

**Gestió d'una xarxa sísmica en temps real
localitzada al Pirineu Oriental (La
Cerdanya): relocalització hipocentral del període
desembre 2019 - juny 2020 i anàlisis sismotectònic.**

Autora: Ariadna Canari Bordoy

Tutor: Dr. Mario Ruíz

Cotutora: Dra. María Ortuño

Màster de Recursos Minerals i Riscos Geològics
Especialitat: Riscos Geològics

Setembre 2020



Abstract. Seismicity in the Eastern Pyrenees has shown moderate and diffuse over time. Although, there is evidence of catastrophic historical earthquakes and some of the events in the last decade that have caused considerable damage. This work shows the feasibility to obtain seismic data of best quality in the temporary seismic network installed on Cerdanya Neogene basin. The network has recorded local events that are added to the permanent seismic networks of the ICGC, IGN and RéNaSS distributed region, for the period between December of 2019 and June 2020. Seismic data processing has been performed using the Seiscomp3 seismological software package. A cortical velocity model has been created to improve the accuracy of the location, adjusted to the geology of the Cerdanya basin and the region around it. The catalogue contains 641 seismic events and 251 quarry blasts. The results of the study show that the locations of earthquakes have higher resolution (with vertical errors as low 1 km) in the Cerdanya when including the temporary network as a result of a denser network in this area. Also, it shows that seismicity of Eastern Pyrenees is concentrated in the north and easternmore areas. The recorded data has allowed to discuss the seismotectonic of the Cerdanya, Selva and Fenollet areas, where 202, 158 and 54 earthquakes have been identified, respectively. The hypocentres are distributed in depth from to surface to a maximum of 16 km. In particular, two areas show lineaments that could be related to individual structures: At Meranges (Cerdanya), the events could be grouped in two to three fault planes (dipping NW and SE) perpendicular to Cerdanya fault. In Santa Coloma, (Selva), the network has recorded a seismic cluster (main event 4,2 magnitude) that seems to follow a SE dipping structure. As showed in this study, seismic data in larger periods of time using temporary network could be key for improving the seismotectonic knowledge in some target seismic regions, benefiting the seismic hazard evaluation.

Keywords: Seismicity, temporary seismic network, Eastern Pyrenees, Cerdanya Neogene basin.

1. INTRODUCCIÓ

L'interès d'aquest treball rau en la voluntat d'estudiar l'activitat sísmica als Pirineu Orientals, densificant les xarxes de monitoratge ja existents a la regió. Actualment, la zona està coberta per 3 xarxes permanents de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC, 2000), del *Instituto Geográfico Nacional* (IGN, 1999) i del *Réseau National de Surveillance Sismique* (RESIF, 1995). Un bon registre sísmic contribueix a l'estudi de la tectònica. La incorporació de les senyals sísmiques de les estacions SANIMS permet localitzar amb més precisió els events locals ocorreguts dins de la zona d'estudi i associar-los amb més fiabilitat a les estructures.

La Cerdanya ha estat en moltes ocasions objecte d'estudis de microzonació sísmica degut als efectes locals presents a la conca i la documentació històrica de terratrèmols propers d'alta magnitud (Tapia, 2006; Tapia et al., 2007; Macau, 2008). Com que no es pot preveure l'ocurrència d'un terratrèmol, la millor manera de mitigar els seus efectes és incidint en estudis que permetin tenir un registre complet de la sismicitat i estructures presents. En aquest estudi es proporcionen noves dades de sismicitat que permeten complementar dades d'estudis anteriors, contribuint també a futurs projectes.

La finalitat de la memòria és l'estudi de la sismicitat als Pirineus Orientals, centrat a la vall de la Cerdanya. La recerca s'emmarca dins del Projecte de pla Nacional SANIMS de Geociències Barcelona del CSIC (GEO3BCN-CSIC). Aquest projecte pretén obtenir una caracterització d'estructures poc profundes i una imatge sísmica mitjançant soroll ambiental a partir d'una xarxa sísmica temporal. Dins el projecte s'han instal·lat estacions sísmiques a l'àrea de la conca neògena de la Cerdanya on es focalitza el treball de final de màster (Figura 1).

Els objectius de la recerca són: en primer lloc, obtenir un catàleg sísmic durant el període comprès entre el desembre del 2019 i el juny del 2020, a partir de la localització hipocentral dels events ocorreguts a la zona emprant les dades de totes les xarxes sísmiques presents i, en segon lloc, analitzar la sismotectònica dels Pirineus Orientals a nivell regional i local d'aquelles àrees que resultin d'interès per a la interpretació.

2. MARC GENERAL

2.1. Xarxes de monitoratge sísmic a la zona d'estudi

La zona d'estudi està situada al NE de la Península Ibèrica (Figura 1). La localització dels sismes locals ocorreguts dins la zona d'estudi s'ha realitzat emprant les dades d'algunes estacions de les xarxes permanents presents al territori i de la xarxa temporal del Projecte SANIMS. La xarxa sísmica temporal compta amb un total de 30 estacions, 23 als Pirineus Orientals i 7 esteses per l'àrea metropolitana de Barcelona (Figura 1).

De les estacions situades als Pirineus, 12 estan instal·lades dins de la conca de la Cerdanya i 11 desplegadas al voltant de la conca a fi de millorar la cobertura azimutal de la zona d'estudi. Les estacions instal·lades dins la conca es situen a distàncies d'entre 4 - 6 km i les de fora de la conca entre 20 - 30 km aproximadament. Això proporciona una geometria que permet localitzar de manera acurada els events dins i al voltant de la xarxa. Pel que fa les estacions sísmiques permanents s'han emprat el total de 43 estacions de la xarxa catalana de l'ICGC, de les agències espanyola de l'IGN i francesa de RéNaSS s'han emprat 15 i 16 estacions que es situen dins de la zona d'estudi. De totes elles es reben les dades en temps real.

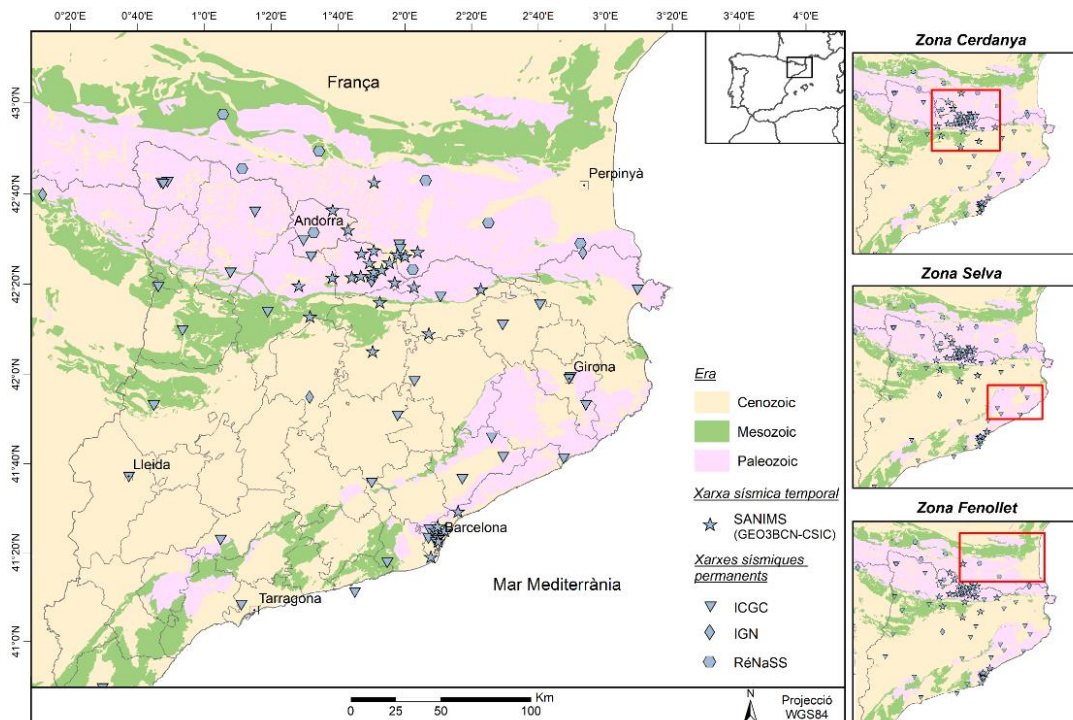


Figura 1. Mapa de la situació geogràfica de les estacions sísmiques permanents i les estacions sísmiques temporals de l'àrea d'estudi a nivell regional. A la dreta, la situació de les zones d'anàlisi locals (Mapa derivat mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i 1:50.000 de BRGM, 2020).

2.2. Context geodinàmic

L'àrea d'estudi es situa al nord-est de la Península Ibèrica, més concretament a la zona oriental dels Pirineus. Els Pirineus són un orogen resultat de la convergència entre la placa tectònica Ibèrica i l'Euroasiàtica durant el Mesozoic i Cenozoic (Choukroune, 1989; Muñoz, 1992). La

seva formació és conseqüència de la superposició de l'orogènesi herciniana i alpina, separades per un llarg període extensional durant el Mesozoic que va donar lloc a l'obertura del Golf de Biscaia. Posteriorment, han estat afectats per processos extensius neògens (obertura del rift centre-europeu) (Vergés, 1994; Teixell, 1996). La serralada en sentit estricte té 80 km d'amplada i una llargada de 450 km en direcció est-oest fins el Golf de Biscaia, mentre que l'orogen Pirinenc és més extens i continua a l'oest cap el sistema cantàbric i cap a l'est fins la Provença, amb una llargada de 1000 km (Muñoz, 2002). A nivell estructural els Pirineus presenten una doble vergència asimètrica (Puigdefàbregas i Souquet, 1986; Muñoz, 1992; Teixell, 1996; Vergés et al., 2002). Estan constituïts per un basament Paleozoic deformat durant el període de l'orogènesi herciniana, una cobertora pre-orogènica del Triàsic-Cretaci i una altre sintectònica a l'orogènesi Alpina, que inclou materials del Cretaci Superior al Miocè (Puigdefàbregas i Souquet, 1986).

D'est a oest han estat dividits per els Pirineus Orientals, de la Mediterrània fins a l'encavalcament del Segre i els Pirineus Centrals separats per la falla de Pamplona dels Pirineus Occidentals o Basco – Cantàbrics (Figura 2) (Larrasoàña et al., 2003; Muñoz et al., 2018). De nord a sud de l'orogen es distingeixen 5 unitats estructurals: 1) Al nord, la conca d'avantpaís d'Aquitània que es troba lleugerament plegada; 2) la Zona Axial (ZA), formada per un apilament antiforme de làmines de materials paleozoics; 3) la Zona Nord-Pirinenc (ZNP), formada per encavalcaments amb vergència cap al nord de materials cretàcics que es troba en contacte amb la ZA per la Falla Nord-Pirinenc (FNP) de direcció E-W. La FNP es considera el límit entre les plaques Ibèrica i Euroasiàtica (Figura 2); 4) la Zona Sud-Pirinenc (ZSP) constituïda per una sèrie de mantells de corriment amb vergència al sud de materials cretàcics i eocens; i 5) la conca d'avantpaís de l'Ebre, limitant al sud i associada amb el plegament de la ZSP (Séguret, 1972; Choukroune, 1992; Vergés et al., 2002).

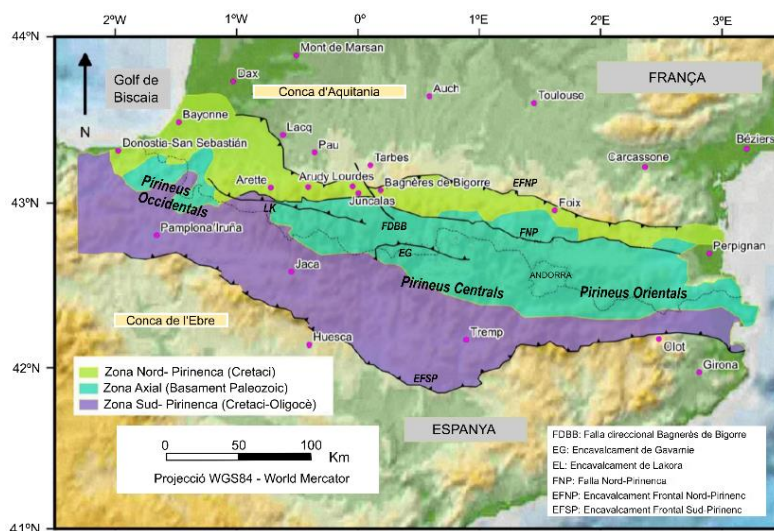


Figura 2. Esquema geològic de les principals unitats estructurals dels Pirineus, entre el Golf de Biscaia i la Mediterrània. S'indiquen les estructures principals i límits de l'orogènesi. Es separen els Pirineus Occidentals o Basco Cantàbrics, els Pirineus Centrals i els Pirineus Orientals (Modificat de Amaro-Mellado i Tien Bui, 2020).

L'activitat sísmica actual s'emmarca en el període neotectònic (post-orogènesi alpina), el qual comença de manera asincrònica a les diferents zones dels Pirineus. A la zona occidental aquest període s'inicia al Oligocè Mig i a l'Oriental al Miocè Mig (Teixell, 1996). Es tracta d'un període extensiu posterior a l'estat compressiu, es relaciona amb una deformació a les Bètiques i amb l'extensió de la part occidental de la Mediterrània amb la formació del Golf de Lió i el marge del Solc de València (Olivet, 1996; Vergés et al., 2002). Al continent es va formar un sistema de conques oligo-miocenes extensives configurades per la direcció de les falles principals: 1) la del Roselló, limitada al nord per la falla del *Têt* (NE-SW) i al sud per la falla *Le Boulou-Montesquieu*; 2) la de l'Empordà, limitada per les falles d'Albanyà i Roses; 3) la de la Selva, limitada per les falles de la Zona de Transferència i 4) la del Vallès-Penedès limitada per les falles Baix Ebre, Alt

i Baix Camp (ENE-WSW) (Roca i Guimerà, 1992; Goula et al., 1999; Olivera et al., 2003; Roca, 1996). La influència d'aquest processos en l'orogen Pirinenc queda reflectida a la ZA amb la formació de grabens quaternaris i neògens com la fossa de la Cerdanya (Cabrera et al., 1988).

La geometria cortical actual als Pirineus està definida per processos complexos d'interacció entre les plaques. Els estudis de sísmica de gran angle realitzats a finals de la dècada dels 70 posen de manifest variacions laterals del gruix cortical de l'escorça a tota la serralada, evidenciant en direcció E-O un engruiximent cortical al sector central dels Pirineus i un aprimament als extrems. En direcció N-S, els perfils mostren un salt del Moho d'uns 10-15 km entre la ZA i la ZNP, que fa passar l'engruiximent de 40-45 km a la ZA a 30 km a la ZNP (Daignières et al., 1981; Gallart et al., 1981). Als Pirineus Orientals, imatges obtingudes de la topografia del Moho a partir de tècniques de funció receptora mitjançant telesismes, han assenyalat amb un perfil E-O un Moho aprimant-se a 40 km de profunditat al oest i fins a una profunditat de 20 km al extrem est cap el Cap de Creus. El perfil N-S, mostra un Moho a 35 - 40 km de profunditat disminuint cap al nord fins a 30 km de profunditat (Diaz et al., 2018).

En trets generals, el règim d'esforços dels Pirineus és compressiu en direcció NO-SE, resultat de la convergència de les plaques Africana i Euroasiàtica i l'extensió E-W de la dorsal Atlàntica (Herraiz et al., 2000; Goula et al., 1999; Souriau et al., 2001; Rigo et al., 2015). Tanmateix, tal com proposa l'anàlisi dels mecanismes focals en diversos estudis, en l'actualitat les estructures preexistents als Pirineus experimenten un règim extensiu a les parts occidental i central, i un de transformant a l'oriental (Stich et al., 2010; Chevrot et al., 2011; De Vicente et al., 2008). Les dades obtingudes de mecanismes focals resulten heterogènies i insuficients degut a que són basades en terratrèmols de baixa magnitud, de manera que ara per ara el càlcul del camp d'esforços regional presenta controvèrsies.

2.3. Context neotectònic i falles actives

Actualment, l'activitat sísmica als Pirineus és moderada i coherent amb una activitat tectònica recent derivada de mesures de deformació amb GPS i deformacions en estructures quaternàries (Ortuño, 2008). Al conjunt dels Pirineus s'han cartografiat un total de 33 falles actives, algunes encara en debat (Lacan i Ortuño, 2012). Als Pirineus Orientals hi ha 5 falles considerades actives: la falla Têt-Cerdanya, la falla Têt Nord, la del Tech, la falla de l'Empordà i la Falla Nord-Pirinenc (Pauchet et al., 1999; Briaies et al., 1990; Fleta et al., 1996; Goula et al., 1999; Calvet, 1999). Als Pirineus Centrals es considera activa la falla nord de la Maladeta (Ortuño, 2008).

La neotectònica dels Pirineus encara comporta diferents aspectes de discussió. La caracterització actual de les falles actives resulta insuficient. Per aquest motiu, *Instituto Geológico y Minero de España* (IGME) ha creat el repositori oficial d'informació anomenat *Quaternary Faults Database of Iberia* (QAFI) on es compilen falles cartografiades en diferents estudis que afecten materials quaternaris i han tingut activitat sísmica en els últims 2,59 Ma. Cal esmentar que no és tracta d'una base de falles actives completa, sinó d'una compilació bibliogràfica de les estructures estudiades fins el moment (Annex 4.1) (García-Mayordomo et al., 2012; IGME, 2015).

2.4. La sismicitat als Pirineus Orientals

La sismicitat als Pirineus es concentra a la zona axial i occidental de l'orogen. L'àrea oriental presenta una sismicitat més moderada i difusa (Olivera et al., 1986). Malgrat tot, es té constància de sismes històrics destructors durant el període de l'edat mitjana com el sisme de la zona de la Ribagorça l'any 1373 i la crisi sísmica compresa entre el 1427 i el 1428 (Olivera et al., 1994, 1999). També, durant el segle XX, han tingut lloc sismes de magnitud alta com el de 1923 a la Vall d'Aran i el sisme d'*Arette* l'any 1967 (Olivera et al., 2006). Recentment, s'han registrat

alguns terratrèmols de magnitud moderada que han produït danys considerables degut al augment de la població i les activitats econòmiques. Alguns d'ells són: els terratrèmols de *Saint Paul de Fenouillet* ($M=5,2$) al febrer de 1996, el sisme de *Hautes Pyrénées* ($M=4,7$) el maig del 2002 i al Ripollès ($M=4,0$) el setembre de 2004 (Tapia et al., 2006; Rigo et al., 2015). La majoria dels sismes als Pirineus presenten el seu hipocentre als primers 20 km de profunditat (Olivera i Fleta, 1996; Olivera et al., 2003).

3. METODOLOGIA

Per assolir els objectius d'aquest estudi, el flux de treball s'ha dividit en l'adquisició i tractament en temps real de les dades sísmiques mitjançant el programari Seiscomp3 (GFZ i Gempa, 2008) i de manera sincrònica s'ha consultat la literatura relacionada per a construir el model de velocitats necessari per a la localització dels sismes. L'última part del flux de treball ha consistit en una interpretació sismotectònica dels events detectats, amb especial èmfasi en les zones on han tingut lloc eixams d'events o sèries sísmiques en torn a events de major magnitud. La tècnica principal ha estat la projecció dels sismes en fondària segons diferents direccions perpendiculars (o no) a les estructures prèviament identificades i relacionar-los amb la bibliografia. L'anàlisi s'ha centrat en la zona de la Cerdanya, així com a Fenollet i la Selva. Aquesta última s'ha afegit com a àrea d'estudi per l'activitat sísmica presentada durant el període d'enregistrament (Figura 1).

3.1. Adquisició de les dades sísmiques

Les dades sísmiques enregistrades per la xarxa temporal SANIMS, i les 3 xarxes sísmiques permanents arreu del territori, han estat rebudes en temps real a l'Institut de Geociències Barcelona (GEO3BCN-CSIC) mitjançant el programari Seiscomp3 (GFZ i Gempa, 2008).

3.1.1. Descripció de les estacions sísmiques SANIMS

La xarxa temporal SANIMS està formada per sismòmetres de banda-ampla enviant dades en temps real via mòdem GPRS. El sensor utilitzat és *Trillium 120P* de l'empresa Nanometrics i l'estació, que funciona com a sistema de digitalització, enregistrament i enviament de dades, és del tipus *Taurus* de Nanometrics (Figura 3). Sempre que és possible, aquests sensors s'instal·len en espais aïllats, de manera que registrin el mínim soroll antropogènic possible.



Figura 3. Instruments emprats per el projecte. A) Sensor *Trillium 120P* de Nanometrics, B) Estació *Taurus* de Nanometrics i C) exemple d'instal·lació típica realitzada en locals municipals o de particulars tancats com magatzems, ermites o cementiris.

3.2. Tractament de les dades

3.2.1. Paquet de programari: Seiscomp3

Pel tractament de les dades de les estacions sísmiques en temps real s'ha fet ús del programari Seiscomp3. Aquest és un paquet sismològic d'adquisició, processament, distribució i anàlisi interactiva de dades sísmiques. Inclou elements de control de qualitat en la recepció de dades, detecció, localització d'events, distribució i generació d'alertes sísmiques. La primera versió va ser desenvolupada pel programa GEOFON de l'Institut Helmholtz de Potsdam i el Centre de Recerca Alemany de Geociències (*German Research Centre for Geosciences*). Posteriorment el Seiscomp3 va ser liderat i desenvolupat per Gempa GmbH (GFZ i Gempa, 2008).

El programari funciona a partir de mòduls i interfícies gràfiques que interaccionen mitjançant una base de dades. Els principals mòduls que el componen són: 1) sistema de recepció, emmagatzematge i redistribució de les dades sísmiques, 2) sistema de processament de les dades

en temps real (inclou determinació de primeres arribades d'un event, associació de fases sísmiques, localització, càlcul de magnitud, etc.) i 3) sistema de control i qualitat de la recepció de dades sísmiques. Les interfícies gràfiques permeten la visualització de les traces dels events sísmics, mapes de visualització de la localització dels sismes, revisió de les primeres arribades dels events de manera manual i finalment, el control de l'estat de la xarxa sísmica (GFZ i Gempa, 2008).

3.2.2. Processat

Pel treball s'han analitzat amb detall i catalogat els sismes locals ocorreguts dins de la zona d'estudi amb distàncies inferiors a 150-200 km, tot i que durant l'adquisició de dades també s'han registrat, distingit i catalogat aquells sismes regionals, telesismes i d'altres events de tipus antropogènic.

Recepció automàtica i primer processat de dades

El Seiscomp3 rep en temps real les dades en brut emprant el protocol seedlink. Aquestes són emmagatzemades en format mssed i tractades de manera automàtica mitjançant diferents mòduls que interactuen entre ells i amb una base de dades MySQL. Un dels mòduls de processament identifica de manera automàtica les primeres arribades d'ones P i S, que considera que corresponen a un terratrèmol. Seguidament, un altre mòdul procedeix a associar les primeres arribades per identificar un event i si ho aconsegueix, el mòdul encarregat de la localització obté una solució hipocentral automàtica i es genera una alerta sísmica. L'alerta avisa al usuari del possible sisme i s'inicia el tractament manual de les dades on es refinen els temps d'arribada de les ones sísmiques P i S i se'ls assigna un pes relacionat amb la seva qualitat.

En alguns casos, el sistema automàtic del Seiscomp3 pot no interpretar i associar de manera correcta les senyals sísmiques, generant falses alertes o perdent events petits per als que no té suficients fases automàtiques. En el cas de les explosions controlades de cantera, són tractades pel sistema automàtic del Seiscomp3 com un event sísmic, per consegüent durant el procés manual són diferenciades i catalogades com voladures, excloent-les del catàleg final.

Tractament manual de les dades

L'objectiu del processat manual de dades és millorar la precisió de les lectures de les primeres arribades P i S i afegir aquelles fases sísmiques d'estacions que el sistema no ha estat capaç d'analitzar automàticament. L'anàlisi manual es porta a terme en la interfície gràfica del paquet de Seiscomp3 que permet la visualització de les traces sísmiques.

Les dades en brut són filtrades a diferents freqüències que permeten la interpretació de les arribades de manera adequada segons el tipus de sismes i la fase que es pretén identificar. En aquest treball es volen identificar principalment sismes locals, per tant, la majoria de les dades són tractades amb un filtratge de freqüència alt, d'entre 3-15 Hz.

El tipus de senyal sísmica és indicativa de quin tipus d'event s'està tractant, d'aquesta manera es poden distingir també deteccions associades a terratrèmols locals, regionals i telesismes, explosions controlades de canteres i sorolls ambientals, com trons, que s'han diferenciat adequadament al catàleg.

Els events antròpics com les voladures de cantera, s'han diferenciat dels sismes per la seva forma d'ona, principalment presentant freqüències més baixes que els sismes locals i unes ones superficials característiques degudes a la poca fondària a la que es produeix l'explosió en comparació amb un event sísmic. La franja horària, habitualment a migdia o a primera hora de la tarda, i la seva localització, han estat factors importants per a la seva distinció, permetent identificar-les com a tals en el catàleg. L'obtenció de les coordenades de les explosions just en

una cantera activa permeten confirmar que la localització hipocentral és correcta i, per tant, els paràmetres emprats en la inversió junt amb el model de velocitats són adients. Això permet confiar en la qualitat i fiabilitat de les relocalitzacions dels sismes.

Durant el procés de refinat de les lectures es revisen i es piquen (si fos necessari) de nou les arribades d'ones P i S de cada fase sísmica assignant un pes que depèn de la relació entre la senyal i el soroll. Aquest pes fa referència a la qualitat de lectura indicant al Seiscomp3 quines de les arribades s'han de considerar més fiables i quines menys. D'aquesta manera, es determina quines lectures tindran més importància en la determinació hipocentral. Els pesos es representen amb un rang d'incertesa temporal de l'arribada de l'ona i s'expressen entre 0 i 4, sent 0 el pes de major qualitat i 4 el de menor. Durant el tractament de les dades s'ha estudiat quins són els rangs d'incertesa temporal que s'ajusten de la manera més acurada possible a les lectures dels events locals de la zona. Dins del programari Seiscomp3 els pesos s'adjudiquen a les lectures en la interfície gràfica de visualització de les senyals amb una franja verda, que mostra de manera visual el rang d'incertesa temporal, en segons, de l'arribada (Taula 1, Figura 4).

A fi de completar el catàleg automàtic obtingut pel sistema Seiscomp3, s'ha intentat incloure els events dels catàlegs permanents exceptuant aquells que es localitzen fora de la zona d'estudi o bé aquells que han estat registrats ens els catàlegs més tard al ser re-analitzats per les agències.

| Incetesa (segons) | Pes |
|-------------------|-----|
| +/- 0,05 s | 0 |
| +/- 0,1 s | 1 |
| +/- 0,2 s | 2 |
| +/- 0,5 s | 3 |
| +/- 1 s | 4 |

Taula 1. Taula dels valors d'incerteses i la seva relació en pesos o qualitat creada per a l'elaboració del treball.

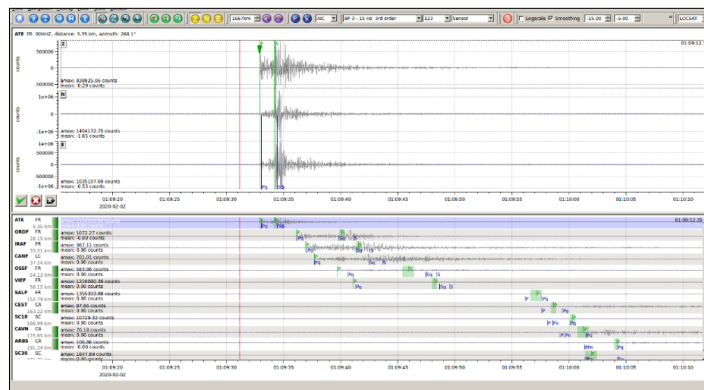


Figura 4. La visualització de les senyals sísmiques on s'identifiquen les arribades d'ona i s'indica la qualitat de l'arribada. Les franges de color verd que s'observen al voltant de les arribades indiquen la incertesa de l'anàlisi.

3.3. Localització hipocentral

3.3.1. Model de velocitats de la Cerdanya

Per a la localització dels hipocentres dels sismes és necessari establir un model cortical de velocitats. L'algorisme d'inversió que calcula la localització necessita establir paràmetres de velocitat de desplaçament de les ones sísmiques a través de les capes de l'escorça. L'elecció d'un model que sigui representatiu de les característiques de l'escorça a l'àrea d'estudi és essencial per obtenir una localització amb la màxima precisió. S'ha dissenyat un model propi pel treball amb l'objectiu d'analitzar els sismes locals que té en compte les principals característiques de la regió. El model de velocitats utilitzat (Taula 2) s'ha obtingut compilant dades bibliogràfiques. S'han considerat bàsicament els perfils sísmics al llarg dels Pirineus (Gallart et al., 1981), profunditats Moho derivades d'estudis d'RF (Diaz et al., 2016) i resultats d'estudis de perfils de gran angle del projecte Pyrope al Pirineu Oriental (Diaz et al., 2018; Antonio-Vigil et al., 2019). El model cortical s'ha dividit en 5 capes, la primera

| Profunditat Z (km) | V_p (km/s) |
|--------------------|--------------|
| 0,0 | 5,5 |
| 4,0 | 6,1 |
| 12,0 | 6,3 |
| 28,0 | 6,7 |
| 42,0 | 8,0 |

Taula 2. Model cortical de la Cerdanya utilitzat en la inversió hipocentral.

correspon als sediments de la conca amb una potència de 4 km i velocitat de 5,5 km/s. L'escorça superior i mitja amb potències de 8 i 16 km respectivament, presenten velocitats de 6,1 i 6,3 km/s. L'escorça inferior de 14 km de potència presenta velocitats de 6,7 km/s fins als 42 km on l'inici del mantell amb la discontinuïtat de Moho augmenta la velocitat a 8,0 km/s (Taula 2).

3.3.2. Inversió hipocentral

Finalitzat l'anàlisi de les traces i els temps d'arribada es procedeix a la relocalització hipocentral del sisme. El paquet Seiscomp3 disposa de diferents algorismes de localització però, per raons històriques, l'algorisme principal està focalitzat a la localització de telesismes. La relocalització dels events locals objecte d'estudi s'ha dut a terme emprant l'algorisme d'inversió hipocentral Hypo71 (Lee i Lahr, 1975), integrat al programari. L'Hypo71 és aplicat junt amb el model de velocitats cortical de la Cerdanya descrit anteriorment. El Seiscomp3 presenta una interfície gràfica (Figura 5) on un cop realitzada la relocalització, permet comprovar gràficament el residu (en segons) en funció de la distància (en quilòmetres) i una altre gràfica del temps de propagació d'ona (en segons) en funció de la distància (en quilòmetres). En aquesta mateixa pantalla de visualització també apareix un mapa amb la localització de l'event i una taula amb les distàncies epicentrals, temps de propagació d'ona teòric i real, residus i pes de cada fase a cada una de les estacions. Tant la taula com els gràfics permeten avaluar la solució hipocentral obtinguda i decidir si cal esmenar o millorar alguna de les lectures.

La relocalització hipocentral permet obtenir el temps d'origen de l'event, les coordenades geogràfiques en projecció WGS84 (*World Geodetic System 1984*), la profunditat del hipocentre en quilòmetres i la magnitud. Aquests paràmetres permeten representar posteriorment els terratrèmols en un mapa de sismicitat.

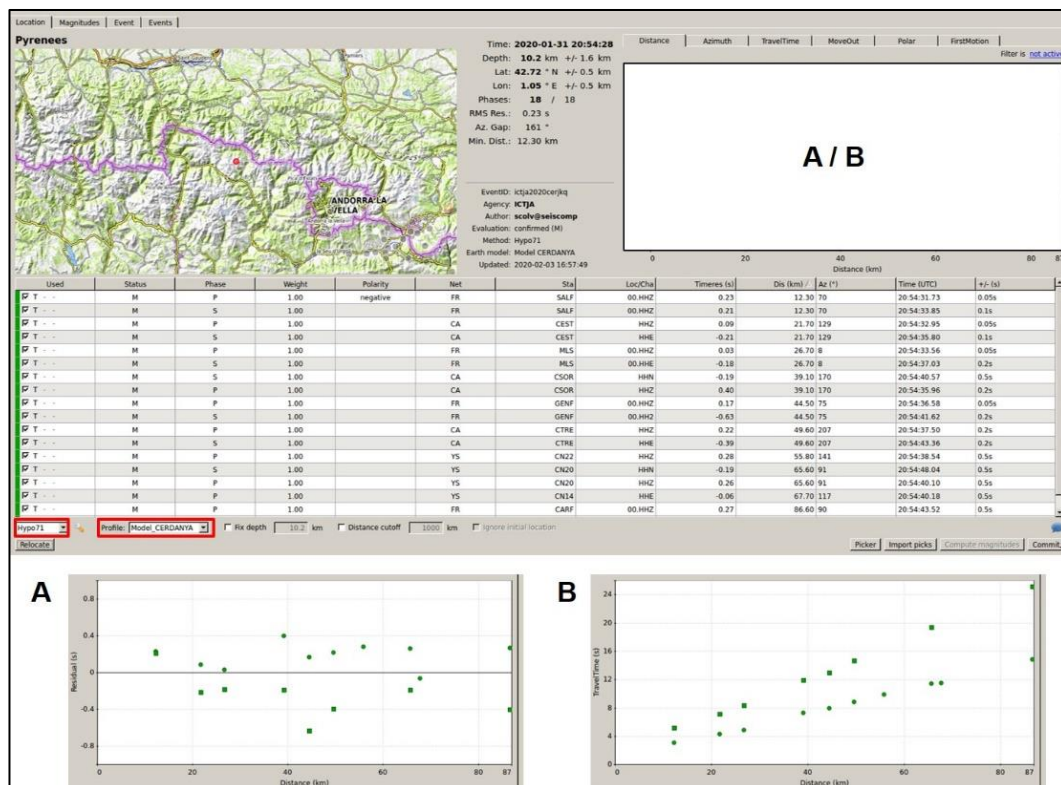


Figura 5. Interfície gràfica de visualització on apareix el mapa de localització del epicentre i a la dreta les coordenades i temps d'origen de la localització obtinguda, a sota del mapa la taula de les fases analitzades amb els seus corresponents paràmetres. El requadre blanc indica l'espai on es disposen dues gràfiques per interpretar les lectures: A) residu (s) en funció de la distància (km) i B) temps de propagació de les ones P i S (s) en funció de la distància (km). En aquestes gràfiques els cercles representen les ones P i els quadrats les S. En vermell s'indiquen l'algorisme d'inversió utilitzat i el model de velocitats cortical.

Càlcul de la Magnitud

La magnitud d'un terratrèmol correspon a l'energia alliberada al focus del sisme. Existeixen diferents metodologies pel càlcul de magnitud. El Seiscomp3 en funció de la distància al epicentre i depenent de si es tracta d'un event local, regional o telesismes es capaç de calcular-ne de diversos tipus (ML, Mlv, Mlh, mb, mB, Mw) i acaba donant un valor mig M. Per a fer-ho utilitza lectures d'amplitud de diferents fases. En el cas dels events locals aquest valor mig correspon gairebé sempre a MLv, és a dir, magnitud local mesurada amb l'amplitud d'ones Lg al canal vertical, equivalent a l'antiga magnitud de Richter (GFZ i Gempa, 2008).

Cal esmentar que els catàlegs de les xarxes permanents utilitzen magnituds locals similars a la calculada per el Seiscomp3 però amb paràmetres d'ajust diferents. De manera que durant l'anàlisi dels catàlegs s'ha de tenir en compte les variacions existents de les diferents magnituds reportades a cada un dels catàlegs. L'ICGC utilitza la magnitud MI (Equació 1) o magnitud local de Richter. Es calcula a partir de la màxima amplitud d'ona simulada de Wood Anderson en els canals horitzontals disponibles i obté una mediana per a cada canal (Batlló et al., 2016). A l'expressió matemàtica de MI el factor A_{P2P} és l'amplitud del pic en mil·límetres i A_0 és una atenuació de les ones sísmiques a partir de la distància epicentral.

$$MI = \log_{10}(A_{P2P} / 2) - \log_{10}(A_0)$$

Equació 1. Expressió matemàtica pel càlcul de la magnitud MI (Richter, 1935; Batlló et al., 2016).

L'IGN fa ús de la magnitud mbLg (L) (Equació 2), determinada a partir de la amplitud de la fase Lg (López, 2008). L'equació ha estat referida a la fórmula de magnitud local de Richter. Ha estat utilitzada per terratrèmols ocorreguts a partir del març del 2002 per l'IGN (Instituto Geográfico Nacional, 2020). A l'expressió matemàtica de mbLg (Equació 2) el factor A és l'amplitud del desplaçament en micres, T el període en segons i R la distància hipocentral en km.

$$mbLg(L) = \log(A/T) + 1,17\log R + 0,0012R + 0,67$$

Equació 2. Expressió matemàtica pel càlcul de magnitud mbLg (L) (Instituto Geográfico Nacional, 2020).

Per últim, RéNaSS utilitza la magnitud local MLv (Réseau National de Surveillance Sismique, 2020). Es tracta d'una adaptació de la magnitud local de Richter (MI) calculada amb la component vertical, com ja s'ha comentat anteriorment.

Anàlisi d'error

El programa Hypo71 permet obtenir una sèrie de paràmetres sísmics que donen una estimació de la fiabilitat de la inversió. El GAP, o cobertura azimuthal, és la distribució azimuthal en graus de les estacions sísmiques entorn al epicentre; els valors menors a 90° representen una millor cobertura i valors superiors a 180° indiquen que tenim 2 quadrants descoberts. El RMS és l'error quadràtic mitjà, derivat de les diferències entre els temps de propagació real i els teòrics, calculats emprant el model de velocitats, tant a les ones P com S. Un menor valor de RMS indica un major ajust a les lectures. Relacionat amb l'hipocentre també calcula l'Erlat i l'Erlong, que són l'error del epicentre en termes de latitud i longitud respectivament. L'Erlong dona lloc a l'ERH o error Horitzontal. Per últim, l'ErZ que correspon a l'error de la profunditat del hipocentre. Tots tres errors són expressats en Km.

Per dur a terme l'anàlisi d'error s'ha fet un conjunt d'histogrames que representen el nombre de sismes en funció del GAP, RMS, ErZ i ErH. Aquests es realitzen pel total de sismes del catàleg (Figura 6) i pels sismes enregistrats a la zona de la conca de la Cerdanya considerada de major fiabilitat degut a la cobertura de la xarxa SANIMS que es concentra en aquella àrea (Figura 7).

4. ANÀLISI I RESULTATS

4.1. Anàlisi d'error

Catàleg SANIMS a la zona general i a l'àrea de la Cerdanya

L'anàlisi es representa amb els següents histogrames (Figura 6 i 7):

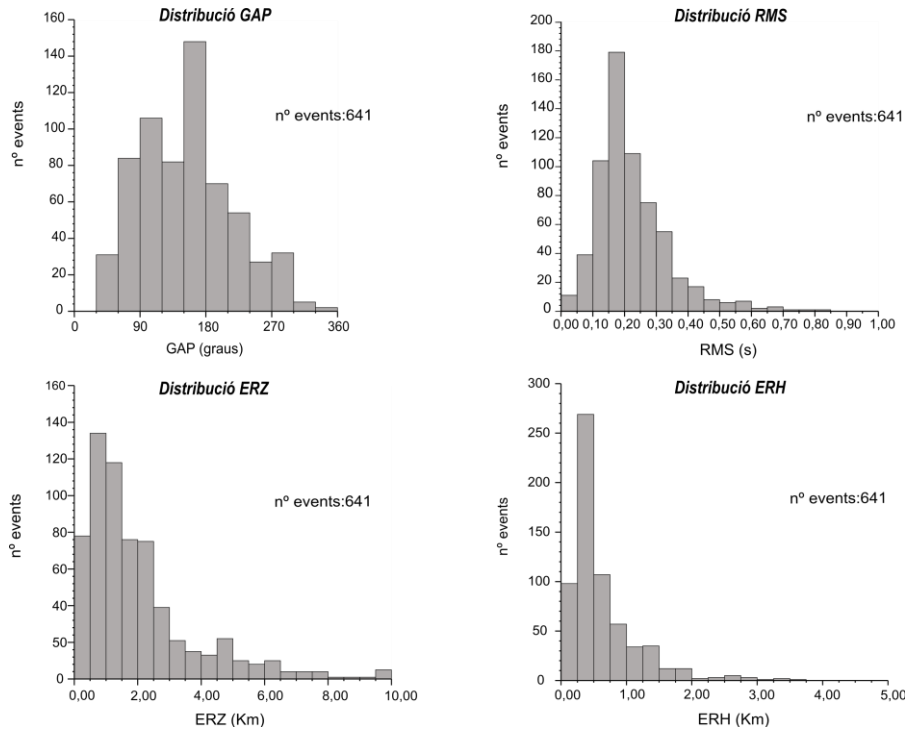


Figura 6. Histogrames d'anàlisi d'error de les determinacions hipocentrals de l'àrea d'estudi. Es mostra el GAP (graus), RMS (segons) i l'error vertical ERZ (km) i horitzontal ERH (km) dels 641 sismes registrats al catàleg SANIMS (desembre 2019-juny 2020).

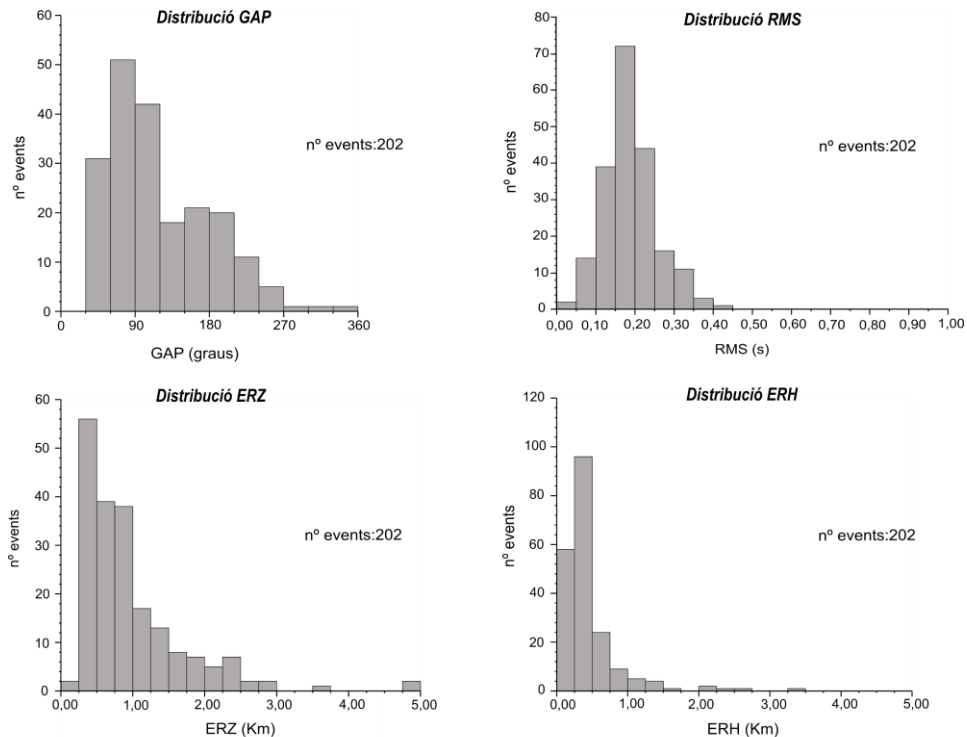


Figura 7. Histogrames d'anàlisi d'error de les determinacions hipocentrals de l'àrea d'estudi de la Cerdanya. Es mostra el GAP (graus), RMS (segons) i l'error vertical ERZ (km) i horitzontal ERH (km) dels 202 sismes registrats al catàleg SANIMS (desembre 2019-juny2020).

El catàleg SANIMS ha registrat un total de 641 terratrèmols a la zona d'estudi. L'anàlisi d'error de les determinacions hipocentrals d'aquests sismes mostra 451 events que tenen un GAP en valors de cobertura azimutal menors a 180° , per tant de bona qualitat. Els 190 events restants amb un GAP major a 180° són considerats menys fiables. La distribució de RMS mostra 517 events per sota dels 0,30 segons i només 124 events tenen un RMS superior a 0,30 segons. Pel que fa l'error vertical (ERZ), 481 events tenen un error en profunditat al hipocentre menor de 2,5 km, 110 events es presenten entre els 2,5 - 5 km i els altres 48 events entre 5 - 10 km d'error en profunditat. 531 events presenten un error horitzontal dels sismes localitzats fins a 1 km i els 110 restants entre 1 - 3,75 km d'error horitzontal al epicentre (Figura 6).

A la zona d'estudi de la Cerdanya s'han registrat 202 sismes. Les localitzacions hipocentrals d'aquests sismes mostren que 163 sismes tenen un GAP menor a 180° i 39 major, sent en el major part dels casos inferior a 200° . La gràfica de RMS presenta 187 events per sota els 0,3 segons i només 15 events per sobre d'aquest valor; 180 events tenen un error vertical (ERZ) de menys de 2 km de profunditat i 22 entre els 2 - 6,5 km. Per últim, 187 sismes tenen un error horitzontal (ERH) d'entre 0 i 1 km, els 15 restants entre 1 - 3,75 km d'error màxim (Figura 7). Els errors de la Cerdanya són menors que els de l'àrea general evidenciant la bona qualitat de les localitzacions hipocentrals degut a la millor cobertura de la xarxa temporal.

Errors xarxa temporal SANIMS respecte les xarxes permanents a la regió de la Cerdanya

Per a comprovar la millora en la localització dels hipocentres de la xarxa SANIMS respecte les xarxes permanents a la regió s'han utilitzat els sismes de l'ICGC per observar les variacions, ja que és la xarxa que té més presència d'estacions a l'àrea. En aquest cas l'anàlisi es realitza amb el càlcul del volum de l'el·lipsoide d'error d'un sisme. Aquest valor s'ha calculat a partir dels paràmetres d'ERZ i ERH del catàleg SANIMS i els paràmetres de Smaj (semieix major de l'el·lipsoide, km) i Smin (semieix menor de l'el·lipsoide, km) del catàleg del ICGC per el sisme de magnitud major i menor de l'àrea. Per comprendre com s'avalua l'error cal comentar que un volum menor de l'el·lipsoide implica un resultat més precís en la localització de l'hipocentre.

Els resultats d'aquests càlculs mostren que s'ha millorat el volum de l'el·lipsoide en el sisme de magnitud petita ($M=0,2$) d'un $71,3 \text{ km}^3$ a la localització de l'ICGC a un volum de $8'14 \text{ km}^3$ al catàleg propi. Pel que fa el sisme de magnitud més alta ($M=2,7$), el volum de l'el·lipsoide varia d'un $1,21 \text{ km}^3$ en la localització del ICGC a un $0,02 \text{ km}^3$ en la SANIMS. En relació al error vertical al hipocentre, en el sisme de magnitud menor ($M=0,2$), les localitzacions disminueixen de 10 km en l'ICGC a 2 km en el catàleg SANIMS. Com també, encara que una disminució més petita que l'anterior, en la localització del hipocentre de magnitud alta ($M=2,7$) varia d'1 km a 0,3 km al incloure la xarxa temporal. A l'Anex1.2 es presenta una taula amb les dades dels sismes utilitzades per aquest anàlisi.

4.2- Anàlisi del catàleg sísmic (desembre 2019-juny 2020)

En el període entre el 15 de desembre del 2019 fins el 19 de juny del 2020 s'han detectat un total de 641 sismes i 251 explosions de cantera. Les dades han estat sintetitzades en un mapa d'events on es representa la situació dels epicentres dels sismes amb la seva corresponent magnitud i la localització de les voladures de cantera (Figura 8). L'anàlisi de la distribució geogràfica dels terratrèmols del catàleg mostra una distribució desigual. Es poden distingir diferents zones on es concentra l'activitat, als Pirineus Orientals s'observa una major activitat sísmica a la zona dels massís de la Maladeta amb magnituds a partir de 1,0 fins a 3,7. A la conca de la Cerdanya i els seus voltants s'observa una sismicitat més difusa; tot i així s'observen eixams d'events sísmics. A la zona de la fossa de la Selva s'ha registrat un event de magnitud 4,2 i les seves rèpliques amb magnituds entre 0,5 i 3,0. A la vessant francesa al nord-est de la zona d'estudi, a l'àrea de Fenollet,

també és pot observar una concentració important de sismes de magnituds diverses, entre 0,5 i 2,4 (Figura 8).

A fi de mostrar la possible millora en la localització epicentral resultat de la instal·lació de la xarxa SANIMS, es presenten els mapes de sismicitat dels catàlegs del ICGC, IGN i RéNaSS (Figura 9) durant el mateix període. Encara que es fa difícil comparar els sismes detectats per les diferents agències degut a que les magnituds usades són diferents, si que es poden comparar el nombre d'events sísmics enregistrats. L'ICGC presenta un total de 659 events sísmics, l'IGN 254 i RéNaSS 269 events (Figura 9). Per tant, la xarxa SANIMS ha permès detectar 387 events sísmics més que el catàleg del IGN i 372 més que el catàleg de RéNaSS.

A l'àrea de la conca de la Cerdanya la xarxa temporal ha permès identificar 202 sismes, en canvi les xarxes permanents tan sols han detectat 176 sismes en el cas de l'ICGC, 64 l'IGN i 69 RéNaSS.

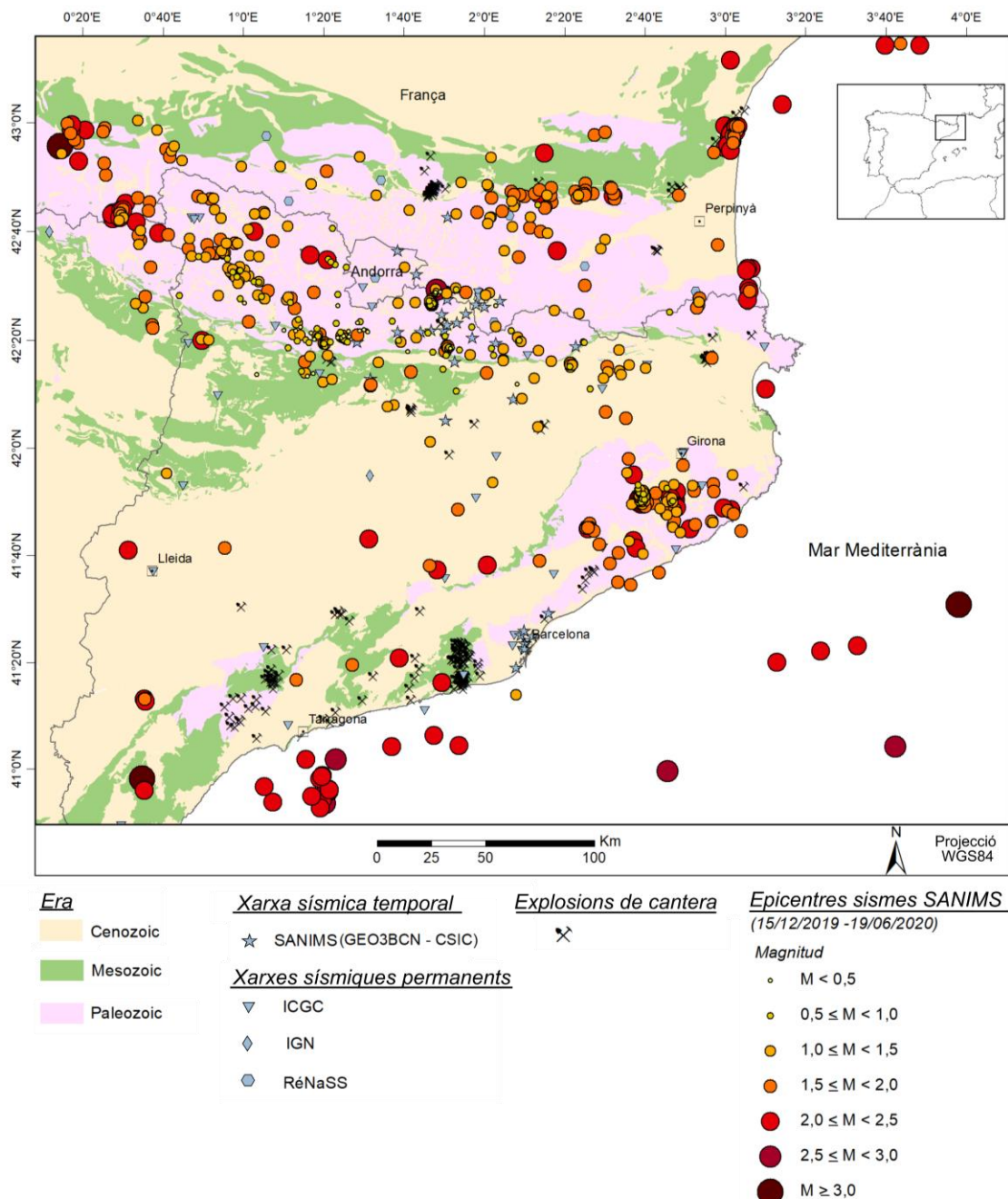


Figura 8. Mapa de la localització epicentral dels sismes i explosions controlades de cantera registrats en el catàleg SANIMS (15/12/2019 -19/06/2020). (Mapes derivats mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i carte géologiques métropolitaine 1:50.000 de BRGM,2020).

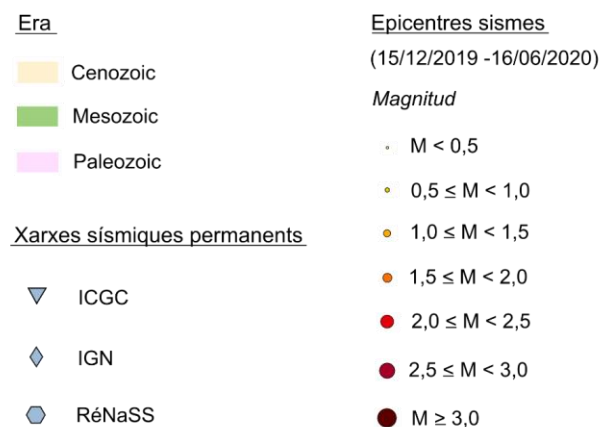
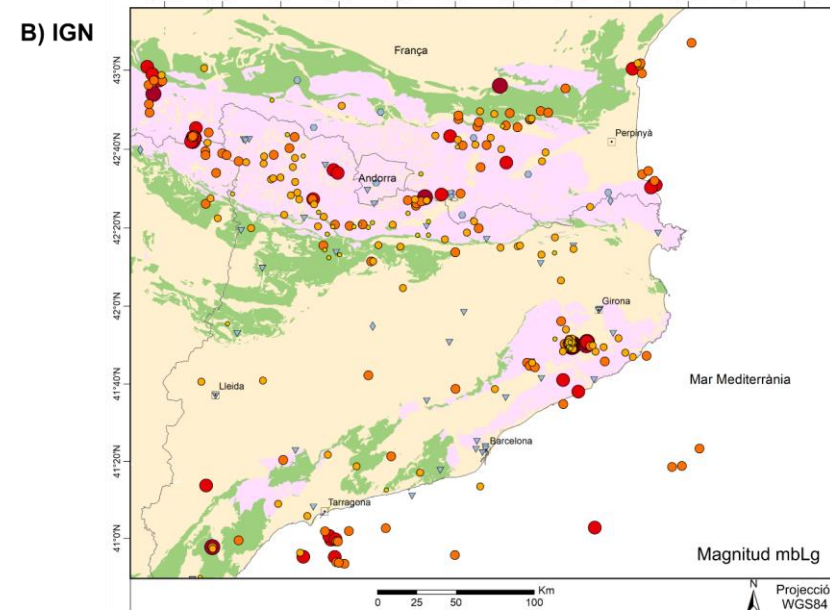
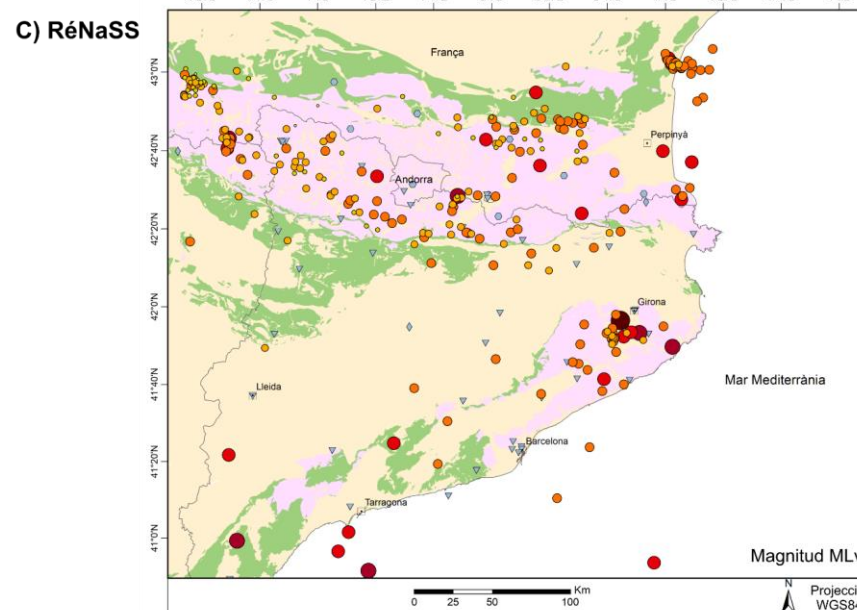
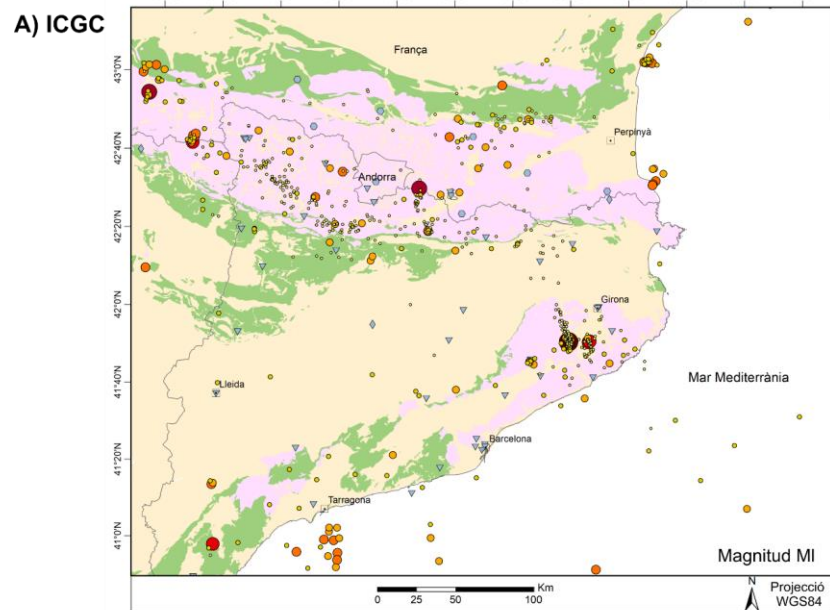


Figura 9. Mapes de sismicitat realitzats amb els catàlegs de les xarxes permanents (15/12/2019-19/06/2020). A) mapa realitzat amb el catàleg del ICGC, magnitud MI B) mapa realitzat amb el catàleg del IGN, magnitud mbLg C) mapa realitzat amb el catàleg de RéNaSS, magnitud MLv (Mapes derivats mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020, i carte géologiques métropolitaine 1:50.000 de BRGM, 2020).

4.3. Anàlisi sismotectònic

En l'anàlisi sismotectònic es descriu la distribució geogràfica dels epicentres i la distribució en profunditat dels hipocentres associant-los a les estructures geològiques reconegudes a cada zona.

4.3.1. Cerdanya

A l'àrea on es concentra la xarxa SANIMS s'han detectat un total de 202 sismes (Figura 10). D'altre banda a l'àrea tectònica de la conca neògena de la Cerdanya i la Seu d'Urgell s'han detectat 124 events i realitzat dos perfils en profunditat que permeten analitzar la distribució en profunditat dels hipocentres (Figura 10). La profunditat màxima dels events és de 13 km i la mínima a nivells molt superficials, 0,5 km. Els eixams més significatius es situen a la zona de Meranges, Bagà, la Seu d'Urgell i Camprodon. Si considerem les falles actives conegudes, l'estructura principal a la zona és la falla de la Cerdanya o Têt (sovint s'anomena Têt només al segment NW). L'activitat sísmica d'aquesta estructura s'associa a falles secundàries que formen part del graben (IGME, 2015; Calvet, 1999; Goula et al., 1999; Lacan i Ortuño, 2012), tot i que l'activitat del sistema durant el plioquaternari encara és en debat. Alguns autors com Briaies et al., (1990) proposen que la deformació és de tipus extensional, en canvi, altres estudis suggereixen la inactivitat d'alguns segments de la falla i/o la seva activitat com a falles direccionals sinestrals (Calvet, 1999; Goula et al., 1999; Herraiz et al., 2000; Nanometrics, 2006; Carozza i Baize, 2004; DelCaillau et al., 2004). Malgrat això, les dades enregistrades no mostren una activitat que es pugui correlacionar directament amb aquest sistema.

La zona de Meranges (zona A, Figura 11) presenta dos eixams situats al SW i NE d'una falla indiferenciada d'orientació NW-SE. En aquesta zona el sisme de magnitud més elevada és de 2,7, situat a l'eixam del NE. En aquesta àrea s'han fet 3 perfils que permeten analitzar la zona en profunditat de manera acurada. En la distribució en profunditat dels hipocentres representada als perfils s'observa un dels eixams localitzat al SW de la traça de la falla indiferenciada de Meranges (classificada com a falla indiferenciada per IGM i BRGM, 2009) amb profunditats entre 7 i 9 km, i un altre al NE entre 3 i 4 km. La secció SW-NE mostra els sismes més agrupats i amb els hipocentres registrats es pot arribar a identificar 3 lineacions, 2 cabussant cap al NE i un altra cabussant cap al SW.

A la conca de la Seu d'Urgell (zona B, Figura 11) s'han enregistrat 3 eixams, un localitzat al mig de la conca i els altres dos al W. En aquest cas, s'han dut a terme dos perfils de distribució dels hipocentres: en primer lloc un en direcció S-N, ortogonal a una falla indiferenciada de direcció E-W i, en segon lloc, un en direcció SE-NW tenint en compte el contacte entre els materials Paleozoics i Cenozoics de la conca. En estudis tectònics preliminars (Turu Michels i Planas Batlle, 2005; Turu i Peña, 2006) s'ha identificat una altra falla, la d'Urgellet, de direcció NE-SW, de moviment normal i que limita la semi-fossa. Els 3 grups d'events es localitzen separats i aparenten formar un lleuger alineament cap el SE. En el perfil de distribució dels hipocentres de direcció SE-NW els events mostren aquest suau alineament cabussant cap el S-SE i arribant a profunditats de fins a 8 km.

L'agrupació de sismes de la zona de Bagà (Zona C, Figura 11) s'ha relacionat amb l'estructura de falla inversa més propera, tot i que els hipocentres no mostren cap alineament que es pugui associar a l'estructura. En el perfil en fondària s'observa un eixam a una profunditat entre 5 i 7 km amb un suau alineament SE-NW. S'interpreta que a la zona hi ha una sèrie de fractures extensives en direcció NE-SW relacionades amb el sistema de la falla de la Cerdanya que causen aquests terratrèmols. A l'àrea de Camprodon (Zona D, Figura 11) es presenten 8 events sísmics formant un eixam al SW de la zona.

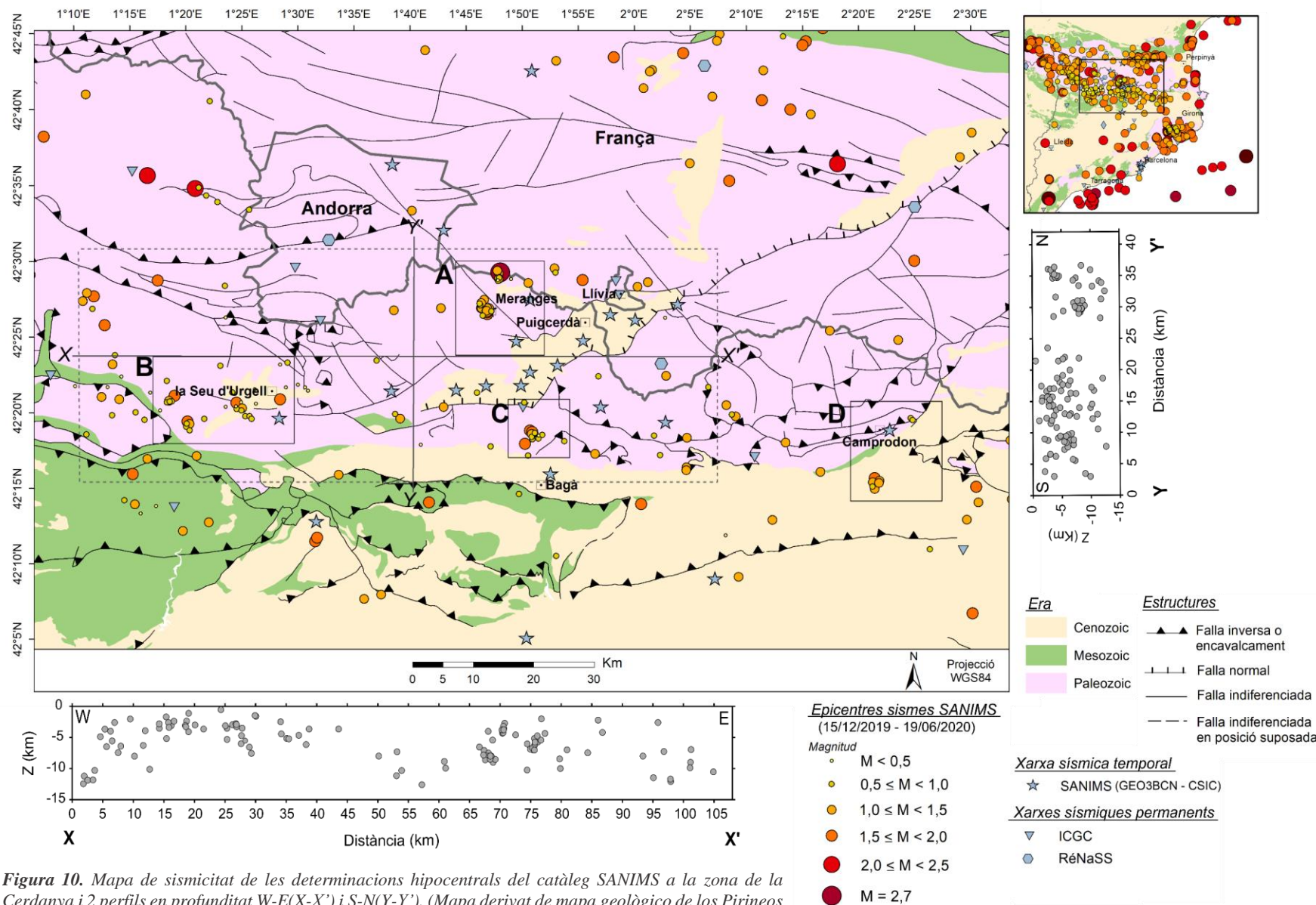


Figura 10. Mapa de sísmicitat de les determinacions hipocentrics del catàleg SANIMS a la zona de la Cerdanya i 2 perfils en profunditat W-E(X-X') i S-N(Y-Y'). (Mapa derivat de mapa geològic de los Pirineos 1:400.000 de l' IGME, 2009 i carte géologiques métropolitaine 1:50.000 de BRGM, 2020).

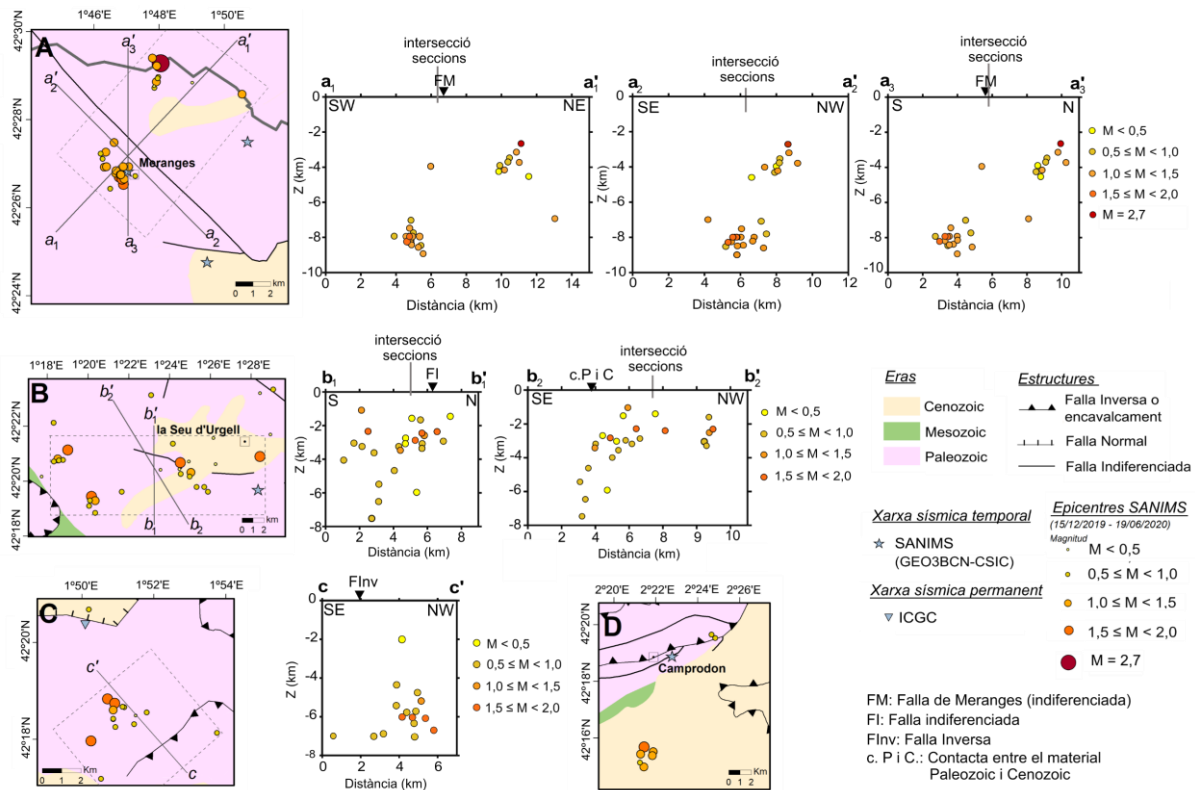


Figura 11. Mapes de sismicitat SANIMS de les zones A,B,C i D de l'àrea de la Cerdanya (Figura 10) amb els seus corresponents perfils en profunditat. El triangle negre indica l'estructura amb la qual interseca la secció. (Mapa derivat de mapa geològic de los Pirineos 1:400.000 de l' IGME, 2009).

4.3.2. La Selva

En el mapa de sismicitat de la zona de la fossa de la Selva es poden veure 158 sismes representats. En aquesta zona s'observen dos grups, un situat a prop de Santa Coloma de Farners (Zona A, Figura 12) i un altre a Caldes de Malavella (Zona B, Figura 12). En els perfils de distribució dels hipocentres en profunditat s'observa que els sismes situats a la zona de major activitat sísmica de l'àrea es distribueixen entre a 0 i 15 km de profunditat (Figura 12).

La zona al voltant de Santa Coloma de Farners (Zona A, Figura 13) mostra un clúster de 113 sismes, els de major fondària es localitzen a 15 km. L'event de major magnitud registrat en el catàleg es situa a 10 km de profunditat i té una magnitud de 4,2. Aquest es va ocasionar el dia 8/5/2020 i va produir 15 rèpliques durant el mateix dia de magnituds entre 0,5 i 2,0. Durant els mesos d'enregistrament aquesta zona a presentat series sísmiques seguides a aquest event major, un total de 97 rèpliques durant les setmanes i mesos posteriors a l'event principal. S'han realitzat tres perfils en profunditat dels hipocentres en diferents direccions per poder detectar correctament qualsevol possible alineament dels sismes que es pugui correlacionar amb les estructures presents. El perfil SE-NW mostra clarament una tendència d'alineament dels terratrèmols amb cabussament cap el SE, mentre que els perfils en profunditat dels sismes en direccions SW-NE i S-N es localitzen més dispersos, sense un alineament aparent. Pel que fa la zona de Caldes de Malavella (zona B, Figura 13) no s'observa cap alineament clar dels sismes. No obstant, els sismes es distribueixen en una agrupació on hi ha dos sismes amb magnituds de 2,6 i 2,8. L'eixam es localitza entre 9 i 11 km de profunditat al NW de la falla normal en posició suposada cartografiada al mapa derivat de l'IGME i BRGM (2009).

El nivell d'activitat sísmica és major en el marge meridional de la depressió de la Selva i es relaciona amb el sistema de falles de direcció NE-SW (Annex 4.3). Segons les dades obtingudes s'interpreta un cabussament de les estructures d'aquest sistema cap al SE.

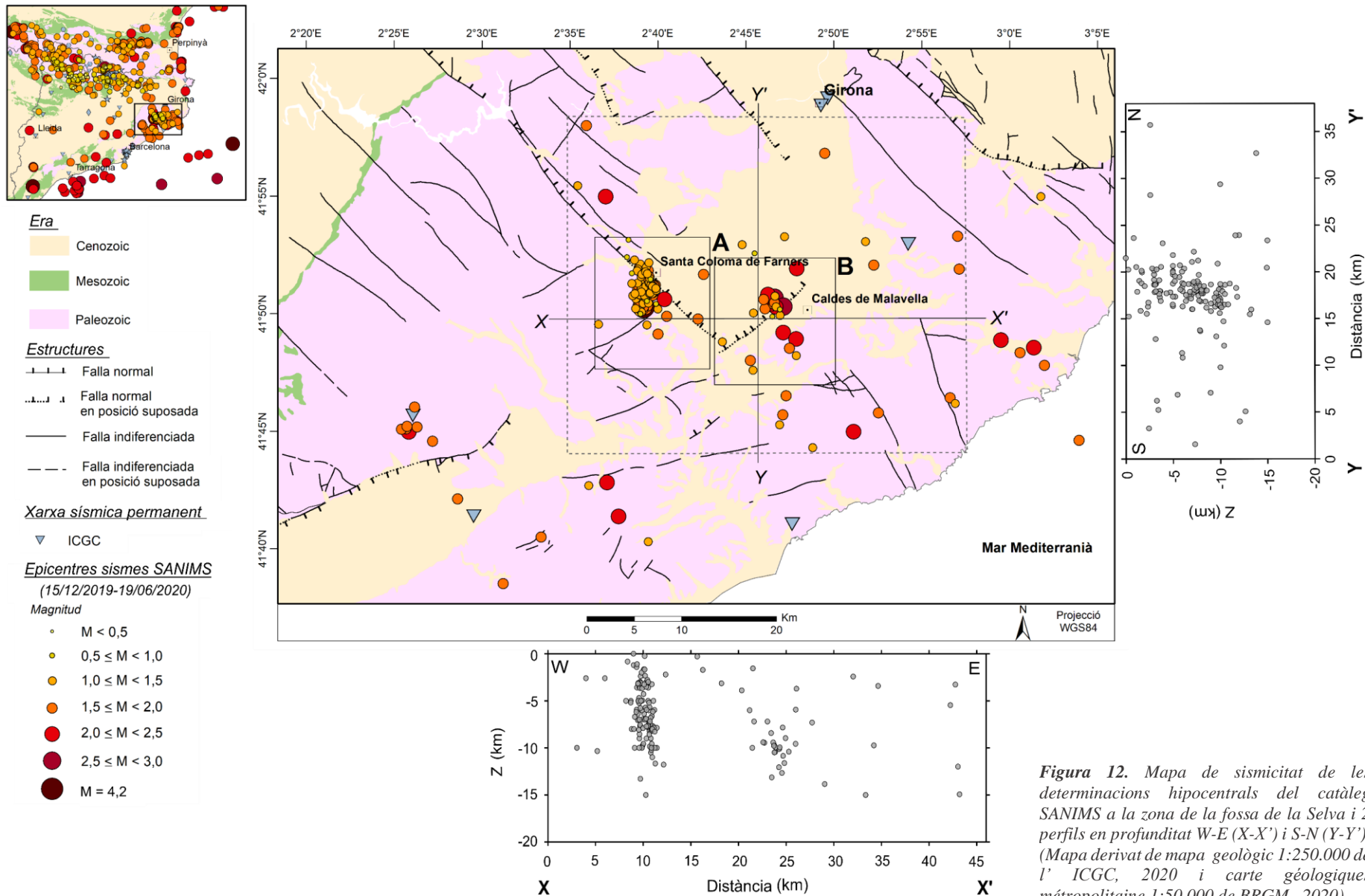


Figura 12. Mapa de sismicitat de les determinacions hipocentrals del catàleg SANIMS a la zona de la fossa de la Selva i 2 perfils en profunditat W-E (X-X') i S-N (Y-Y'). (Mapa derivat de mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i carte géologiques métropolitaine 1:50.000 de BRGM, 2020).

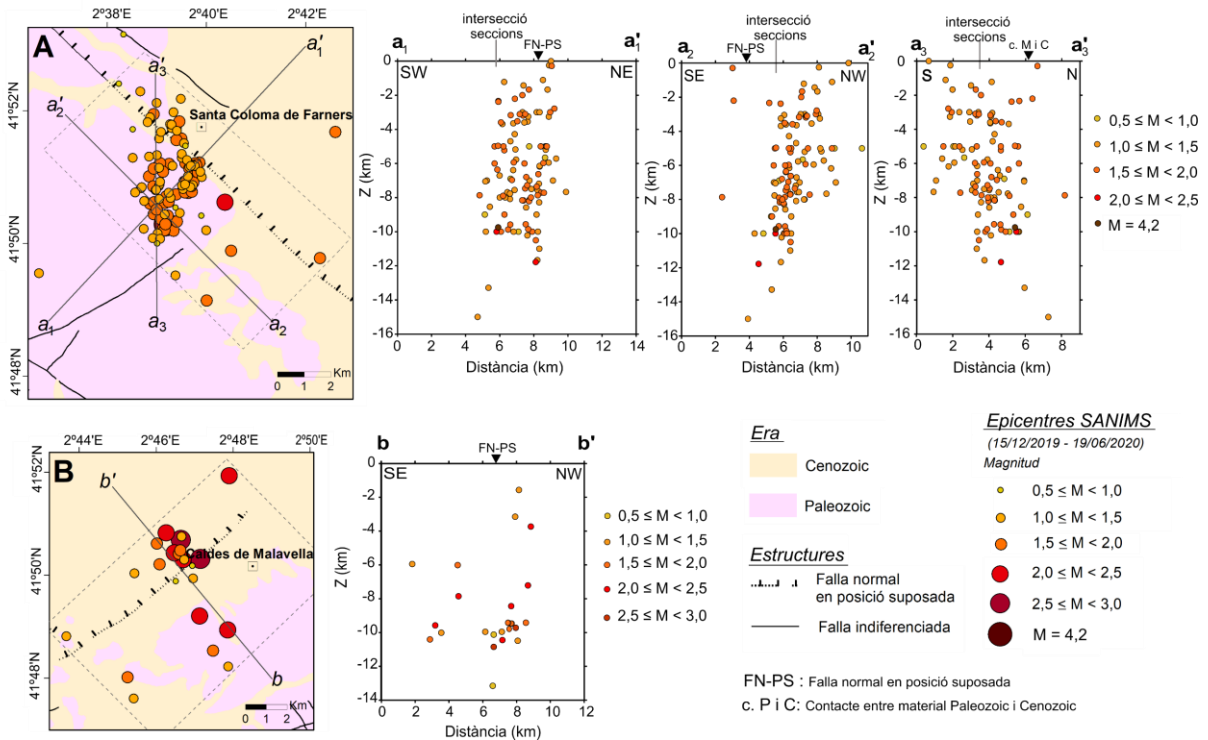


Figura 13. Mapes de sismicitat SANIMS de les zones A i B de la Selva (Figura 12) amb els seus corresponents perfils en profunditat. El triangle negre indica l'estructura amb la qual interseca la secció. (Mapa derivat de mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020).

4.3.3. Fenollet

A la zona de Fenollet, s'han detectat un total de 54 sismes. Aquesta àrea està situada en l'extrem nord de la zona d'estudi on la cobertura azimuthal de la xarxa SANIMS no és òptima. Per aquest motiu, l'agrupació d'events situats al nord de Perpinyà, que es veuen al extrem NE del mapa, no es poden tenir en compte ja que presenten un error de GAP molt elevat, superior a 270° . La comparació de les localitzacions analitzades per la xarxa temporal amb els de la permanent RéNaSS mostren que aquesta agrupació es localitza geogràficament més al nord en el catàleg RéNaSS i amb una alineació dels epicentres cap al SE (Annex 3). Del total de terratrèmols detectats, 54 es situen en la zona d'interès on s'han realitzat dos perfils de distribució dels hipocentres en profunditat, W-E i S-N (Figura 14). Aquests perfils mostren que els hipocentres es situen dispersos i fins a una profunditat màxima de 16 km i una mínima de 0,7 km. Al perfil S-N s'observen acumulacions distribuïdes de manera superficial fins els 8 km, al augmentar la profunditat els sismes es localitzen més dispersos sense agrupacions. Al catàleg s'ha enregistrat un terratrèmol de magnitud 2,4 i de profunditat de 7 km, el major detectat a l'àrea. La complexitat estructural de la zona, constituïda per un sistema imbricat de falles indiferenciades en direcció aproximada E-W, dificulta l'associació dels sismes a una estructura concreta. Tot i així, els sismes es concentren en planta a la zona de la falla.

La zona d'Atsat (zona A, Figura 15) presenta sismes de magnitud majors a 1,0 fins a 2,5; es distribueixen majoritàriament entre 0 i 10 km. Encara que s'han detectat dos sismes a 16 km de profunditat. En el cas de Sant Pau de Fenollet (zona B, Figura 15) els events detectats mostren profunditats de fins a 10 km, i la seva distribució és difusa. Les estructures majors formen part d'un sistema de falles de direcció NE-SW, la falla del Tech i el Têt.

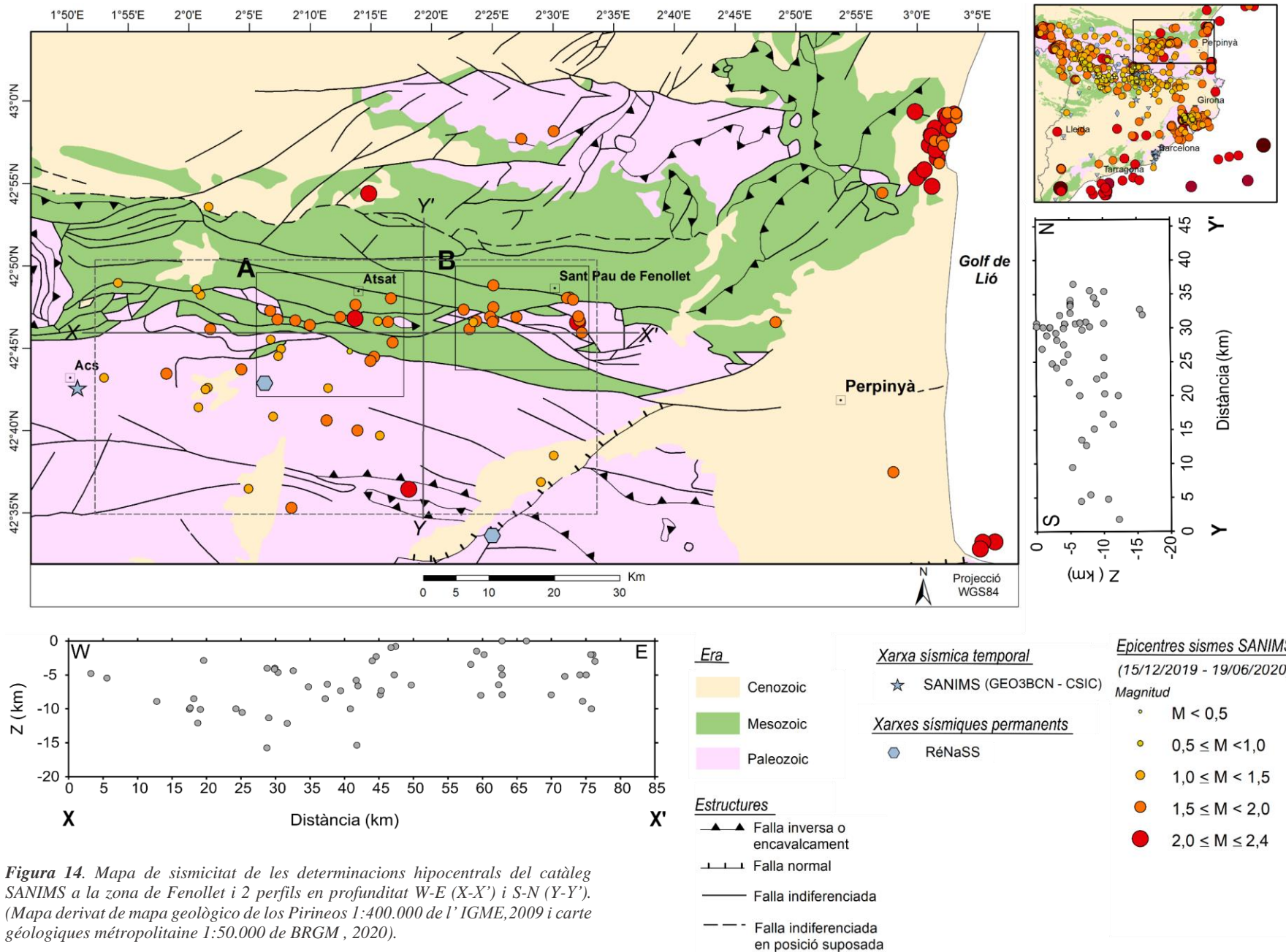


Figura 14. Mapa de sismicitat de les determinacions hipocentrals del catàleg SANIMS a la zona de Fenollet i 2 perfils en profunditat W-E (X-X') i S-N (Y-Y'). (Mapa derivat de mapa geològic de los Pirineos 1:400.000 de l' IGME, 2009 i carte géologiques métropolitaine 1:50.000 de BRGM , 2020).

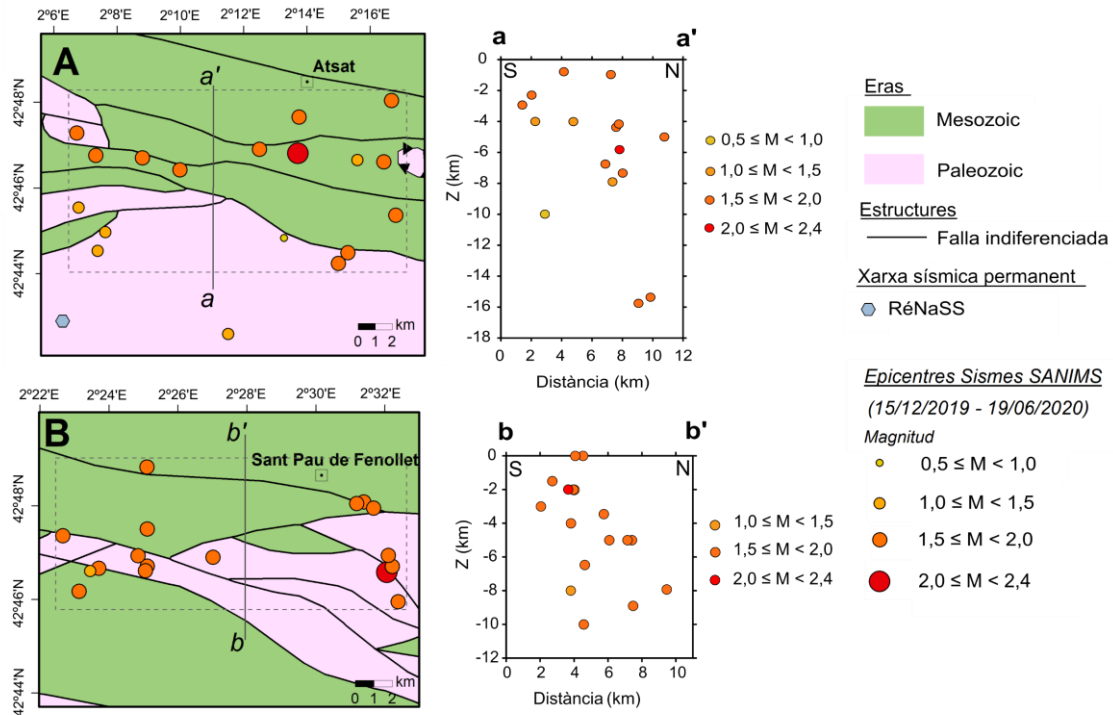


Figura 15. Mapes de sismicitat SANIMS de les zones A i B de Fenollet (Figura 14) amb els seus corresponents perfils en profunditat. (Mapa derivat de mapa geològic de los Pirineos 1:400.000 de l' IGME, 2009).

5. DISCUSSIÓ

5.1. Xarxa temporal SANIMS

La xarxa temporal ha permès millorar la localització dels sismes a l'àrea de la vall de la Cerdanya i als seus voltants. Com era d'esperar no ho ha permès en aquelles àrees fora de la xarxa, on la cobertura azimuthal era elevada, com per exemple, la zona de Fenollet. En aquesta zona les determinacions hipocentrals s'han d'interpretar amb cura degut a les incerteses. En el conjunt de sismes del catàleg propi l'anàlisi d'error mostra resultats fiables amb valors de RMS menors a 0,3; GAP inferior a 180° i error horitzontal i vertical menor a 2 km en la majoria dels events. Les dades mostren que a la conca de la Cerdanya els errors en la localització són menors que a l'àrea d'estudi general degut a la major densitat d'estacions. A tall d'exemple, els sismes detectats a l'àrea general presenten ERH i ERZ de mitjana 0,6 i 2 km, respectivament. En canvi, la mitjana dels errors detectats a l'àrea de la Cerdanya varien entre 0,5 Km en ERH i 1 Km ERZ (Figura 6 i 7). En relació a les comparacions entre els mapes de sismicitat propis i els de la xarxa permanent del ICGC (Annex 1) a la Cerdanya es constata l'augment de la resolució en les localitzacions. Els valors calculats del volum de l'el·lipsoide d'error del hipocentre mostren que aquest ha disminuït un 89% en el sisme de magnitud menor ($M=0,2$) i un 98% en el de magnitud major ($M=2,7$). Les diferències d'ERZ dels catàlegs també proven el major ajust de les localitzacions de 10 a 2,3 km i de 1 a 0,3 km, per el event de menor i major magnitud respectivament.

5.2. Sismicitat

La sismicitat enregistrada durant el període analitzat es concentra a la zona septentrional i a l'est de la zona d'estudi. El registre és constant durant el període de detecció amb una magnitud mínima de 0,2 i màxima de 4,2. La sismicitat detectada a l'àrea d'estudi és coherent amb l'activitat sísmica registrada en estudis anteriors com Gallart et al., (1985); Olivera et al., (1986); Souriau i Pauchet, (1998); Souriau et al., (2001) i Stich et al., (2020). S'evidencia que les zones amb major sismicitat

a l'àrea d'estudi són al massís de la Maladeta; la fossa de la Selva; la conca neògena de la Cerdanya i Sant Pau de Fenollet. De tota manera, els sismes enregistrats no s'han relacionat directament amb les falles actives de la literatura però sí que es consideren produïts possiblement en falles associades a elles.

Algunes de les agrupacions de sismes presenten alineaments que han permès interpretar a grans trets les possibles fonts en profunditat. S'han escollit dos casos per discutir-los amb més detall, on els events detectats permeten la interpretació de plans de falla a partir dels perfils en profunditat dels hipocentres. Aquests casos són els corresponents a la zona de Meranges (Zona A, Figures 10 i 11) i Santa Coloma de Farners (Zona A, Figures 12 i 13). Els plans de falla han estat simplificats en línies rectes, tot i que es reconeix que aquests poden ser superfícies lleugerament corbes.

En el cas de Meranges (zona A, Figura 11) es poden contemplar dues hipòtesis (Figura 16). En la primera s'interpreten 2 falles sintètiques cabussant cap al NE amb un rang aproximat de cabussament màxim de 66° i mínim de 64° en el cas de la falla NE (1, Figura 16). En relació a la falla SW (2, Figura 16) s'estima un cabussament màxim de 51° i un mínim de 42° . La segona hipòtesi considera que a més hi ha una falla antitètica (3, Figura 16) cabussant al SW, amb valors entre 58° i 47° . Malgrat que l'estructura principal a la zona és la falla indiferenciada d'orientació NW-SE (IGN i BRGM, 2009), com s'ha interpretat a la Figura 16 els sismes apareixen alineats en estructures no presents en la cartografia realitzada d'aquesta àrea. Cal remarcar que les conclusions extretes sobre la interpretació dels plans de falla són febles degut a la escassetat de dades.

A la zona de la Selva (zona A, Figura 13) els documents històrics donen constància de sismes de gran intensitat ocorreguts durant la crisi sísmica de l'any 1427, relacionats amb la falla d'Amer (Olivera et al., 2006), considerada activa per la QAFI (IGME, 2015). Els terratrèmols i rèpliques enregistrats a la part meridional de la fossa tectònica semblen alinear-se en profunditat segons un pla de cabussament SE. Aquest alineament permet interpretar una estructura amb un cabussament màxim de 77° i un mínim de 71° (Figura 16). En aquest cas, la falla interpretada coincideix amb estructures d'orientació NE-SW representades en el mapa geològic del ICGC (Annex 2 i 4.3), que limita el basament paleozoic i la cobertura neògena.

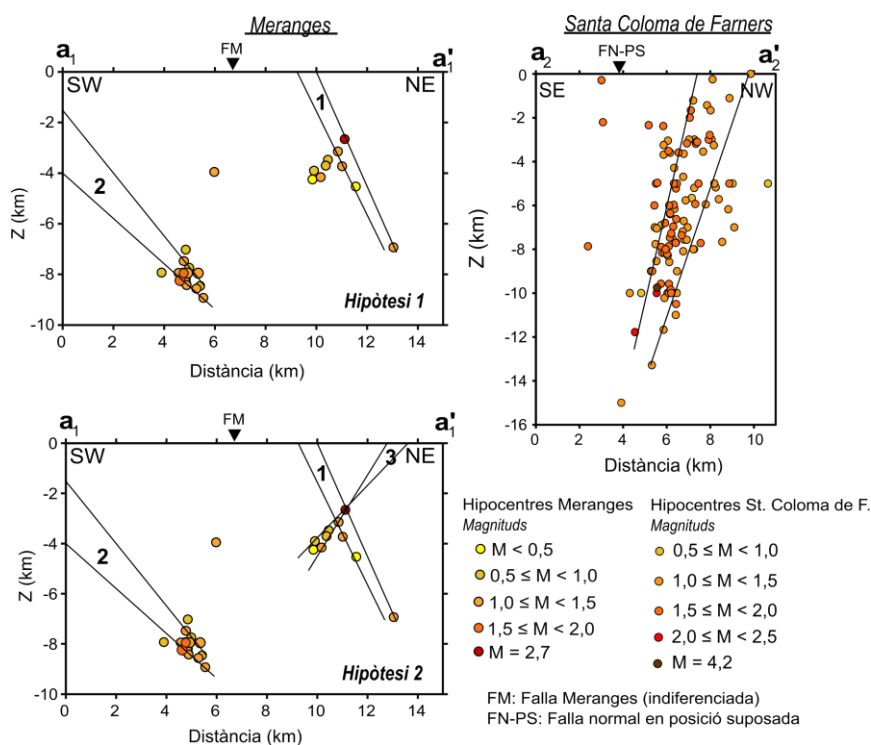


Figura 16. Perfils en profunditat dels hipocentres de la zona de Meranges, a la Cerdanya d'orientació SW-NE (Zona A, Figura 12) i la zona de St. Coloma de Farners, a la Selva d'orientació SE-NW (Zona A, Figura 13). S'interpreten rangs de cabussament per a les estructures inferides.

L'àrea de Fenollet ha tingut terratrèmols d'alta intensitat com el sisme produït durant crisi sísmica del 1428 al SW del massís del Canigó i d'altres més recents com l'ocorregut el febrer de 1996 de magnitud 5,2 a Sant Pau de Fenollet (Souriau i Pauchet, 1998; Olivera et al., 1999; Tapia et al., 2006; Rigo et al., 2015). Tanmateix, en aquest treball només s'han detectat 54 sismes entre 1,0 i 2,4 de magnitud amb els hipocentres distribuïts de manera dispersa en profunditat. En conseqüència, no és pot observar cap tipus d'agrupació dels events segons un pla concret. Aquest pot estar relacionat amb la complexitat del sistema imbricat de falles indiferenciades i al curt període temporal de registre del catàleg.

Així doncs, tot i que és important realitzar un anàlisi de la sismicitat des de la perspectiva de les estructures cartografiades, el treball present exposa que no sempre hi ha una correspondència entre la sismicitat registrada i les cartografies fetes. Convé explorar altres possibles alineacions dels terratrèmols en profunditat que permetin identificar altres hipòtesis sobre les estructures. Possiblement, el fet que no es puguin relacionar amb les cartografies prèvies sigui conseqüència de que aquestes poden ser incompletes o bé, a que existeixen algunes falles que no arriben a aflorar o que no poden ser identificades en superfície amb els mitjans actuals.

5.3. Millores per a futurs estudis

Per a futurs estudis en relació a la sismicitat als Pirineus Orientals caldria basar-se en la relocalització d'events per obtenir catàlegs sísmics durant períodes més llargs de temps i amb l'ús de xarxes sísmiques temporals denses en àrees d'interès, augmentant la resolució de la informació sísmica. Tanmateix, incloure dades de mecanismes focals dels sismes registrats de magnitud més alta ajudaria a conèixer millor el règim d'esforços regional. L'ampliació d'informació sísmica contribuirà a millorar l'avaluació de la perillositat i el risc sísmic, en particular en zones amb efectes locals del sòl.

6. CONCLUSIONS

El present estudi aporta noves dades de sismicitat de l'àrea de Catalunya i en concret, la conca neògena de la Cerdanya, la fossa tectònica de la Selva i l'àrea de Fenollet durant el període de desembre del 2019 a juny del 2020. Alhora de realitzar les relocalitzacions hipocentrics és fonamental elaborar un model cortical de velocitats que permeti una localització dels events acurada. Per aquest motiu s'ha elaborat un model de velocitats per a la conca de la Cerdanya, construït a partir dels coneixements de l'escorça procedents d'estudis de sísmica activa i passiva anteriors. Abans d'interpretar els resultats obtinguts, cal dur a terme un anàlisi d'error de les localitzacions. Aquest s'efectua a partir de paràmetres com la cobertura azimuthal o GAP, el RMS, els errors verticals i horitzontals per així poder comprovar la fiabilitat dels resultats. En el cas del catàleg SANIMS s'ha aconseguit disminuir l'error en la localització on es concentra la xarxa temporal fins a 0,6 km en ERH i 1 km al ERZ, molt menors als de les localitzacions de l'àrea d'estudi general i als que s'obtenen per la mateixa zona amb xarxes regionals i nacionals.

El catàleg SANIMS ha registrat un total de 641 sismes i a més, inclou la localització 251 voladures de canteres en el període temporal analitzat. La sismicitat es concentra a l'àrea septentrional i est dels Pirineus Orientals. L'anàlisi sismotectònic ha permès comparar la distribució en profunditat dels hipocentres dels events relacionant-los amb les estructures de les àrees d'estudi. En el cas de la Cerdanya s'han detectat un total de 202 terratrèmols amb profunditat màxima de 12 km. A l'àrea de Meranges es suggereix que els hipocentres s'alineïn segons estructures que cabussen principalment cap al SW, presentant una direcció perpendicular al sistema de falles de la Cerdanya. A la zona de la Seu d'Urgell i Bagà s'infereix que els sismes estan produïts en estructures cabussant cap al S-SE. Pel que fa a la fossa tectònica de la Selva s'han detectat 158 sismes, on la majoria són rèpliques d'un event de magnitud 4,2 ocorregut el

dia 08/05/2020 amb magnituds compreses entre 0,5 i 2,0. Aquesta sèrie sísmica ha permès inferir una estructura cabussant cap al SE que es relaciona amb el sistema de falles d'orientació NE-SW que limita el basament de sòcol paleozoic amb els materials cenozoics de la conca. Les profunditats dels hipocentres es distribueixen entre 0,2 i 15 km. Respecte a l'àrea de Fenollet, s'han registrat 54 sismes amb una distribució hipocentral molt dispersa que no ha permès identificar alineacions dels events, tot i que històricament, ha estat una zona on han ocorregut sismes d'alta intensitat i magnitud. Els hipocentres es distribueixen entre 0 i 16 km. Malgrat les interpretacions exposades, s'ha de tenir en compte que el fet de no poder associar alguns events amb estructures cartografiades porta a considerar que no totes les falles actives estan presents a les cartografies actuals. Així com, també pot ser causa de l'existència d'algunes estructures que no afloren en superfície i no han estat detectades amb els mitjans actuals.

En futurs estudis, l'elaboració de catàlegs sísmics en períodes temporals llargs a partir de xarxes temporals instal·lades en zones d'interès permetrien augmentar la resolució de les dades a més de dur a terme projectes relacionats amb la perillositat i el risc sísmic.

Agraïments. Vull agrair l'ajuda en l'elaboració d'aquest treball, al meu tutor, Dr. Mario Ruíz i la meua cotutora Dra. María Ortuño. També vull agrair a la Dra. Mar Tapia i la Dra. Marta Guinau tots els seus consells. Aquest treball s'ha desenvolupat en el marc del Projecte de pla Nacional SANIMS (GEO3BCN-CSIC). Per últim, donar les gràcies al ICGC que ha proporcionat el seu catàleg d'events amb millor resolució que el disponible a la web.

7. REFERÈNCIES

- Amaro-Mellado, J.L., i Tien Bui, D., 2020, GIS-Based Mapping of Seismic Parameters for the Pyrenees: ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 9, p. 452, doi: 10.3390/ijgi9070452.
- Antonio-Vigil, A., Ruiz, M., Gallastegui, J., Díaz, J., i Gallart, J., 2019, Crustal study of the pyrenees by refraction and wide-angle reflection using earthquakes as a natural seismic source: Boletín Geológico y Minero, v. 130, p. 417-444, doi: 10.21701/bolgeomin.130.3.003.
- Batló, J., Frontera, T., Irizarry, J., Romeu, N., Jara, J.A., i Goula, X., 2016, The Catalan Seismic Network: v. 50, p. 72-94, doi: 10.5281/ZENODO.999263.
- Briaux, A., Armijo, R., Winter, T., Tapponnier, P., i Herbecq, A., 1990, Morphological evidence for Quaternary normal faulting and seismic hazard in the Eastern Pyrenees.: Annales Tectonicae 4, v. 1, p. 19-42.
- BRGM Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2020, ESRI Base shapefile cartes géologiques à 1/50.000 format "vecteurs" (BRGM/RP-53473-FR), [en línia] [Consultat febrer 2020]. Disponible a: < <https://www.icgc.cat/Cartografia-geologica-i-geotematica/Cartografia-geologica/Mapa-geologic-de-Catalunya-1-250.000/>>
- Cabrera, L., Roca, E., i Santanach, P., 1988, Basin formation at the end of a strike-slip fault: the Cerdanya Basin (eastern Pyrenees): Jour. Geol. Soc. London, v. 145, p. 261-268, doi: 10.1144/gsjgs.145.2.0261.
- Calvet, M., 1999, Régimes des contraintes et volumes de relief dans l'est des Pyrénées/Stress regimes and volumes of reliefs in the Eastern Pyrenees.: Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement, v. 5 (3), p. 253-278.
- Carozza, J.M., i Baize, S., 2004, L'escarpement de faille de la Têt est-il le résultat de la tectonique active Plio-Pléistocène ou d'une exhumation Pléistocène? Comptes Rendus-Geoscience, v. 336, p. 217-226, doi: 10.1016/j.crte.2003.10.026.
- Chevrot, S., Sylvander, M., i Delouis, B., 2011, A preliminary catalog of moment tensors for the Pyrenees: Tectonophysics, v. 510, p. 239-251, doi: 10.1016/j.tecto.2011.07.011.
- Choukroune, P., 1992, Tectonic evolution of the Pyrenees: Annual review of Earth and planetary sciences. Vol. 20, p. 143-158, doi: 10.1146/annurev.earth.20.050192.001043.
- Choukroune, P., 1989, The Eors Pyrenean deep seismic profile reflection data and the overall structure of an orogenic belt: Tectonics, v. 8, p. 23-39, doi: 10.1029/TC008i001p00023.
- Daignières, M., Gallart, J., i Banda, E., 1981, Lateral variation of the crust in the North Pyrenean Zone.: Annales. Géophysique, v. 3, p. 435-456.
- De Vicente, G., Cloetingh, S., Muñoz-Martín, A., Olaiz, A., Stich, D., Vegas, R., Galindo-Zaldívar, J., i Fernández-Lozano, J., 2008, Inversion of moment tensor focal mechanisms for active stresses around the microcontinent Iberia: Tectonic implications: Tectonics, v. 27, p. 1-22, doi: 10.1029/2006TC002093.
- DelCaillau, B., Carozza, J.M., i Font, M., 2004, Le segment nord de la faille de la Tet (Pyrénées-Orientales) : Fonctionnement néogène et implications géomorphologiques: Bulletin de la Société Géologique de France, v. 175, p. 257-272, doi: 10.2113/175.3.257.
- Díaz, J., Gallart, J., i Carbonell, R., 2016, Moho topography beneath the Iberian-Western Mediterranean region mapped from controlled-source and natural seismicity surveys: Tectonophysics, v. 692, p. 74-85, doi: 10.1016/j.tecto.2016.08.023.
- Díaz, J., Vergés, J., Chevrot, S., Antonio-Vigil, A., Ruiz, M., Sylvander, M., i Gallart, J., 2018, Mapping the crustal structure beneath the eastern Pyrenees: Tectonophysics, v. 744, p. 296-309, doi: 10.1016/j.tecto.2018.07.011.

- Fleta, J., Grellet, B., Philip, H., Escuer, J., Goula, X., i Bousquet, J.C., 1996, Les deformacions tectòniques en els materials plioquaternaris de la depressió de Tortellà-Besalú: *Geologia de la conca lacustre de Banyoles-Besalú*, Qd 17, p. 99- 112.
- Gallart, J., Banda, E., i Daignières, M., 1981, Crustal structure of the Paleozoic Axial Zone of the Pyrenees and transition to the North Pyrenean Zone: *Annales Géophysique*, v. 3, p. 457-480.
- Gallart, J., Olivera, C., i Correig, A., 1985, Reconocimiento sísmico de la Cerdanya (Pirineos Orientales). Primeros resultados: *Rev. Geofis*, v. 41, p. 81-90.
- García-Mayordomo, J., Insúa-Arévalo, J.M., Martínez-Díaz, J.J., Jiménez-Díaz, A., Álvarez-Gomez, J.A., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Martín-González, F., Giner-Robles, J., Masana, E., Nemsler, E., i Cabral, J., 2012, The Quaternary Active Faults Database of Iberia v.2.0: v. 38, p. 285-302.
- GFZ i Gempa, 2008, Helmholtz Center Potsdam GFZ German Research Center for Geosciences i gempa GmbH, The SeisComp seismicological software package., doi: 10.5880/GFZ.2.4.2020.003.
- Goula, X., Olivera, C., Fleta, J., Grellet, B., Lindo, R., Rivera, L.A., Cisternas, A., i Carbon, D., 1999, Present and recent stress regime in the eastern part of the Pyrenees: *Tectonophysics*, v. 308, p. 487-502, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00120-1.
- Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo-Ñaupari, R., Giner, J., Simón, J.L., González-Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M., et al., 2000, The recent (upper miocene of quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberian Peninsula: *Tectonics*, v. 19, p. 762-786, doi: 10.1029/2000TC900006. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (2000): Catalan Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network: doi: 10.7914/SN/CA
- Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2000, Catalan Seismic Network. International Federation of Digital Seismograph Networks. Other/Seismic Network: doi: 10.7914/SN/CA
- ICGC, Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2020, ESRI Base Shapefile mapa geològic de Catalunya 1250.000 (MG250mv20), 2ª edició [en línia] [Consultat febrer 2020]. Disponible a: < <https://www.icgc.cat/Administracio-i-empresa/Descarregues/Cartografia-geologica-i-geotematica/Cartografia-geologica/Mapa-geologic-de-Catalunya-1-250.000/> >
- IGME, 2015, QAFI v.3: Quaternary Faults Database of Iberia., [en línia] [Consultat febrer 2020]. Disponible a: <<http://info.igme.es/QAFI/>>
- IGME i BRGM, Instituto geológico y Minero de España i Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2009, ESRI Base Shapefile mapa Geológico de Pirineos 1:400.000 [en línia] [Consultat febrer 2020]. Disponible a: < <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/mapa/> >
- Instituto Geográfico Nacional, Spain, 1999, *Spanish Digital Seismic Network* [Data set]. International Federation of Digital Seismograph Networks. Disponible a: <<https://doi.org/10.7914/SN/ES/> >
- Instituto Geográfico Nacional, 2020, Descripción del tipo de Magnitud: Descripción del tipo de magnitudes, p. 1-4, <https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/SIS-Tipo-Magnitud.pdf>.
- Lacan, P., i Ortuño, M., 2012, Revisión de la tectónica activa de los pirineos: *Journal of Iberian Geology*, v. 38, p. 11-33, doi: 10.5209/rev_JIGE.2012.v38.n1.39203.
- Larrasoña, J.C., Parés, J.M., Millán, H., del Valle, J., i Pueyo, E.L., 2003, Paleomagnetic, structural, and stratigraphic constraints on transverse fault kinematics during basin inversion: The Pamplona Fault (Pyrenees, north Spain): *Tectonics*, v. 22, doi: 10.1029/2002tc001446.
- Lee, W.H.K., i Lahr, J.C., 1975, HYPO71 (revised): a computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes.: U.S. Geol. Surv. Open-file Report 75-311, 114 pp.,
- López, C., 2008, Nuevas fórmulas de magnitud para la Península Ibérica y su entorno.: Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Macau, A., 2008, Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas: Universitat Politècnica de Catalunya, 328 p., Disponible a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/6257>. >.
- Muñoz, J.A., 2002, Alpine tectonics I: the Alpine system north of the Betic Cordillera. Tectonic setting; The Pyrenees., *en* Alpine tectonics I, *Geology of Spain*, Geol. Soc (London), p. 370-385, doi: <https://doi.org/10.1144/GOSP.15>.
- Muñoz, J.A., 1992, Evolution of a continental collision belt: ECORS-Pyrenees crustal balanced cross-section., *en* K.R., I.M. ed., *Thrust Tectonics*, Springer, Dordrecht, p. 235-246, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-011-3066-0_21.
- Muñoz, J.A., Mencos, J., Roca, E., Carrera, N., Gratacós, O., Ferrer, O., i Fernández, O., 2018, The structure of the South-Central-Pyrenean fold and thrust belt as constrained by subsurface data: *Geologica Acta*, v. 16, p. 439-460, doi: 10.1344/GeologicaActa2018.16.4.7.
- Olivera, C., i Fleta, J., 1996, Olivera_fleta, *en* Proceedings of the European Seismological Commission, XXV General Assembly, Reykjavik, Iceland, p. 288-293.
- Olivera, C., Fleta, J., Susagna, T., Figueras, S., Goula, X., i Roca, A., 2003, Sísmicidad y deformaciones actuales en el nordeste de la Península Ibérica TT - Seismicity and recent deformations in the northeastern of the Iberian Peninsula: *Física de la tierra*, v. 15, p. 111-144, Disponible a: <<http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/FITE0303110111A/11812> >..
- Olivera, C., Gallart, J., Goula, X., i Banda, E., 1986, Recent activity and seismotectonics of the Eastern Pyrenees: *Tectonophysics*, v. 129, p. 367-380, doi: 10.1016/0040-1951(86)90262-3.
- Olivera, C., Redondo, E., i Melis, A.R., 2006, Els terratrèmols de segles XIV i XV a Catalunya: 409 p.
- Olivera, C., Redondo, E., Riera, A., Lambert, J., i Roca, A., 1999, Problems in assessing focal parameters to earthquake sequence from historical investigation: the 1427 earthquakes in Catalonia., *en* IX Asamblea Española de Geodesia y Geofísica, Almería.
- Olivera, C., Riera, A., Lambert, J., Banda, E., i Alexandre, P., 1994, Els terratrèmols de l'any 1373 al Pirineu: els efectes a Espanya i França.: *Generalitat de Catalunya i Servei Geològic de Catalunya*, v. Monogr.3, p. 220.
- Olivet, J., 1996, La cinématique de la plaque ibérique.: *Elf Aquitaine*, v. 20, p. 131-195.
- Ortuño, M., 2008, Deformación activa en el Pirineo Central: La falla Norte de la Maladeta y otras fallas activas: Universitat de

- Barcelona, Tesis Doctoral, 346 p., Disponible a: <<http://www.tdx.cat/handle/10803/287835>>.
- Pauchet, H., Rigo, A., Rivera, L., i Souriau, A., 1999, A detailed analysis of the February 1996 aftershock sequence in the eastern Pyrenees, France: *Geophysical Journal International*, v. 137, p. 107-127, doi: 10.1046/j.1365-246X.1999.00776.x.
- Puigdefàbregas, C., i Souquet, P., 1986, Tecto-sedimentary cycles and depositional sequences of the Mesozoic and Tertiary from the Pyrenees: *Tectonophysics*, v. 129, p. 173-203, doi: 10.1016/0040-1951(86)90251-9.
- Réseau National de Surveillance Sismique, 2020, [en línia][Consultat febrer 2020] Disponible a: <<https://renass.unistra.fr/>>
- RESIF, 1995, *RESIF-RLBP French Broad-band network, RESIF-RAP strong motion network and other seismic stations in metropolitan France* [Data set]. RESIF - Réseau Sismologique et géodésique Disponible a: <<https://doi.org/10.15778/RESIF.FR>> Français.
- Richter, C.F., 1935, An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 25 N°1, p. 1-32.
- Rigo, A., Vernant, P., Feigl, K.L., Goula, X., Khazaradze, G., Talaya, J., Morel, L., Nicolas, J., Baize, S., Chéry, J., i Sylvander, M., 2015, Present-day deformation of the pyrenees revealed by GPS surveying and earthquake focal mechanisms until 2011: *Geophysical Journal International*, v. 201, p. 947-964, doi: 10.1093/gji/ggv052.
- Roca, E., 1996, The Neogene Cerdanya and Seu d'Urgell Intramontane Basins (Eastern Pyrénées), en Firend, P.F. i Dabrio, C. J. ed., *Tertiary Basins of Spain: The Stratigraphic Record of crustal Kinematics*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 114-119.
- Roca i Guimerà, 1992, The Neogene structure of the eastern Iberian margin: structural constraints on the crustal evolution of the Valencia trough (western Mediterranean): *Tectonophysics*, v. 203, p. 203-218.
- Séguret, M., 1972, Étude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant Sud des Pyrénées. Caractère synsédimentaire, rôle de la compression et de la gravité: Université de Montpellier., 1-155 p.
- Souriau, A., i Pauchet, H., 1998, A new synthesis of Pyrenean seismicity and its tectonic implications: *Tectonophysics*, v. 290, p. 221-244, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00017-1.
- Souriau, A., Sylvander, M., Rigo, A., Fels, J.F., Douchain, J.M., i Ponsolles, C., 2001, Sismotectonique des Pyrénées: Principales contraintes sismologiques: *Bulletin de la Societe Geologique de France*, v. 172, p. 25-39, doi: 10.2113/172.1.25.
- Stich, D., Martín, R., i Morales, J., 2010, Moment tensor inversion for Iberia-Maghreb earthquakes 2005-2008: *Tectonophysics*, v. 483, p. 390-398, doi: 10.1016/j.tecto.2009.11.006.
- Stich, D., Martínez-Solares, J.M., Custódio, S., Batlló, J., Martín, R., Teves-Costa, P., i Morales, J., 2020, Seismicity of the Iberian Peninsula: , p. 11-32, doi: 10.1007/978-3-030-10931-8_3.
- Tapia, M., 2006, Desarrollo y aplicación de los métodos avanzados para la caracterización de la respuesta sísmica del suelo a escala regional y local. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. 355pp.
- Tapia, M., Figueras, S., Franek, P., i Academy, S., 2007, Modelización 1D Y 2D De La Propagación De Las Ondas Sísmicas En El Valle De La Cerdaña (Cataluña): , p. 8-11, doi: 10.13140/2.1.1222.5924.
- Teixell, A., 1996, The Ansó transect of the southern Pyrenees: Basement and cover thrust geometries: *Journal of the Geological Society*, v. 153, p. 301-310, doi: 10.1144/gsjgs.153.2.0301.
- Turu Michels, V., i Planas Battle, X., 2005, Inestabilidad de vertientes en los valles del Valira. Datos y dataciones para el establecimiento de una cronología, posibles causas. Andorra y Alt Urgell (Pirineos Orientales), en VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Valencia, p. 21-24.
- Turu, V., i Peña, J.L., 2006, Las terrazas fluviales del sistema Segre- Valira (Andorra-La Seu d'Urgell- Organyà, Pirineos Orientales) : re- lación con el glaciario y la tectónica activa., en Pérez-Alberti, A. i López-Bedoya, J. ed., *Actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología., Geomorfología y Territorio : Univers*.
- Vergés, J., 1994, Estudio geológico de la vertiente sur del Pirineo oriental y central. Evolución cinemática en 3D.: *Acta Geológica Hispánica*, v. 29, p. 195-199.
- Vergés, J., Fernández, M., i Martínez, A., 2002, The Pyrenean orogen: Pre-, syn-, and post-collisional evolution: *Journal of the Virtual Explorer*, v. 8, doi: 10.3809/jvirtex.2002.00058.

ANNEXES

ANNEX1: A.1.1 Mapa de sismicitat de l'àrea de la Cerdanya, catàleg ICGC (15/12/2019-19/06/2020); **A1.2** Taula de dades utilitzades en l'anàlisi d'error comparatiu entre la xarxa SANIMS i ICGC a la Cerdanya.

ANNEX2: Mapa de sismicitat de l'àrea de la Selva, catàleg ICGC (15/12/2019-19/06/2020).

ANNEX3: Mapa de sismicitat de l'àrea de Fenollet, catàleg RéNaSS (15/12/2019-19/06/2020).

ANNEX4: A4.1 Mapa falles actives (QAFI), **A4.2** Mapa geològic comarcal ICGC Cerdanya **A4.3** Mapa geològic comarcal ICGC Selva.

ANNEXES ANNEX 1.1 Mapa de sismicitat de la Cerdanya, catàleg ICGC(15/12/2019-19/06/2020)

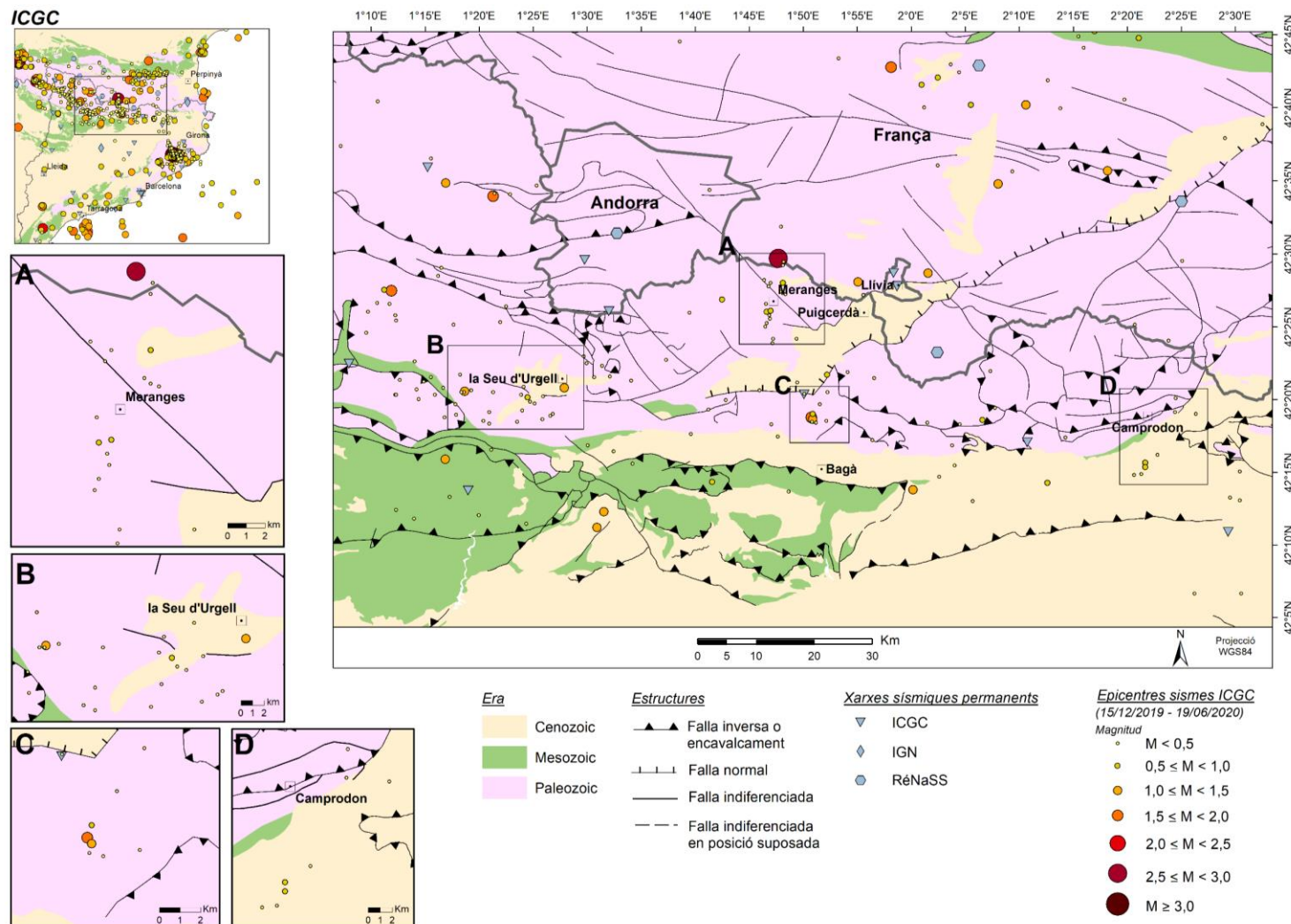


Figura 1 (A.1.1).-Mapa de sismicitat de l'àrea de la Cerdanya del catàleg ICGC. A) zona de Meranges, B) zona de la Seu d'Urgell, C) zona de Bagà i D) zona de Camprodon. (Mapa derivat mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i 1:50.000 de BRGM, 2020).

ANNEX 1.2 Taules de dades utilitzades en l'anàlisi d'error comparatiu entre la xarxa SANIMS i ICGC a la Cerdanya

| CERDANYA | | | | |
|---------------|--------|-----------------|------------|-------------|
| Sismes Menors | | ID | Data | Hora |
| | sanims | ictja2020krtudg | 2020-05-31 | 7:36 |
| | ICGC | 82236 | 2020-05-31 | 07:36.19,60 |
| Sismes Majors | | | | |
| | sanims | ictja2020ggjnub | 2020-03-29 | 10:52 |
| | ICGC | 81519 | 2020-03-29 | 10.52.33,00 |

| CERDANYA | | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|----------|---------|------|------|------|-----|-------|-----|------|------|
| Sismes Menors | | Lat | Lon | Z | Mag | RMS | GAP | ErH | ErZ | Smaj | Smin |
| | sanims | 42,36183 | 1,21733 | 6,48 | 0,2 | 0,07 | 144 | 0,919 | 2,3 | ---- | ---- |
| | ICGC | 42,356 | 1,211 | 8 | -1,1 | 0,1 | 141 | | 10 | 7,6 | 1,5 |
| Sismes Majors | | | | | | | | | | | |
| | sanims | 42,48800 | 1,80083 | 2,72 | 2,66 | 0,3 | 36 | 0,141 | 0,3 | ---- | ---- |
| | ICGC | 42,495 | 1,795 | 2 | 2,5 | 0,2 | 130 | | 1 | 0,8 | 0,6 |

Taula 1 (A1.2).- Taula dels valors dels paràmetres del sisme major i menor detectats per la xarxa temporal SANIMS i la xarxa permanent de l'ICGC a l'àrea de la conca de la Cerdanya.

| Volum El·lipsoides d'error CERDANYA (Km ³) | | | |
|--|-------|---------------|------|
| Sismes Menors | | Sismes Majors | |
| SANIMS | 8,14 | SANIMS | 0,02 |
| ICGC | 71,63 | ICGC | 1,21 |
| ErZ (km) | | ErZ (km) | |
| Sanims | 2,3 | Sanims | 0,3 |
| ICGC | 10 | ICGC | 1 |
| RMS (segons) | | RMS (segons) | |
| Sanims | 0,07 | Sanims | 0,3 |
| ICGC | 0,10 | ICGC | 0,2 |

Fórmules

$$V = 4 * \text{PI} * \text{Smaj} * \text{Smin} * \text{Smin} / 3$$

$$V = 4 * \text{PI} * \text{ERH} * \text{ERH} * \text{ERZ} / 3$$

Taula 2 (A1.2).-Taula dels valors dels resultats de les variacions del volum de l'el·lipsoide d'error per els sismes major i menor a l'àrea de la Cerdanya detectats per el catàleg SANIMS i l'ICGC, s'afegeixen els valors d'error vertical i RMS.

ANNEX 2. Mapa de sismicitat de la Selva, catàleg ICGC (15/12/2019-19/06/2020)

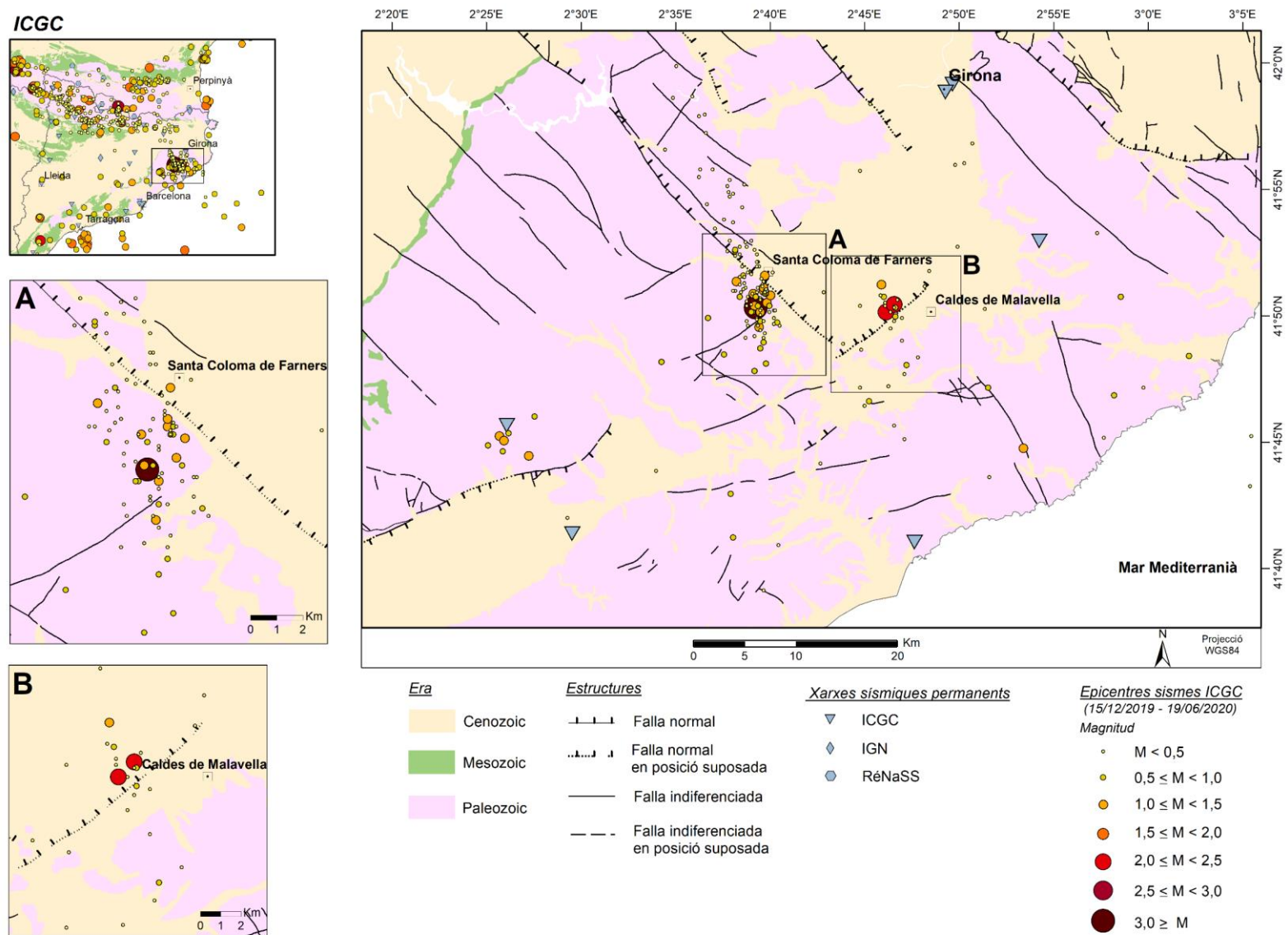


Figura 2 (A2.1).- Mapa de sismicitat de l'àrea de la Selva del catàleg ICGC. A) zona de St. Coloma de Farners, B) zona de Caldes de Malavella (Mapa derivat mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i 1:50.000 de BRGM, 2020).

ANNEX 3. Mapa de sismicitat de la zona de Fenollet, catàleg RéNaSS (15/12/2019-19/06/2020)

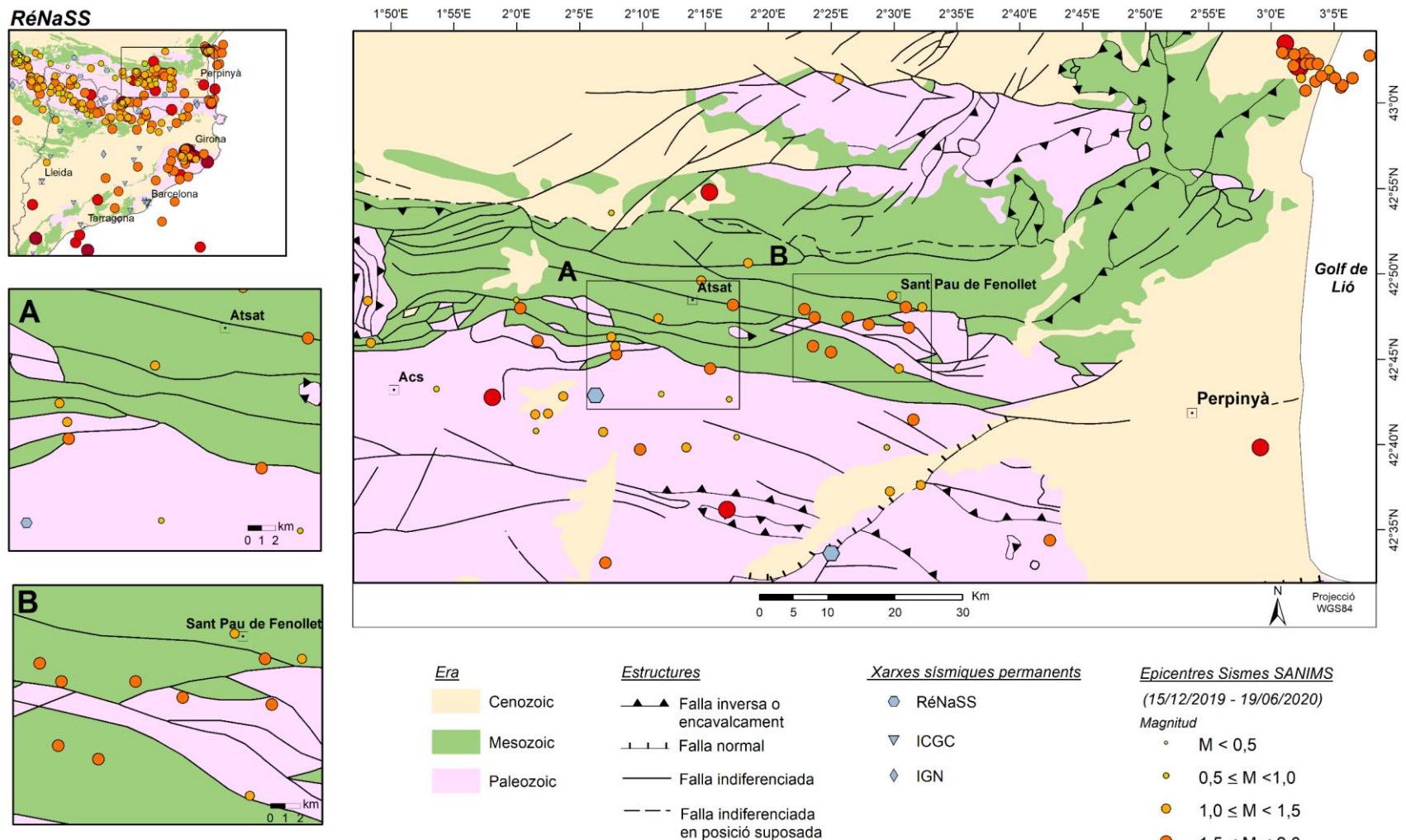


Figura 3(A.3).- Mapa de sismicitat de l'àrea de Fenollet del catàleg RéNaSS. A) zona d'Atsat, B) zona de St. Pau de Fenollet (Mapa derivat mapa geològic 1:250.000 de l' ICGC, 2020 i 1:50.000 de BRGM, 2020).

ANNEX4.1 *Mapa de falles actives (QAFI)*

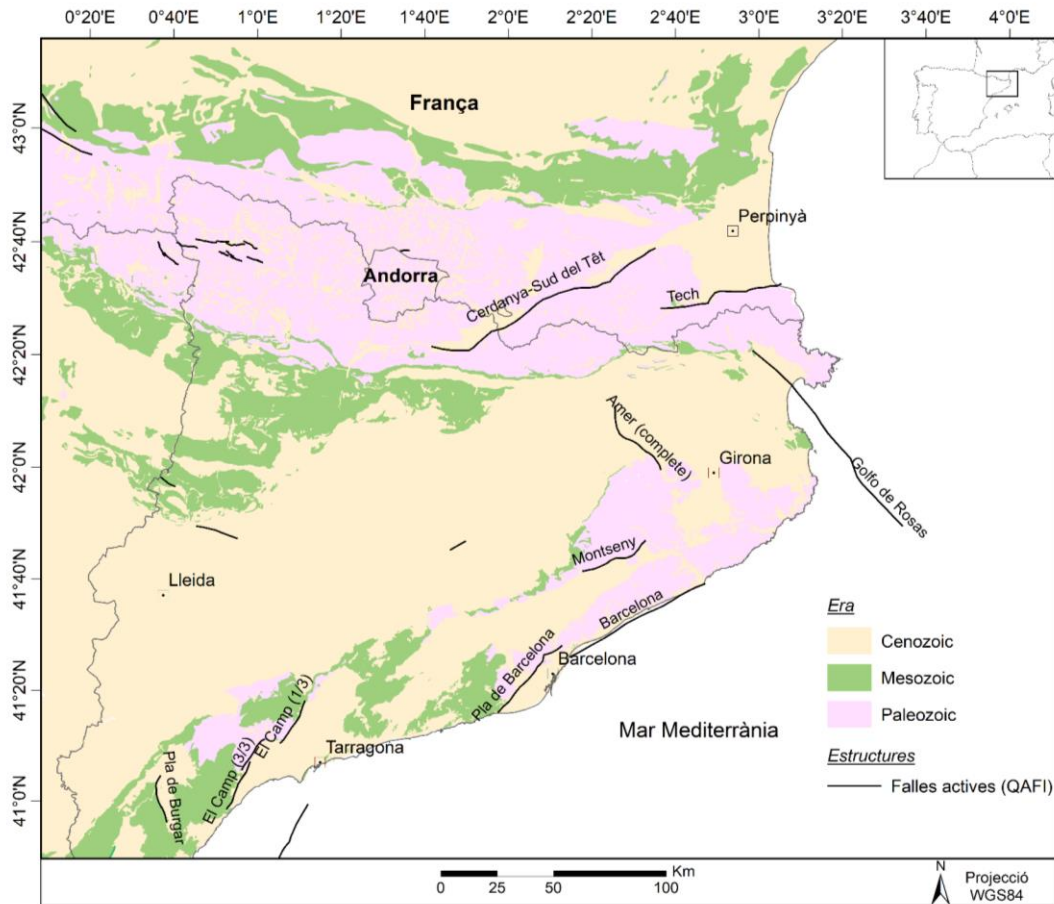


Figura 4 (A 4.1).- Mapa derivat de la base de dades de falles actives QAFI (IGME,2015).

ANNEX4.2 *Mapa geològic de la zona de la Cerdanya, ICGC*

Escala 1:50.000 Projecció ETRS89 UTM31N

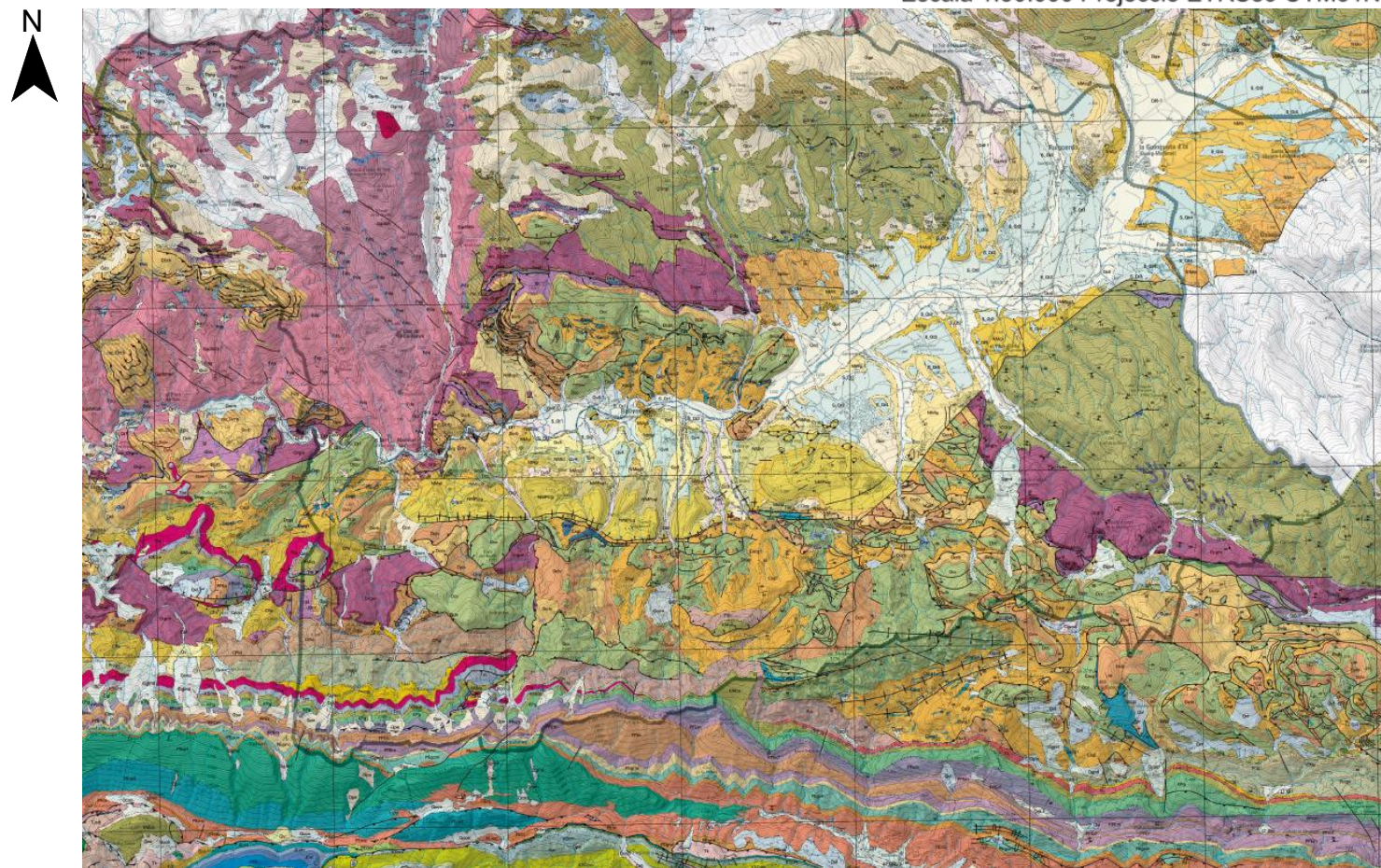


Figura 5 (A.4.2).- Mapa geològic comarcal de la Cerdanya, (Base geològica 1:50.000 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2006).

15 Cerdanya

Llegenda

Cenozoic Quaternari

| | |
|--------------------------|---|
| Qcoo | Dipòsits col·luvials. Quaternari. |
| Qt | Traverlines. Quaternari. |
| Holocè | |
| LI_Qt1 | Terrassa del Llobregat i afluent. Es troba 2 m sobre el nivell del riu. Holocè. |
| Qco | Dipòsits col·luvials. Argiles amb còdols angulosos dispersos. Holocè. |
| Ogl | Llims lacustres. Holocè. |
| Qi | Dipòsits lacustres. Argiles i torbes. Holocè. |
| Ope | Blocs i còdols calcaris heteromètrics. Dipòsits de tartara. Holocè. |
| Qv0-1 | Clasts angulosos, sorres o lims. Ventalls al·luvials. Relacionats amb les terrasses Q i 1. Holocè. |
| S_Qt1 | Graves i lims. Holocè. |
| Qep | Tartanes o estaldregats de pendents recents o actuals. Holocè actual. |
| Qcd | Cons de dejectació. Graves i sorres. Holocè recent. |
| Qt0 | Terrassa fluvial actual. Holocè recent. |
| Qt0-1 | Llit actual, plana d'inundació ordinària i terrassa més baixa (0-2 m). Holocè recent. |
| S_Qt0 | Graves i sorres. Llit actual del Segre. Holocè recent. |
| S_Qt4 | Terrassa del Segre i afluent. Es troba uns 60 m sobre el nivell del riu. Holocè basal. |
| S_Qt2 | Terrassa del Segre i afluent. Es troba uns 20 metres sobre el nivell del riu. Holocè basal. |
| S_Qt3 | Terrassa del Segre i afluent. Es troba uns 40 metres sobre el nivell del riu. Holocè basal. |
| Plistocè - Holocè | |
| Qgm | Restes de dipòsits morènics. Dipòsits caòtics d'argiles, lims, sorres, clasts i blocs. Plistocè-Holocè. |
| Ogpd | Dipòsits periglaciàls degradats. Clasts angulosos, sorres i lutites. Plistocè-Holocè. |
| Ogtg | Sediments de glacera rocallosa del Tardiglaciàl. Plistocè-Holocè. |
| Qmm | Moviments de massa. Breques, blocs i argiles. Plistocè-Holocè. |
| Qvl | Clasts angulosos, sorres i lims. Ventalls al·luvials antics degradats. Plistocè-Holocè. |
| Ogp | Dipòsits periglaciàls. Clasts angulosos, sorres i lutites. Plistocè-Holocè antic. |
| Ogr | Dipòsits glaciàls i periglaciàls. Clasts i blocs angulosos amb poca matrua. Plistocè-Holocè antic. |
| LL_Qt2 | Terrassa del Llobregat i afluent. Es troba 3 m sobre el nivell del riu. Plistocè terminal-Holocè basal. |
| Plistocè | |
| Ocq | Graves carbonatades. Breques de Cornellana i Jose. Plistocè. |
| Ogtg | Sediments fluvio-glaciàls. Plistocè. |

Neogen

| | |
|--------------------------------|--|
| ft-ÇOrgl | Farina de falla. Neogen (?). |
| NMcg2 | Conglomerats, gresos i lutites. Neogen. |
| Miocè - Pliocè | |
| NMPcgl | Conglomerats i lutites roges. Fàcies de proximitat a distals de cons al·luvials d'àrea font siliciolítica i/o volcànica. Miocè-Pliocè. |
| NMPicg | Conglomerats, breques, gresos i lutites. Miocè-Pliocè. |
| Miocè Vallesà - Turollà | |
| NMcg3 | Conglomerats i gresos. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| NMcrr | Conglomerats i lutites roges. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| NMgl | Gresos i lutites. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| NMld | Lutites i diatomites. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| NMlg | Lutites grises, gresos i carbó. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| NMlr | Lutites, conglomerats, gresos i carbó. Miocè. Vallesà-Turollà. |
| Vallesà | |
| NMbm | Breques i lutites vermelles. Miocè. Vallesà. |
| Paleogen Eocè - Oligocè | |
| PEOcc | Conglomerats. Eocè-Oligocè. |

| | |
|-------------------------------|--|
| Eocè | |
| PEcp2 | Calciàries micròtiques. Formació Armànies. Lutecià. |
| PEln | Alternança de gresos amb nummulites, lims i margues. Lutecià. |
| PEmb | Margues i argiles blaves. Formació Margues de Banyoles. Lutecià. |
| PEgmf | Alternança de gresos i margues amb conglomerats. Tram inferior de la Formació Vallfogona. Lutecià inferior. |
| PExb | Guíxos laminats i margues. Formació Guixos de Bouda. Lutecià inferior. |
| Culsià - Lutecià | |
| PEca | Calciàries bioestètiques. Eocè inferior i mitjà. Culsià-Lutecià. |
| PEmc | Margues i margocalciàries amb algun nivell de gres. Formació Armànies. Culsià-Lutecià. |
| Culsià | |
| PEcp1 | Calciàries micròtiques. Formació Penya-Terrades. Culsià. |
| PEgcm | Gresos. Tram mitjà de la Formació Coronas. Culsià. |
| PEcc | Alternança de calcàries i margues grises. Formació Coronas. Culsià inferior. |
| PEgmc | Gresos, margues i lims i, ocasionalment, alguna intercalació de calciàries amb mil·lòids. Formació Coronas. Culsià inferior. |
| Paleocè - Eocè llerdià | |
| PPEc | Calciàries i dolomies. llerdià. |
| PPEcf | Calciàries i margocalciàries. Formació Bagnari. Paleocè superior-Eocè inferior. llerdià. |
| PPEm | Margues gris blavós. llerdià. |

Santoninà - Campanià

| | |
|-------------------------------|---|
| KSCca | Conglomerats i gresos. Formació Adraín. Santoninà-Campanià. |
| KSCmv | Margues grises. Santoninà-Campanià. |
| Santoninà | |
| KScm | Calciàries i margues amb lacunes. Santoninà inferior. |
| Canoninà - Turoninà | |
| KCTcp | Calciàries micròtiques. Canoninà-Turoninà. |
| Cretaci inferior Aptià | |
| CAcor | Calciàries amb orbitolines i rudistes. Formació Senyús. Aptià superior. |
| Neocomià - Barremià | |
| CNBc | Calciàries. Inclou les unitats JCc i CBC. Neocomià-Barremià. |
| Berriasià | |
| CNb | Breixa de carbonat. Berriasià. |
| Juràssic | |
| Malm | |
| JMc | Calciàries amb intercalacions de margocalciàries i margues. Malm. |
| Dogger | |
| JDd | Dolomies massives de color maró. Dogger. |
| Lias | |
| JLcd | Calciàries i dolomies laminades. Lias. |
| Hettangia | |
| JLcm | Calciàries. Lias. Hettangia. |

Triàsic - Juràssic

| | |
|---|--|
| Retià - Dogger | |
| TJcd | Calciàries i dolomies. Retià-Dogger. |
| Retià - Lias | |
| TJb | Breques carbonatiques. Retià-Lias. |
| Triàsic | |
| Triàsic superior | |
| Tk | Margues i calciàries margoses. Fàcies Keuper. Triàsic superior. |
| Tkg | Guixos. Fàcies Keuper. Triàsic superior. |
| Triàsic mitjà - Triàsic superior | |
| Tm | Calciàries i dolomies amb intercalacions de margues. Fàcies Muschelkalk. Triàsic mitjà-superior. |
| Triàsic inferior - Triàsic mitjà | |
| Tb | Conglomerats, gresos i lutites. Fàcies Buntsandstein. Triàsic inferior-mitjà. |
| Triàsic inferior | |
| Tbc | Conglomerats silíceus basals. Fàcies Buntsandstein. Triàsic inferior. |
| Tbg | Alternança de gresos silíceus i argiles. Fàcies Buntsandstein. Triàsic inferior. |
| Paleozoic Permianà | |
| Prvgg | Conglomerats, gresos i lutites roges. Permianà. |
| Prvgv | Conglomerats, gresos, lutites roges i roques vulcanoclastiques. Permianà. |
| Prig | Ignimbrites ríoliques. Permianà. |
| Prir | Laves ríoliques. Permianà inferior. |

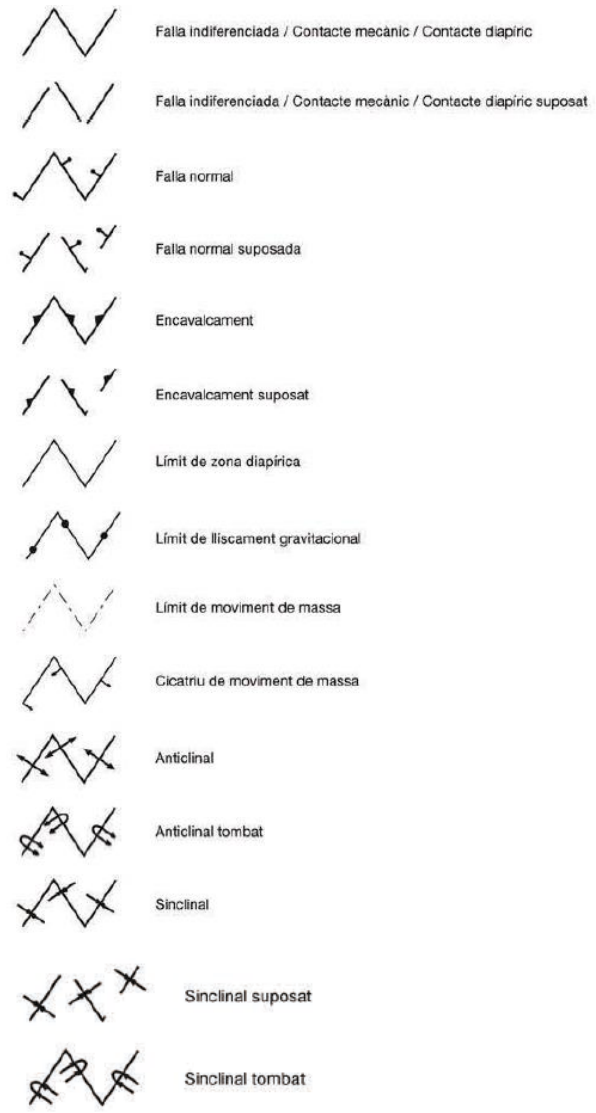
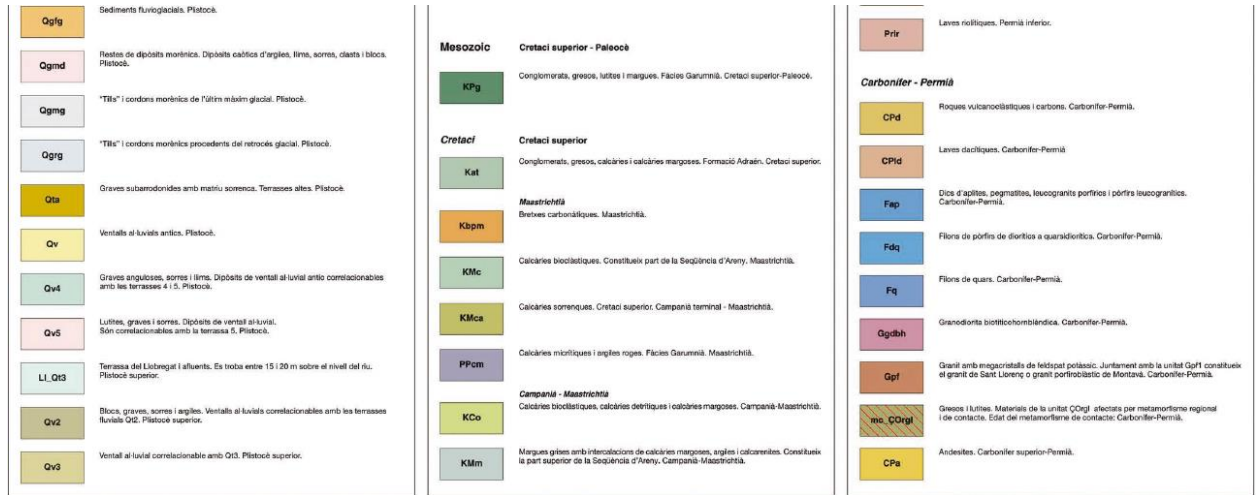


Figura 6 (A.4.2).- Llegendra del mapa geològic comarcal de la Cerdanya, (Base geològica 1:50.000 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2006).

ANNEX4.3 *Mapa geològic comarcal de la zona de la Selva, ICGC*

Escala 1:50.000 Projecció ETRS89 UTM31N

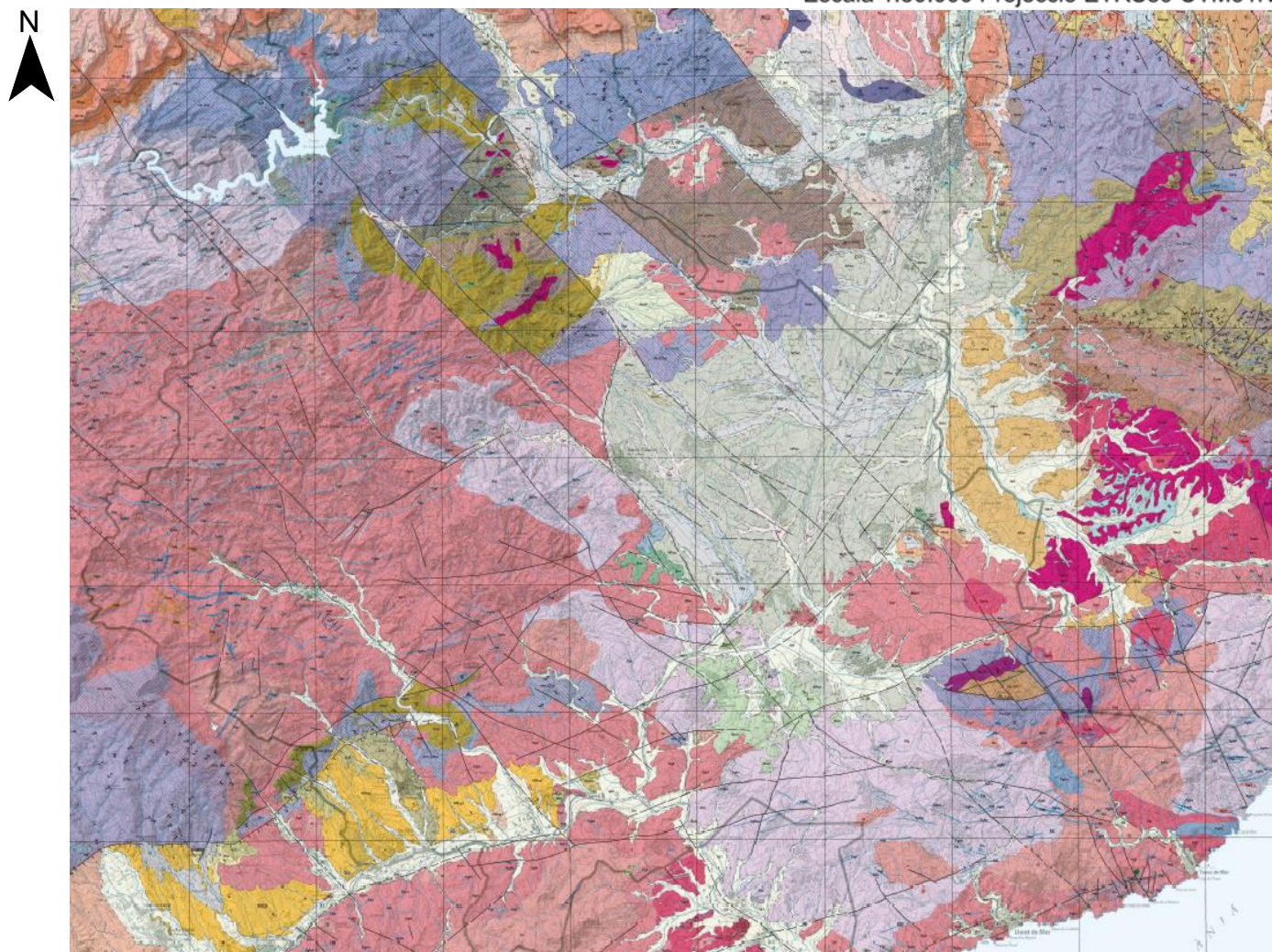


Figura 6 (A.4.3).- Mapa geològic comarcal de la Selva, (Base geològica 1:50.000 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2006.)

34 Selva

Llegenda

Cenozoic Quaternari

| | |
|--------------------------|--|
| Holocè | |
| Q | Sediments recents de fons de valls, rieres i peu de mont. Holocè. |
| Qac | Dipòsits al·luvials-còl·luvials. Graves amb matriu sorrenca i argilosa. Holocè. |
| Qac1 | Dipòsits al·luvials-còl·luvials correlacionables amb les terrasses fluvials Q11. Holocè. |
| Qco | Dipòsits col·luvials. Argiles amb còdols angulars dispersos. Holocè. |
| Qd | Cordons de dunes litorals. Holocè. |
| Q11 | Dipòsits lacustres coetanis amb les terrasses fluvials Q11. Argiles i torbes. Holocè. |
| Qma | Meandres abandonats. Graves, sorres i lutites. Holocè. |
| Qr | Dipòsits dels llits actuals de les rieres i dels torrents. Holocè. |
| Qt1 | Terrassa fluvial. Graves, sorres i lutites. Holocè |
| T_Q11 | Terrassa del Ter i afluents. Es troba entre 2 i 3 m sobre el nivell del riu. Holocè. |
| Qe | Dipòsits al·luvials. Llims amb clasts dispersos i sòls de potència màxima de 3 metres. Holocè actual. |
| Qep | Tarteres o estabregals de pendent recent o actuals. Holocè actual. |
| Qcd | Cons de dejecció. Graves i sorres. Holocè recent. |
| Q10-1 | Llit actual, plana d'inundació ordinària i terrassa més baixa (0-2 m). Holocè recent. |
| Q11a | Sorres, graves i materials fins (llits abandonats). Holocè superior. |
| Qp | Sediments de platja. Holocè superior. |
| Qpa | Plana al·luvial. Graves, sorres i lutites. Holocè superior. |
| Plistocè - Holocè | |
| Qacv | Dipòsits al·luvials-còl·luvials relacionats amb el barratge provocat per les colades volcàniques. Plistocè-Holocè. |
| Qga | Glacis d'acumulació. Argiles amb còdols. Plistocè-Holocè. |
| Qvbc | Basalts indiferenciats formant colades. Plistocè-Holocè. |
| Qvc-bs | Basanites formant colades. Plistocè-Holocè. |
| Qvm | Dipòsits procliàstics en mantell. Plistocè-Holocè. |
| Qvpc | Piroclasts formant cons volcànics. Plistocè-Holocè. |
| Qacg | Dipòsits al·luvials-còl·luvials. Argiles, sorres i llims amb còdols aïllats. Plistocè superior i Holocè. |
| Qcd1 | Ventall al·luvial correlacionable amb la Terrassa 1. Sorres limoargiloses amb còdols. Plistocè superior-Holocè. |
| Qtd | Lutites i graves. Terrassa fluvial degradada. Plistocè superior-Holocè. |
| Qac2 | Dipòsits al·luvials-còl·luvials. Graves amb matriu sorrenca i argilosa correlacionables amb la Terrassa 2. Plistocè terminal-Holocè basal. |
| Qcd2 | Cons de dejecció. Graves i sorres. Plistocè terminal-Holocè basal. |

| | |
|--------------|--|
| NMcga | Aragonià - Vallesià Nivells lenticulars de conglomerats amb matriu sorrenca arcòsica. Aragonià-Vallesià. |
| NMa | Argiles i gresos arcòsics. Aragonià superior-Vallesià. |
| NMgc | Aragonià Sorres arcòsiques i conglomerats molt heteromètrics. Aragonià. |
| POa | Paleogen Oligocè Rupelià Arcoses, conglomerats i lutites. Rupelià. |
| PEOa | Eocè - Oligocè Argiles amb nivells de conglomerats i gresos grisos. Eocè-Oligocè. |
| PEcg | Eocè Conglomerats heteromètrics. Eocè. |
| PElg | Bartonià - Priabonià Argils, llims i sorres. Bartonià inferior-Priabonià inferior. |
| PEm | Bartonià Margues blaves fossilíferes amb limóites vermelles. Bartonià. |
| PEmcp | Margues i gresos bioclàstics. Bartonià mitjà. |
| PEcgm | Conglomerats, gresos calcaris i margues. Bartonià inferior. |
| PEgg | Microconglomerats i gresos de composició arcòsica. Formació Gresos de Folgueroles. Bartonià inferior. |
| PEll | Llims sorrenca amb fauna. Bartonià inferior. |
| PEga | Lutecià - Bartonià Conglomerats, gresos i argiles. Formació Bracons i Rupit. Lutecià inferior-Bartonià inferior. |
| PEmb | Lutecià Margues i argiles blaves. Formació Margues de Banyoles. Lutecià. |
| PEgr | Conglomerats i gresos vermells. Formació Romegats. Lutecià inferior. |
| PEcn | Calçaries amb nummulits i calçaries gresoses. Lutecià inferior. |
| PEgc | Cuisià Gresos i conglomerats. Cuisià. |
| PPEa | Paleocè - Eocè Argiles i gresos. Paleocè-Eocè inferior. |
| PPEc | Ilerdià Calçaries i dolomies. Ilerdià. |
| F1a | Mesozoic Triàsic - Juràssic Filons de lampròfirs. Triàsic-Juràssic. |
| Pze | Paleozoic Episilites. Paleozoic (?) |

| | |
|-----------------------|--|
| Qt2 | Terrassa fluvial. Graves, sorres i lutites. Plistocè terminal-Holocè basal. |
| T_Qt2 | Terrassa del Ter i afluents. Es troba entre 5 i 10 m sobre el nivell del riu. Plistocè terminal-Holocè basal. |
| Plistocè | |
| Qc | Crostes de calç. Plistocè. |
| Qg | Peu de mont (enderrocs de pendent i fàcies proximals de ventalls al·luvials). Plistocè. |
| Qtr | Travertins. Plistocè. |
| T_Qt3 | Terrassa del Ter i afluents. Es troba entre 30 i 40 m sobre el nivell del riu. Plistocè. |
| Qt3 | Terrassa fluvial. Graves, sorres i lutites. Plistocè superior. |
| Qv2 | Blocs, graves, sorres i argiles. Ventalls al·luvials correlacionables amb les terrasses fluvials Qt2. Plistocè superior. |
| Qv3 | Ventall al·luvial correlacionable amb Qt3. Plistocè superior. |
| Neogen | |
| Pliocè | |
| NPab | Intercalació de sorres arcòsiques i colades volcàniques basàltiques. Pliocè. |
| NPgg | Graves amb matriu sorrenca. Pliocè. |
| NPlac | Llims i sorres arcòsiques amb nivells d'argiles i conglomerats. Pliocè. |
| NPsa | Sorres arcòsiques amb nivells lenticulars d'argiles ocre. Pliocè. |
| Bosm | Basalts olivítics del vulcanisme de Sant Maurici. Pliocè inferior. |
| Miocè - Pliocè | |
| Boe | Basalts olivítics del vulcanisme de l'Esparrà. Miocè-Pliocè. |
| Bom | Basalts olivítics del vulcanisme de Maçanet de la Selva. Miocè-Pliocè. |
| NMPcg | Conglomerats, gresos i lutites. Miocè-Pliocè. |
| Bot | Basalts olivítics i toves breuoides del vulcanisme de Toses de Mar. Miocè superior - Pliocè inferior. |
| NMPa | Arcoses massives heteromètriques amb freqüents blocs inclosos. Límit Miocè-Pliocè. |
| Miocè | |
| Boh | Basalts olivítics del vulcanisme d'Hostafric. Miocè. |
| Bomi | Basalts olivítics del vulcanisme de les Mallorquines. Miocè. |
| NMcge | Graves, sorres i argiles ocre i vermelles. Conca neògena de l'Empordà. Miocè superior. |

Carbonífer - Permí

| | |
|----------------|---|
| Bd | Diorites. Carbonífer-Permí. |
| Ds | Diorita de Susqueda (de gabre a tonalita). Carbonífer-Permí. |
| Fap | Dics d'apïtes, pegmatïtes, leucogranits porfírics i porfirs leucogranítics. Carbonífer-Permí. |
| Fbc | Filons de berita, calcita i fluorita. Carbonífer-Permí. |
| Fdq | Filons de porfirs de diorïtes a quarzodiorïtes. Carbonífer-Permí. |
| Fgd | Filons de porfirs granodiorïtics. Carbonífer-Permí. |
| Fgf | Filons de porfirs granítics de feldspat alcalí-microsienita. Carbonífer-Permí. |
| Fglm | Filons de granòfirs, felsòfirs i microgranits. Carbonífer-Permí. |
| Fmg | Filons de roques bàsiques de composició monzonogàbrica a gàbrica. Carbonífer-Permí. |
| Fmm | Filons de porfirs monzonítics a monzonosienítics. Carbonífer-Permí. |
| Fpg | Porfirs granítics. Carbonífer-Permí. |
| Fps | Filons de roques de composició de sienítica a monzonodiorítica. Carbonífer-Permí. |
| Fq | Filons de quars. Carbonífer-Permí. |
| Ggd | Granodiorites i granits alcalins. Carbonífer-Permí. |
| Ggdp | Granodiorites porfíriques. Carbonífer-Permí. |
| Gggd | Granits i granodiorites. Carbonífer-Permí. |
| Ggrgt | Granit moscovític de gra mitjà. Conté granats com a accessori. Carbonífer-Permí. |
| Gl | Leucogranits. Carbonífer-Permí. |
| Glg | Leucogranits de gra groller. Carbonífer-Permí. |
| Glp | Leucogranits apïtics. Carbonífer-Permí. |
| Gp | Granits porfírics. Carbonífer-Permí. |
| Gpg | Porfirs àcids. Carbonífer-Permí. |
| mc_Capl | Alternança de pissarres i calcàries. Correspon als materials del Capl afectats per un fort metamorfisme de contacte. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permí. |
| mc_Caps | Fil·lites i cornubienites. Materials de la unitat Caps afectats per metamorfisme de contacte. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permí. |
| mc_COga | Cornienes, esquistes i fil·lites pigallades. Materials de la unitat COga afectats per metamorfisme de contacte. Edat del metamorfisme: Carbonífer-Permí. |



Figura 7 (A.4.3).- Llegendra del mapa geològic comarcal de la Selva, (Base geològica 1:50.000 Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 2006).