves per tal d'aplicar mètodes d'inversió tomogràfica 2D (Korenaga et al., 2000), però aquesta metodologia no va resultar operativa donada la feble densitat de punts de mesura d'aquest experiment.

El paquet informàtic utilitzat inclou tres eines bàsiques: el programa *RayInvr*, que efectua el càlcul del traçat de raigs i temps d'arribada teòrics al llarg de perfil, i els programes *Tramp* i *Pltsyn* que calculen les amplituds d'aquestes arribades i generen els seus sismogrames sintètics, respectivament. Aquest conjunt de programes assumeixen que el model de velocitats és un medi bidimensional isòtrop, lateralment homogeni en la direcció perpendicular al pla del model. El model de velocitats es defineix mitjançant dos tipus de paràmetres: les posicions (x,z) dels nodes que defineixen els límits de cada capa, el nombre dels quals pot variar lliurement capa a capa segons la geometria que se li vulgui donar, i els valors de velocitat a la part superior i inferior de cada capa, definits també en nombre i separació variable segons les característiques i necessitats del model. Els límits de cada capa han de creuar d'un extrem a l'altre tot el model sense tallar en cap punt cap altre capa, però es poden ajuntar deixant capes d'espessor zero, per permetre la introducció de cossos aïllats o de capes en forma de tascó. El camp de velocitats complet a cada capa es genera suposant que, entre nodes de velocitat, la velocitat varia linealment tan en la direcció vertical com horitzontal. Per tant, per calcular el traçat dels raigs, el programa divideix

automàticament cada capa en blocs trapezoidals, separats pels límits verticals definits per la posició dels nodes on s'ha especificat un valor de fondària o de velocitat, tant a la part superior com inferior de cada capa. Així doncs, és possible definir per cada cos una funció, a partir de les velocitats dels vèrtexs dels trapezoids i les rectes que defineixen el seus costats, que genera el camp de velocitats al seu interior, i en conjunt, el camp de velocitats de cada una de les capes que formen el model (Zelt i Ellis, 1988; Zelt i Smith, 1992).

En cop establerta l'estructura inicial del model, els raigs es tracen a través seu solucionant numèricament les equacions de propagació derivades d'una teoria de raigs asimptòtica d'ordre zero (Cerveny et al., 1977), i aplicant la llei de Snell a les interseccions amb els límits de les capes (Zelt i Ellis, 1988; Zelt i Smith, 1992). Aquest algoritme contempla el traçat de tres tipus de raigs per a cada capa: les ones refractades en el seu interior, les ones reflectides a la seva base i les ones refractades críticament en la seva base (*head waves*) (Figura 7.14).

Un cop traçats els raigs a través del model, el temps total de propagació d'un raig en particular es calcula amb una simple integral numèrica al llarg de la seva trajectòria a través dels diferents trapezoids. Els temps de propagació a un punt arbitrari de la superfície del model es calcula interpolant linealment els temps de propagació dels dos raigs que l'envolten. Així doncs, per a models amb fortes variacions laterals serà necessari traçar un major nombre de raigs a fi de mostrejar millor les heterogeneïtats i d'obtenir major precisió en el temps interpolats (Zelt i Ellis, 1988).

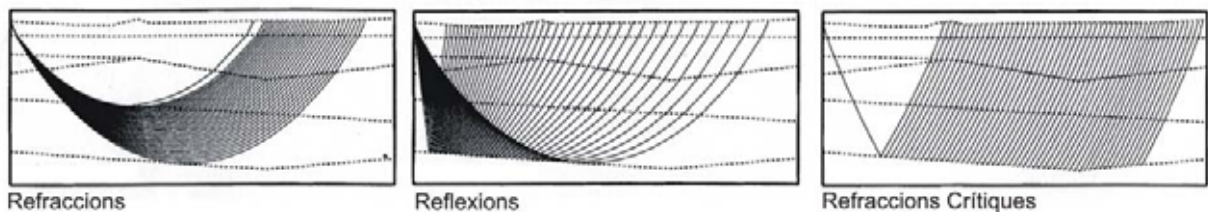


Figura 7. 14. Figura modificada de Zelt, 1999. Exemples dels tres tipus de raigs traçats pels programes de modelització emprats en aquest estudi.

L'ajust del model s'ha efectuat seguint l'esquema habitual: partint dels nivells més superficials, es va progressant cap als més profunds, ajustant primer tots els temps d'arribada de totes les estacions, nivell a nivell, i comprovant després el grau d'ajust de les amplituds. Així de forma iterativa, per assaig i error, fins a tenir un ajust prou bo dels temps i amplituds enregistrats (Zelt i Ellis, 1988). En el procés de modelització dels diferents perfils de gran angle, no s'ha tingut en compte els petits desplaçaments d'algunes de les estacions respecte a la geometria lineal dels perfils. Tampoc s'han efectuat correccions a les traces per

ajustar les diferències d'altitud de les estacions, en lloc seu s'ha optat per introduir una topografia i una batimetria detallada en el models.

La modelització de les amplituds aporta una valuosa informació sobre els gradients i contrastes de velocitats de les diferents capes, encara que la seva utilització està subjecta a importants limitacions, lligades sobretot a imprecisions del propi càlcul teòric, ja que els fenòmens d'heterogeneïtats a petita escala no es tenen en compte en l'algoritme, i molt especialment a la resolució de les dades (Levander i Holliger, 1992; Zelt i Smith, 1992; Zelt i Forsyth, 1994; Zelt, 1999). La teoria de raigs emprada en aquest software no permet contemplar certes fases com ara les difraccions i, a més a més, assumeix certes simplificacions que donen lloc a errors de càlcul en certs punts singulars. El problema és especialment significatiu per a les ones refractades críticament, ja que en el seu càlcul s'utilitza una teoria asimptòtica de primer ordre, segons la qual l'amplitud del raig queda indefinit en el punt crític (Zelt i Ellis, 1988). Per solucionar aquest problema, l'algoritme utilitza l'aproximació ad-hoc proposada per Spence (1983), però el resultat és que les amplituds de les ones refractades críticament no són vàlides a la zona d'interferència amb el raigs reflectits (Zelt i Ellis, 1988). Afortunadament, en la majoria de les situacions pràctiques, on les capes presenten certs gradients verticals de velocitat, les refraccions no crítiques produïdes a l'interior del medi dominen sobre les refraccions crítiques, per tant es possible obviar la seva modelització (Zelt i Ellis, 1988). Altres factors que compliquen el càlcul de les amplituds són els de l'atenuació que exerceixen els diferents medis pels quals es propaga l'ona, fent disminuir l'energia sísmica de forma diferent per a les diferents freqüències del senyal, i la dispersió geomètrica de les ones durant la seva propagació, que només es podria modelitzar correctament en 3 dimensions. Malgrat tot, tots aquests factors afecten en major mesura al càlcul de les amplituds absolutes, és a dir, a l'evolució de l'amplitud d'una determinada fase al llarg del perfil, però no és tant greu si el que es busca és l'amplitud relativa entre varies fases al llarg de la secció sísmica per poder comparar-les amb les amplituds enregistrades. Igual que en el càlcul dels temps de propagació, les amplituds en punts intermedis de la superfície del model es calculen per interpolació de les amplituds dels raig contigus (Zelt i Ellis, 1988).

Alhora de calcular les amplituds relatives, s'han traçat tots els possibles raigs reflectits i refractats no crítics, no només aquells que ajusten les observacions, però s'han obviat les amplituds de les refraccions crítiques per tal d'evitar els problemes esmentats anteriorment, i que apareixen agreujats en models molt complexos com és el cas dels obtinguts en aquest estudi. Finalment, en el procés d'ajust del model s'ha prioritzat el fet de que el model reproduïxi les arribades observades, sobre el fet de que a part de les observades en generi d'extres no identificades en les seccions sísmiques. Si un model no aconsegueix complir el

primer requisit segur que és incorrecte, en canvi, el fet de que a les dades no es vegin arribades predites pel model, pot ser degut a que tenen amplituds molt baixes i queden emmascarades amb el soroll de fons o a que interfereixen destructivament amb altres fases (Zelt i Smith, 1992; Zelt, 1999).

Quan es modelitzen dades de gran angle a mar, enregistrant dispars realitzats en superfície amb receptors oceànics profunds, la primera arribada fins a un cert offset, que depèn de la fondària a la que es troba el receptor i de la velocitat del fons, és l'ona directa o ona d'aigua. Per tant les arribades de les ones refractades a les làmines sedimentàries més superficials, just per sota els fons oceànic, poden quedar en algunes ocasions emmascarades per la gran amplitud de l'ona d'aigua, generant un àrea cega per a la qual no és possible obtenir-ne directament la seva distribució de velocitats (White i Matthews, 1980; Ewing i Purdy, 1982; White et al., 1992; Zelt, 1999). La pitjor situació es té per a receptors situats a zones de profunditat considerable sobre una conca sedimentària molt potent i de molt baixa velocitat, ja que aleshores l'obertura de la hipèrbola generada pels temps d'arribada de l'ona directa serà molt ampla i les ones refractades per la primera capa tindran poc pendent, quedant emmascarades fins a offsets majors (Zelt, 1999). El mateix succeeix per les reflexions a incidència quasi-normal, molt útils per acotar amb precisió la fondària de la capa, les quals queden sempre dins de la hipèrbola de l'ona directa. Així doncs, per modelitzar la distribució de velocitats d'aquests sectors més superficials, que no estan directament mostrejats per arribades de raigs que s'hagin propagat pel seu interior, es fa necessari ajustar-les tenint en compte, o optimitzant, l'ajust de les capes inferiors, ja mostrejades per raigs amb temps de propagació fora de la zona d'ombra generada per l'ona directa (Zelt, 1999; Contrucci et al., 2004). Aquests errors en la distribució de velocitats de les zones més superficials es tradueixen a la pràctica en un problema de compensació entre la fondària i la velocitat d'aquestes capes, i que per tant no afecten greument la modelització de l'estructura profunda (Zelt, 1999). A fi de minimitzar aquest fenomen, com hem esmentat anteriorment en l'apartat del processat del senyal, s'aplicaren filtres F-K per eliminar al màxim l'amplitud de l'ona directa i permetre discernir part dels senyals emmascarats per ella (Figura 7.12c). A més a més, en el sector marí de cada perfil s'emprà la sísmica de reflexió vertical realitzada durant aquest mateix experiment com a complement per a modelitzar les conques sedimentàries i les capes més superficials. Transformant la fondària del model de velocitats a temps doble i superposant-lo a la línia sísmica, ha permès, malgrat la incertesa intrínseca entre la velocitat i la fondària, fixar amb major precisió la seva geometria. Un altre fet a tenir en compte en la modelització de les dades d'aquest experiment bé donat per l'absència de registres d'offset proper a la zona de terra, ja que no es varen realitzar dispars en aquesta àrea, fet que no permet refinar massa alhora de modelitzar l'estructura superficial d'aquest sector del model (Zelt, 1999; Contrucci et al., 2004).

Degut a la complexitat de les estructures mostrejades en aquest estudi, i a que el nombre i espaiat entre els OBS/OBH és en alguns casos poc adient, va fer que s'optés per emprar un mètode de modelització directa en comptes d'un procés d'inversió, ja que aquest podria fàcilment no convergir a solucions úniques. Per tant, malgrat que la modelització inversa presenta certs avantatges com ara la facilitació d'estimacions quantitatives de l'incertesa i no unicitat del model, la reducció del temps necessari per interpretar la informació, minimitzant la intervenció humana, i permet assegurar que les dades han estat minimitzades segons un mateix criteri o norma, evitant els efectes derivats de la subjectivitat del modelitzador (Zelt i Smith, 1992; Zelt, 1999), en aquest treball no s'ha emprat l'opció d'inversió dels temps d'arribada que permet el programa *Rayinvr*. A més a més, la modelització directa ha permès introduir als models els resultats d'estudis previs, com és el cas dels perfils sísmics realitzats a la Serralada Cantàbrica durant la dècada dels 90 (Fernandez-Viejo et al, 1998 i 2000; Gallastegui, 2000; Pedreira, 2004), o com ja hem esmentat, els realitzats en el sector marí del marge Cantàbric durant la campanya MARCONI. Fins i tot, ha permès emprar els resultats derivats d'altres tècniques, com ara la modelització gravimètrica (Pedreira, 2004). La introducció de tota aquesta informació prèvia resulta de gran importància per a la modelització d'una àrea que presenta fortes heterogeneïtats laterals, permetent acotar millor les estructures i reduir l'ambigüitat del model final (Zelt, 1999).

