

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

### 3.- ADQUISICIÓ DE LES DADES DE SISMICITAT

Des de mitjans de l'any 1999 fins a finals del 2005, es varen desplegar per tot el nord peninsular una sèrie de xarxes sísmiques temporals amb l'objectiu d'enregistrar terratrèmols locals, regionals i telesismes (Figura 1.1). En aquest capítol farem una breu descripció del material emprat i de les tècniques desenvolupades en el processat de les dades.

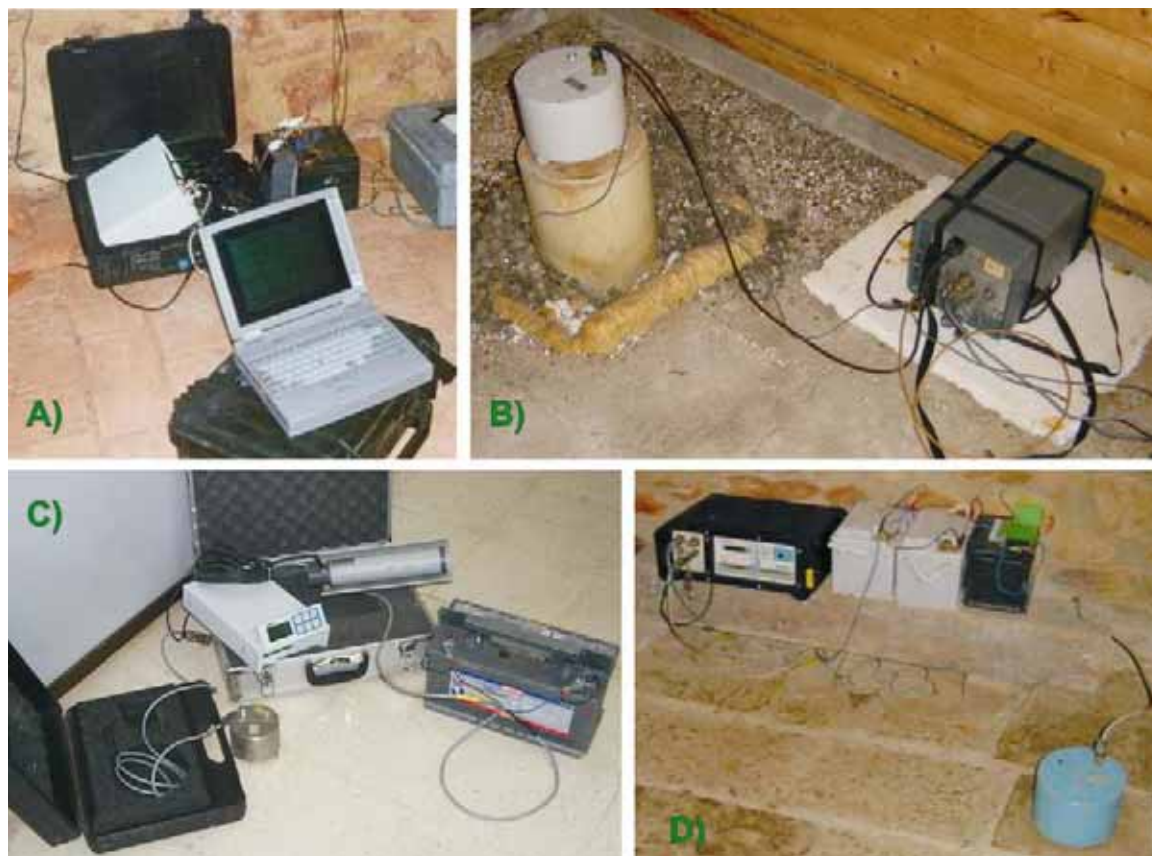
La interpretació de les dades obtingudes ha permès la publicació de 3 articles en revistes internacionals de relleu que conformen els següents capítols d'aquesta part de la memòria.

#### 3.1.- Descripció de les estacions sísmiques emprades

Per a la realització d'aquests experiments s'han emprat estacions sísmiques Reftek, Leas Hathor, Lennartz Mars Lite i Lennartz Mars 88 de l'Institut de Ciències de la Terra 'Jaume Almera', de la Universitat d'Oviedo i de l'Institut de Physique du Globe de París (Figura 3.1).

Els tres primers tipus d'estacions permeten el registre continu a l'emmagatzemar les dades en discs durs o sistemes magneto-òptics (MO), d'entre 512Mb i 6 Gb de capacitat, que donen autonomies de registre d'entre 15 i 60 dies, en funció del model i de l'interval de mostreig amb que s'hagi programant l'estació (Taula 3.1).

Les estacions Lennartz Mars 88, al ser models més antics, només tenen memòria RAM i dues disquetes de 3 ½". Aquestes estacions només foren emprades ocasionalment i en mode detecció, doncs la seva capacitat total és de només 6.88 Mb (Taula 3.1).

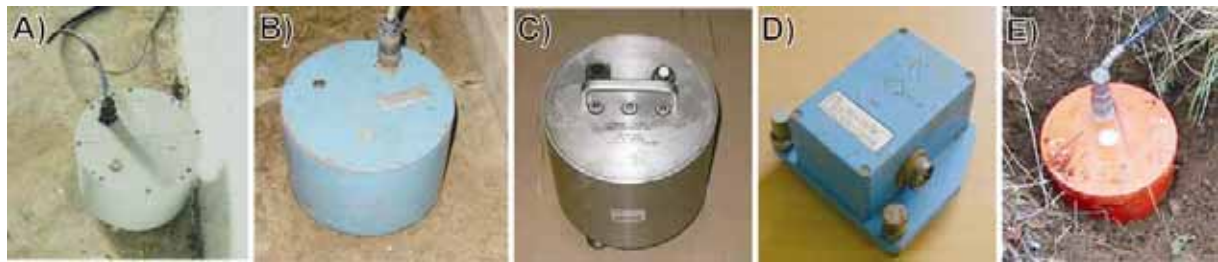


**Figura 3. 1.-** Tipus d'estacions sísmiques emprades. A) Estació Leas Hathor i el PC utilitzat per a la seva programació. B) Estació Reftek amb un geòfon de 20 segons. C) Estació Lennartz Mars Lite amb un geòfon d'1 segon i equipada amb una antena DCF. D) Estació Lennartz Mars 88 amb un geòfon de 5 segons.

Els sensors o geòfons emprats han estat de 2 tipus. Per una banda s'han emprat sensors de curt període, d'entre 2Hz i 1s, destinats principalment al registre de terratrèmols locals i regionals, i per altre geòfons de banda ampliada, de 5 s i 20 s de període propi, amb l'objectiu d'enregistrar telesismes (Figura 3.2 i Taula 3.1).

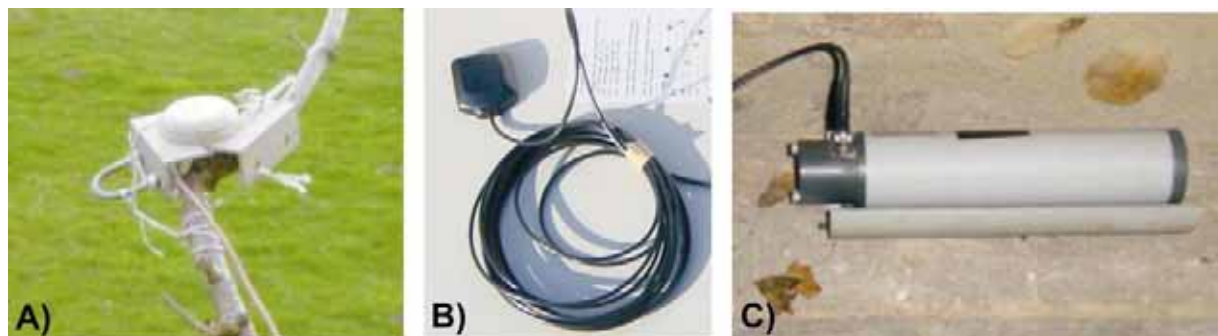
**Taula 3. 1.-** Característiques principals de les estacions sísmiques emprades.

<b>Model</b>	<b>Tipus d'emmagatzament</b>	<b>Capacitat d'emmagatzament</b>	<b>Geòfons</b>	<b>Adquisició de temps</b>	<b>Autonomia</b>
<b>Reftek</b>	Disc SCSI Intern	1 - 4 Gb	1s/5s/20s	GPS	40-60 dies
<b>Leas Hathor</b>	Disc Extraïble	3 - 6 Gb	2Hz/1s/5s/20s	GPS	45-60 dies
<b>Mars Lite</b>	Disc Magneto-Òptic	512 Mb	1s	GPS DCF	15 dies
<b>Mars 88</b>	2 Disquets 3 1/2"	6.88 Mb	1s/5s	DCF	Depèn del soroll de fons



**Figura 3. 2.-** Tipus de sensors de 3 components utilitzats en els experiments temporals. A) Geòfon Lennartz de 20 segons. B) Geòfon Lennartz de 5 segons. C) Geòfon Mark L4 d'1 segon. D) Geòfon Lennartz d'1 segon. E) Geòfon de fabricació xinesa de 2 Hz.

El sistema de recepció de temps i sincronització dels instruments també és una característica que depèn del model d'estació. Les estacions Reftek i Leas Hathor utilitzen receptors GPS a fi d'obtenir periòdicament el temps UTC i la seva posició geogràfica. En canvi, les estacions Lennartz Mars Lite poden funcionar tant amb el sistema GPS com amb el sistema de recepció de temps via radio DCF-77. Per últim, les estacions Lennartz Mars 88, funcionaren exclusivament amb el mètode de sincronització DCF-77 (Figura 3.3 i Taula 3.1).



**Figura 3. 3.-** Detall de les antenes per a la recepció de temps i sincronització de les estacions sísmiques. A) Antena GPS d'una estació Reftek. B) Antena GPS d'una estació Leas Hathor o Lennartz Mars Lite. C) Antena DCF-77 emprada per a les estacions Lennartz Mars 88 i Mars Lite.

Les estacions es varen situar sempre en llocs aïllats amb el mínim de soroll ambiental i antropogènic. Quan va ser possible, es van buscar llocs tancats i vigilats ja que els instruments havien de romandre al camp durant períodes llargs de temps. El sistema d'alimentació dels aparells va consistir principalment en dues bateries de 12 V, i 70 Ah com a mínim, alimentades amb un parell panells solars. Això implica la necessitat d'utilitzar llocs amb espai obert al seu voltant i amb una bona insolació per alimentar els panells solars i carregar així les bateries. Per altre banda, l'espai obert garantia una bona recepció dels senyals GPS o DCF. En alguns casos, va ser possible utilitzar la xarxa elèctrica per a carregar una bateria 'tampó' assegurant així l'alimentació elèctrica de les estacions.

### **3.2.- Logística: Autonomia i manteniment de les estacions**

Hi ha dos factors que limiten l'autonomia d'una xarxa sísmica temporal i afecten a la logística de l'experiment, marcant la pauta dels períodes de visita per a fer el manteniment del dispositiu: el sistema d'alimentació elèctrica dels instruments i la capacitat d'emmagatzament de les estacions.

Les estacions que no estaven connectades a la xarxa elèctrica tenien una autonomia d'uns 45 dies, sempre i quan les condicions atmosfèriques no fossin molt adverses. En els períodes hivernals de baixa insolació o en mesos molt plujosos, no s'aconseguia la recàrrega de les bateries i les estacions podien arribar a aturar-se. El registre es reprenia automàticament quan la irradiació solar tornava a augmentar, sense que es perdessin les dades enregistrades anteriorment als discs.

Per altre banda, l'autonomia de la xarxa depèn de la capacitat dels discs durs, per tant l'interval de mostreig utilitzat és un altre factor crític en el seu disseny. Segons l'objectiu principal de l'experiment i del tipus d'instruments de que es disposava, s'empraren intervals de mostreig diferents. Durant el projecte GASPI a Navarra, on un dels objectius de la xarxa desplegada era registrar telesismes i on es desplegaren bàsicament estacions Reftek, Leas Hathor i Lennartz Mars 88, es van emprar freqüències de mostreig de 50 mostres per segon (mps), suficients pels períodes propis de les senyals telesísmiques, fent que els discs durs més petits, els d'1 Gb, tinguessin una autonomia d'uns 35-40 dies aproximadament. Aquest fet va obligar a fer visites mensuals per a fer el manteniment de la xarxa, que consistia principalment en el buidat de les dades i substitució de les bateries, encara que s'aprofitava també per a realitzar altres tasques per garantir el perfecte funcionament del dispositiu. Durant l'experiment d'Aralar s'empraren estacions Lennartz Mars Lite, Reftek i Mars 88. L'objectiu era registrar les repliques d'un event local, per tant es feia necessària la utilització de freqüències més altes. Programant les estacions Mars Lite amb un interval de mostreig de 16 ms (62.5 mps) es garantia que els discs MO de 512 Mb duressin aproximadament 15 dies. Aquest fet es va aprofitar per augmentar l'interval de mostreig fins a 100 mps a les estacions Reftek, ja que al fer visites de manteniment quinzenals es garantia l'autonomia dels seus discs més petits. A les dues campanyes d'Itoiz, dedicades també a l'estudi d'events locals, es disposava d'estacions Leas Hathor amb major capacitat d'emmagatzament i per tant es varen poder programar tots els instruments amb freqüències de mostreig de 100 mps. Malgrat tot, durant l'experiment del 2004 es continuaren fent visites quinzenals per garantir el perfecte funcionament de la xarxa i realitzar alguns canvis i reajusts per millorar la seva cobertura. En canvi, en el període 2005, les visites foren altre cop més espaiades, realitzant-se amb una periodicitat mensual o alguns cops superior.

### 3.3.- Processat. Tractament de les dades

Cada tipus d'estació sísmica treballa amb un format intern propi, que és l'adient per a emmagatzemar les dades de forma comprimida als discs, però que no és el més pràctic a l'hora d'unificar tots els registres d'una xarxa amb diferents tipus d'estacions i de treballar amb les formes d'ona obtingudes. Per aquest motiu el primer pas del processat va consistir en convertir les dades a un format únic i comú per a totes elles. En aquests experiments es va optar per treballar amb el format de traces *SEG-Y* per fer tot el procés d'extracció de les dades treballant amb el paquet de programari *Passcal*, distribuït per *The IRIS Consortium*.

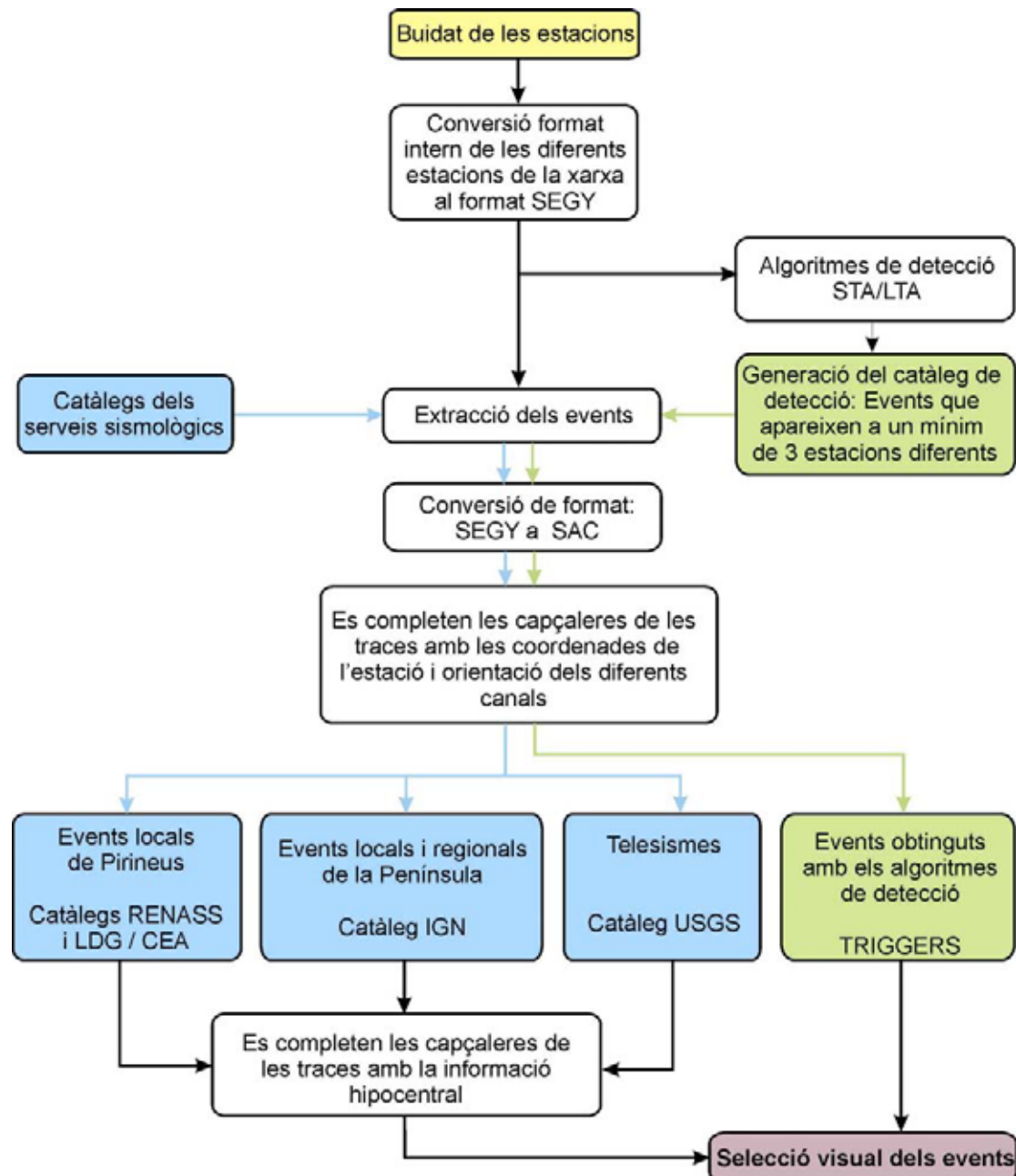
Un cop descomprimides i tractades les dades de totes les estacions de la xarxa s'obtenia un volum de dades en brut que oscil·lava entorn als 10-20 Gb per visita, depenent del nombre d'estacions, l'interval de mostreig emprat i la freqüència de visita. El següent pas del processat consistia en identificar i extreure tots els events sísmics que s'haguessin produït durant el període d'enregistrament. Per a gestionar de forma eficient aquest gran volum de dades va ser necessari desenvolupar un programari propi que permetés automatitzar al màxim tots els processos.

Del conjunt de dades en brut, es varen extreure els events locals, regionals i telesismes catalogats pels serveis sismològics. A fi de detectar els terratrèmols no catalogats per cap dels serveis sismològics presents a la regió d'estudi, es va aplicar, al senyal continu de totes les estacions, un algoritme de detecció basat en el quocient entre una mitjana temporal de curta i llarga durada; *STA/LTA* (*short time average/long time average*). Per tal d'evitar les deteccions falses, és a dir totes aquelles deteccions associades a soroll i que per tant no tenen interès sismològic, es va crear un algoritme de selecció basat en un criteri molt simple: només es guarden aquells dispars que s'hagin observat a un mínim de tres estacions diferents dins d'un interval de temps petit que cal ajustar per a cada dispositiu experimental. Tots els events que compliren aquests criteris foren extrets del continu de dades en brut enregistrades per totes les estacions sísmiques.

A fi de treballar amb més comoditat en la visualització i anàlisi dels sismogrames, es va optar per fer un segon canvi de format un cop es tenen les traces dels events sísmics. Es va passar del format de traces *SEG-Y* al format que utilitza el programa *SAC* (*Seismic Analysis Code*) (Goldstein and Minner, 1996; Goldstein et al., 2003).

Un cop es tenien totes les dades en el format *SAC*, es va procedir a completar la informació continguda a les capçaleres de les traces. En el format *SEG-Y*, les capçaleres contenien la informació bàsica: hora inici de la traça, durada, el nom de l'instrument que l'ha

enregistrat, freqüència de mostreig, etc. No obstant, és convenient, per tal de facilitar l'anàlisi de les dades, ampliar el contingut de les capçaleres amb la següent informació: coordenades geogràfiques de l'estació, orientació de les traces que han registrat els diferents canals i, si es coneix via catàleg, les coordenades hipocentrals i el temps d'origen del terratrèmol (Figura 3.4).



**Figura 3. 4.** Esquema del flux de processat aplicat a les dades obtingudes a les xarxes sísmiques temporals desplegades al NO de la península Ibèrica.

Després d'haver introduït aquesta informació a les dades, es procedia a la inspecció visual dels sismogrames obtinguts. L'objectiu d'aquesta inspecció era fer una primera tria del

senyal enregistrat. És d'esperar que una part dels sismes escollits amb els catàlegs, no apareguin als registres o la seva relació senyal-soroll sigui molt pobre, degut bàsicament a la seva baixa magnitud, llunyania o al soroll ambiental. Totes aquestes traces de mala qualitat eren descartades i només es guardaven els sismogrames que haguessin passat certs criteris de selecció establerts: bona relació senyal-soroll, que s'observés senyal a un mínim de 3 estacions, etc.

Amb aquesta primera inspecció només es triava la bona qualitat del senyal, no es tenia en compte el seu origen. Part dels events locals, catalogats i trobats en el procés de detecció, provenien de l'activitat humana, bàsicament explosions controlades a canteres, obra civil, etc. Aquests events es guardaven a part ja que podien ser d'utilitat per alguns experiments.

### **3.4.- Localització Hipocentral**

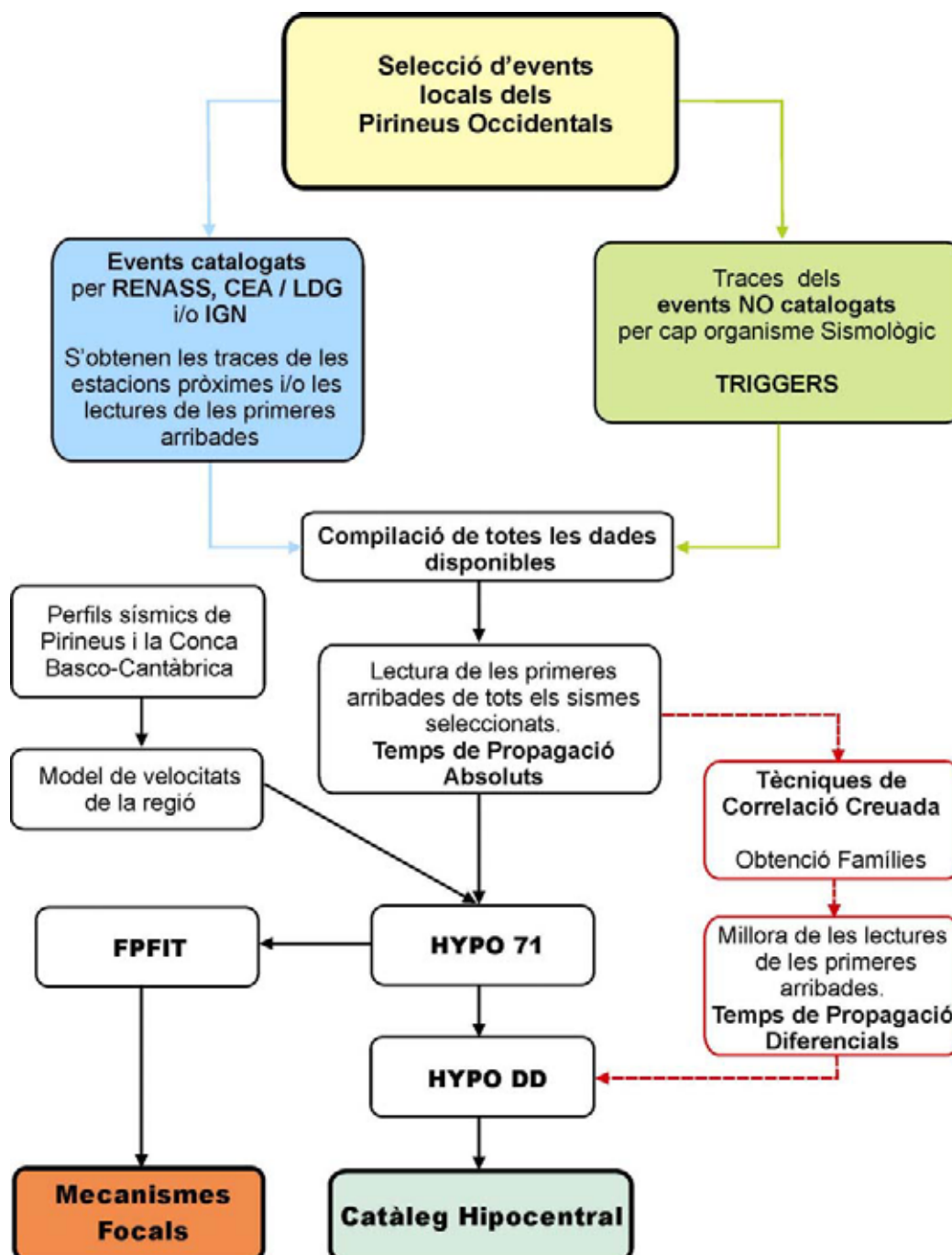
Finalitzat el processat preliminar de les dades, es va procedir a seleccionar del conjunt d'events sísmics enregistrats, obtinguts ja fos a partir dels catàlegs dels serveis sismològics o dels algorismes de detecció, aquells sismes d'interès pel nostre estudi. L'objectiu d'aquesta selecció era construir un catàleg que contingués:

- a) les determinacions hipocentrals d'events ja catalogats, relocalitzant els terratrèmols utilitzant conjuntament les dades de les estacions permanents de la zona i els registres obtinguts mitjançant les estacions sísmiques temporals.
- b) les localitzacions d'events locals no catalogats prèviament per cap organisme.

Un cop es varen tenir seleccionats els sismes a localitzar, es va procedir a recopilar tota la informació disponible. Les dades enregistrades per la xarxa sísmica temporal es van completar amb les traces dels terratrèmols RENASS, els temps d'arribada dels events catalogats pel IGN o, si era possible, les seves traces i els temps d'arribada dels sismes detectats per LDG/CEA per formar una única base de dades. Les lectures de les primeres arribades es va realitzar amb el programa SAC, el qual permet visualitzar i registrar les fases d'una forma molt flexible, generant automàticament un fitxer compatible amb el programa de localització. A cada lectura se li assigna un pes, entre 0 i 4, segons la seva qualitat. Les lectures amb pes zero són les de major qualitat i tindran més importància en la determinació hipocentral.



Com s'ha esmentat a la introducció, en tots els casos d'estudi, es va procedir a fer una primera determinació hipocentral dels events seleccionats emprant l'algoritme Hypo71 (Lee i Lahr, 1975) (Figura 3.5). El models de velocitats utilitzats en les inversions es van obtenir compilant tota la informació disponible de la regió, principalment perfils sísmics de gran angle de Pirineus i la Conca Basco-Cantàbrica (Gallart et al., 1981; Daignières et al., 1981; Pedreira et al., 2003).



**Figura 3. 5.-** Esquema dels passos seguits per a obtenir els catàlegs hipocentrics i els mecanismes focals a partir de les dades de les xarxes permanents i temporals.

A continuació, pels events amb major cobertura azimutal i pels quals es disposava d'un mínim de 6 lectures de polaritat d'ona P, es va emprar el fitxer de sortida del programa Hypo71, el qual conté la informació de la polaritat de l'ona P, azimuts, distàncies epicentrals i angles d'incidència per a cada una de les estacions, per obtenir els mecanismes focals d'aquests terratrèmols mitjançant el programa PPFIT (Reasenberg i Oppenheimer, 1985) (Figura 3.5).

Posteriorment, les localitzacions foren refinades aplicant l'algoritme de dobles diferències (Waldhauser i Ellsworth, 2000). La localització relativa de parelles d'events, emprant un algoritme de dobles diferències, minimitza la influència del model de velocitats, i disminueix els errors deguts a l'ús d'un model 1-D, el qual pot no reflectir amb exactitud l'estructura 3D real de la zona d'estudi. Es va aplicar al paquet HypoDD el qual permet emprar qualsevol combinació de temps de propagació absoluts, obtinguts de les lectures de primeres arribades d'ones P i S, i temps de propagació diferencials, derivats de l'aplicació de tècniques de correlació creuada als senyals de grups d'events amb característiques i propietats similars (Waldhauser, 2001; Massa et al., 2006) (Figura 3.5).

En el cas de l'estudi regional del projecte GASPI (capítol 4), es van invertir per dobles diferències els temps absoluts de les primeres arribades, obtenint un catàleg més precís, que conté, però, només una part dels events localitzats inicialment, ja que alguns dels events seleccionats no tenien suficients lligams amb els seus veïns i foren descartats durant el procés d'inversió.

En els casos d'Aralar i Itoiz (capítols 5 i 6), al ser estudis de rèpliques on es disposava d'estacions molt properes al focus i amb una bona relació senyal/soroll, va ser possible aplicar algorismes de correlació creuada (*Cross-Correlation*) per trobar famílies d'events (Maurer i Deichmann, 1995). Aquestes famílies foren emprades posteriorment, per trobar temps de propagació diferencials (Deichmann i García-Fernández, 1992), els quals foren introduïts a l'algoritme HypoDD junt amb els temps de propagació absoluts de la resta d'events que no pertanyien a cap família.

Els algorismes de correlació creuada destinats a trobar famílies o grups d'events amb característiques similars treballen sota la hipòtesi de que si un conjunt de terratrèmols són molt semblants entre ells és per que aquests tenen un origen comú, provenen d'una mateixa estructura o de la mateixa font, i per tant comparteixen un mateix mecanisme focal. A més a més, s'hauran propagat seguit un únic camí o trajectòria des del seu hipocentre fins l'estació

que els ha enregistrat, mostrejant al seu pas les mateixes estructures, i produint així que les formes d'ona de tots els sismes tinguin les característiques similars (Tsujiura, 1983; Poupinet et al. 1984). En aquest estudi es va optar per implementar l'algoritme presentat per Maurer i Deichmann (1995), el qual es basa, a l'hora de separar les diferents famílies, en buscar patrons a les files de la matriu de correlació. Aquest algoritme és molt més eficient que els basats en tècniques de Classe d'Equivalència (Aster i Scott, 1993).

Per trobar terratrèmols similars, l'algoritme implementat explora la zona de les ones S, que són més complexes que les ones P. Si dos terratrèmols es correlacionen prou bé a la zona de les S, busca si aquesta similitud es compleix també per a les P. Aquesta segona comparació es fa a fi de descartar events a priori similars però amb diferents mecanismes focals, o events que al estar enregistrats a estacions properes a un pla nodal poguessin tenir la P poc definida.

Les correccions de les lectures de les primeres arribades dels events de cada família es van realitzar aplicant l'algoritme descrit per Deichmann i García-Fernández (1992) el qual calcula les diferències de temps treballant en el domini temporal (Augliera et al., 1995; Saccorotti et al., 2002), a diferència dels algoritmes que ho fan en l'espai freqüencial (Poupinet et al., 1984; Frémont i Malone, 1987; Got et al., 1994; Rubin et al., 1999).

Per a poder aplicar aquesta metodologia es necessari definir a cada una de les famílies un event principal (*Master Event*) que és el que es prendrà de referència per a corregir la resta de sismes del grup. Normalment s'escull el sisme amb millor relació senyal-soroll, el que permeti realitzar les lectures de les primeres arribades amb major fidelitat i que hagi estat enregistrat pel major nombre d'estacions; habitualment s'utilitza el terratrèmol de major magnitud de cada família.

L'aplicació de les tècniques de correlació creuada, junt amb els algoritmes de dobles diferències, va permetre millorar considerablement, tant en superfície com en fondària, la resolució de les zones epicentrals de les crisis sísmiques d'Aralar i Itoiz (veure capítols 5 i 6).