



Universitat Autònoma de Barcelona

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** The access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

**Procedència i evolució dels sistemes sedimentaris de  
la conca de Jaca (conca d'avantpaís Sudpirinenca):  
Interacció entre diverses àrees font en un context  
tectònic actiu**



**Marta Roigé Taribó**

Tesi Doctoral  
2018

**UAB**

**Universitat Autònoma  
de Barcelona**

Facultat de Ciències  
Departament de Geologia





Departament de Geologia, Facultat de Ciències

Universitat Autònoma de Barcelona

Procedència i evolució dels sistemes sedimentaris de la  
conca de Jaca (conca d'avantpaís Sudpirinenca):  
Interacció entre diverses àrees font en un context tectònic  
actiu

Memòria presentada per Marta Roigé Taribó per optar al títol de Doctora en Geologia

Març, 2018

La tesi doctoral ha estat dirigida per:

Dr. David Manuel Gómez Gras, Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona

Dr. Eduard Remacha Grau, Departament de Geologia de la Universitat Autònoma de Barcelona

Dr. David Manuel Gómez Gras

Dr. Eduard Remacha Grau

Marta Roigé Taribó

Foto de la portada: panoràmica de la serra de San Juan de la Peña, amb els Pirineus de fons.

*A la meva família, als meus amics*

“La Vall és un petit paradís llunyà, remot, que gaudeix d’una pau divina”

Josep Pla

*“Units som una roca, dividits som sorra”*

Proverbi Africà

Aquesta tesi ha estat realitzada en el marc del Programa de Doctorat en Geologia, codirigida pel Dr. David Manuel Gómez Gras i pel Dr. Eduard Remacha Grau, i tutoritzada pel Dr. Josep Oriol Oms Llobet.

La realització d'aquesta tesi doctoral ha estat possible gràcies al finançament proporcionat per:

- Beca de Personal Investigador en Formació (PIF, Universitat Autònoma de Barcelona).
- Ministerio de Economía y Competitividad, projecte "From rifting to mountain building in inversion orogens: tectonic, sedimentary and geomorphologic records" (CGL2014-54180-P).
- Repsol, projecte "Maturity of turbidite sandstones: facies, petrographic study and variations along depositional dip" (2015).
- Jackson School of Geosciences (University of Texas at Austin).





## Índex

<b>Abstract/Resum</b> .....	9
<b>Capítol 1. Introducció</b> .....	13
1.1 Els estudis de procedència .....	15
1.2 La conca Sudpirinenca: antecedents .....	19
1.2.1 Marc geològic .....	19
1.2.2 Antecedents.....	21
<b>Capítol 2. Objectius i estructura de la tesi</b> .....	27
2.1 Interès i objectius del treball .....	29
2.2 Estructura de la tesi .....	31
<b>Capítol 3. Metodologia</b> .....	33
3.1 Recerca bibliogràfica i plantejament del treball de camp .....	35
3.2 Treball de camp .....	36
3.3 Treball de laboratori .....	38
3.4 Síntesi dels resultats i preparació d'articles .....	40
<b>Capítol 4. Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees)</b> .....	41
<b>Capítol 5. Recycling an uplifted early foreland basin fill: an example from the Jaca basin (Southern Pyrenees)</b> .....	57
<b>Capítol 6. Provenance constraints from coupling detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography in the Jaca foreland basin</b> .....	8¡Error! Marcador no definido.
<b>Capítol 7. New insights into the chronology of the South Pyrenean basin from U-Pb provenance data: the record of Miocene volcanic zircon in the San Juan de la Peña fan</b> .....	113

<b>Capítol 8. Interplay of multiple sediment sources in an overfilled foreland basin: axial versus transverse systems in the southern Jaca basin (Southern Pyrenees) .....</b>	<b>147</b>
<b>Capítol 9. Discussió integrada: Evolució composicional i paleogeogràfica dels sistemes sedimentaris de la conca de Jaca .....</b>	<b>179</b>
<b>Capítol 10. Conclusions .....</b>	<b>193</b>
<b>Referències .....</b>	<b>203</b>
<b>Agraïments.....</b>	<b>215</b>
<b>Annex 1: Provenance constraints on the Tremp Formation paleogeography (southern Pyrenees): Ebro Massif VS Pyrenees sources. ....</b>	<b>221</b>
<b>Annex 2: Interplay of multiple sediment sources in the south-central Pyrenean Basin (Late Cretaceous-Early Eocene): the role of the Ebro Massif as a source area .....</b>	<b>237</b>
<b>Annex 3 Situació de les mostres. ....</b>	<b>243</b>
<b>Annex 4: Resultats d'U-Pb en zircons detrítics.....</b>	<b>247</b>

# Abstract/Resum



## **Abstract**

Characterization of the sediment routing evolution in foreland basins gives insights on the tectonic and erosional history of the source areas. The Eocene to Miocene clastic systems of the South Pyrenean basin are a good natural laboratory to investigate paleoenvironment, source areas and sediment composition changes during the progressive evolution of a basin.

This thesis provides a multidisciplinary approach integrating sandstone petrography, clast point counting and detrital zircon U-Pb geochronology, applied in the Jaca basin sedimentary systems. This methodology is performed in the last turbiditic deposits from the Hecho Group, whose stratigraphic evolution from Lutetian deep-marine to deltaic and terrestrial environments during late Eocene-Oligocene times records a major tectonic and drainage reorganization in the active Pyrenean pro-wedge.

A main axially drained system sourced from eastern areas, located in the central Pyrenees, is here characterized during the Hecho Group turbidite sedimentation. However, the last turbiditic deposits from the basin, known as the Rapitán turbidite channel (Bartonian), record the first sediment input sourced from new northern source areas, created by the activity of Lakora/Eaux-Chaudes thrust. The abandonment of the turbiditic sedimentation is replaced by deltaic to terrestrial environments (Belsué-Atarés, Sabiñánigo and Campodarbe Formations), which record the interplay of axially fed systems, sourced from the central Pyrenees, with transverse fed systems derived from new northern source areas uplifted by the activity of the Gavarnie thrust. These new source areas are composed by Paleozoic and Mesozoic materials of the North Pyrenean Zone, and by the former turbiditic foreland basin deposits that are recycled into the alluvial fan systems. During Oligocene times tectonics controlled the replacement of the axially fed systems by the transverse fed systems, from north to south, and from east to west, according to the main direction of progradation of the deformation. This situation resulted with the displacement of the axially fed system towards the western margin of the basin.

The last stage of infill of the Jaca basin during Oligocene to early Miocene times consisted on the sedimentation of the alluvial deposits of the San Juan de la Peña fan (Bernués Formation), at the same time that alluvial sedimentation was initiated in the Ebro basin, by the Luna and Huesca which yielded to recycling of the former foreland deposits.

This thesis highlights the importance of integrating different provenance techniques in order to resolve ambiguous provenance signals which hinder the characterization of the sediment routing evolution, chiefly in active tectonic settings, where diverse source areas can occur.

## Resum

La caracterització de l'evolució dels sistemes sedimentaris en conques d'avantpaís contribueix a desxifrar la història tectònica i erosiva de les seves àrees font. Els dipòsits clàstics de l'Eocè fins al Miocè de la conca Sudpirinenca constitueixen un exemple natural magnífic per investigar els canvis en els paleoambients, en les àrees font i en la composició dels sediments durant l'evolució de la conca.

Aquesta tesi presenta un estudi integrat sobre la procedència dels sistemes sedimentaris de la conca de Jaca, basat en l'anàlisi petrogràfic de gresos, el comptatge modal de conglomerats i l'anàlisi geocronològic d'U-Pb dels zircons detrítics. Aquesta metodologia s'aplica concretament en els dipòsits que representen els últims estadis de sedimentació turbidítica durant el Lutecià (Grup Hecho), i la seva evolució als sistemes deltaics que culminen amb la continentalització de la conca, durant l'Oligocè (Formació Campodarbe). Aquest canvi en els ambients sedimentaris va acompanyat d'una major reorganització en les xarxes de drenatge, la qual és objecte d'estudi en aquest treball.

S'estableix un sistema principal de drenatge axial durant la sedimentació del Grup Hecho procedent d'àrees font situades a l'est i localitzades en els Pirineus centrals. En canvi, els últims dipòsits turbidítics, corresponents al canal del Rapitán (Bartonià) són interpretats com els primers indicis de creació d'una àrea font situada al nord, provocada per l'activitat de l'encavalcament de Lakora/Eaux-Chaudes. El posterior reemplaçament de la sedimentació turbidítica per ambients deltaics i continentals (Formacions Belsué-Atarés, Sabiñánigo i Campodarbe) es caracteritza per la interacció dels sistemes de drenatge axial, procedents dels Pirineus centrals, i els sistemes de drenatge transversal, procedents de noves àrees font situades al nord, creades per l'activitat de l'encavalcament de Gavarnie. Aquestes noves àrees font estan formades pels materials mesozoics i paleozoics de la Zona Nord Pirinenca i pels dipòsits turbidítics anteriors, els quals són reciclats en el ventalls al·luvials de la conca. Fruit de l'activitat tectònica emergent al nord de la conca, durant l'Oligocè els sistemes de drenatge transversal s'acaben imposant als de drenatge axial, i evolucionen, sobretot de nord a sud, i d'est a oest, guanyant espai en la conca d'acord amb el sentit d'avançament de les estructures, provocant el desplaçament del sistema de drenatge axial cap a posicions més occidentals.

Finalment, s'estableix un últim estadi de rebliment de la conca de Jaca a finals de l'Oligocè i Miocè inferior, representat pels dipòsits al·luvials del ventall de San Juan de la Peña (Formació Bernués), els quals coexisteixen amb els ventalls de Luna i Huesca, situats a la conca de l'Ebre, registrant el reciclatge de la conca Sudpirinenca.

Amb tot, en aquesta tesi es fa palesa la necessitat d'integrar diferents tècniques d'anàlisi de la procedència, per tal de desxifrar senyals ambigües, que dificulten la caracterització de l'evolució dels sistemes sedimentaris, sobretot en contextos tectònics actius, on coexisteixen diverses àrees Font que evolucionen ràpidament en el temps.

# Capítol 1

*Introducció*

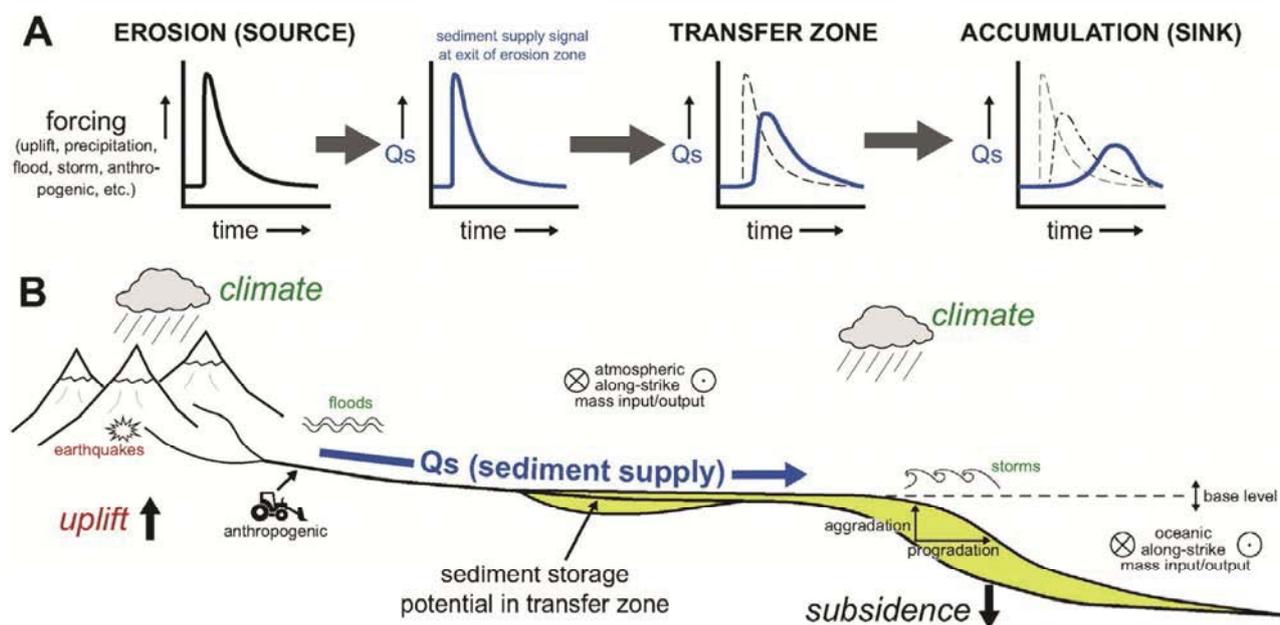




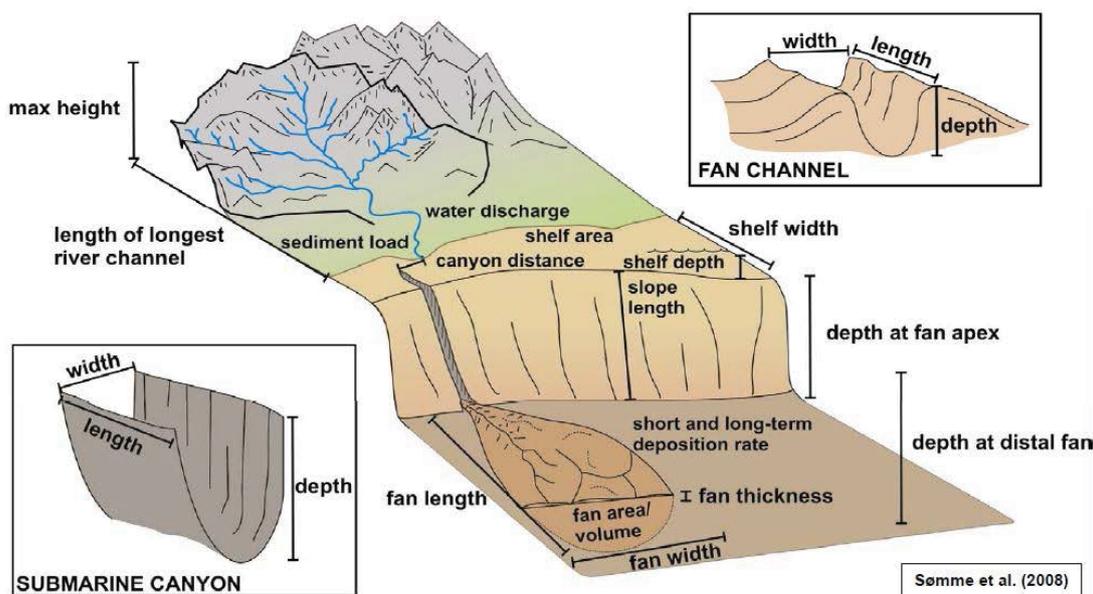
### 1.1 Els estudis de procedència

Els sediments constitueixen un registre inestimable sobre els processos geològics esdevinguts en el temps. Aquests poden enregistrar i preservar les signatures d'events geològics que afecten a les seves àrees font, així com els possibles canvis soferts durant el seu transport i posterior dipòsit. En aquest sentit, el concepte de *sediment-routing system* (Fig 1.1) ha estat emprat àmpliament en els darrers temps per designar tots els segments d'un sistema sedimentari, incloent les regions d'erosió, de transferència de sediment i de sedimentació, que connecten l'àrea font amb la conca sedimentaria (*source to sink*, Fig. 1.2) (Allen, 1997; Castelltort i Van Den Driessche, 2003; Allen i Allen, 2013).

La caracterització dels diferents paràmetres que influeixen en la generació de sediment, i la seva evolució al llarg d'un sistema àrea font-conca de sedimentació, és un dels principals focus d'atenció per la geologia sedimentària, on múltiples tècniques han contribuït al coneixement i la comprensió del registre estratigràfic. Alguns d'aquests paràmetres es refereixen a les característiques de l'àrea font, com ara el tipus de litologies aflorants, el relleu o el clima, i altres que incideixen més en la configuració de la conca, com ara la topografia o el seu gradient. La predicció dels volums de sediment que es remobilitzen al llarg d'un *sediment routing system* ha estat objecte de molts treballs de recerca (Paola *et al.*, 1992; Michael *et al.*, 2014), en que els balanços de sediment són especialment importants en la predicció de reservoris d'hidrocarburs (Fig. 1.2).



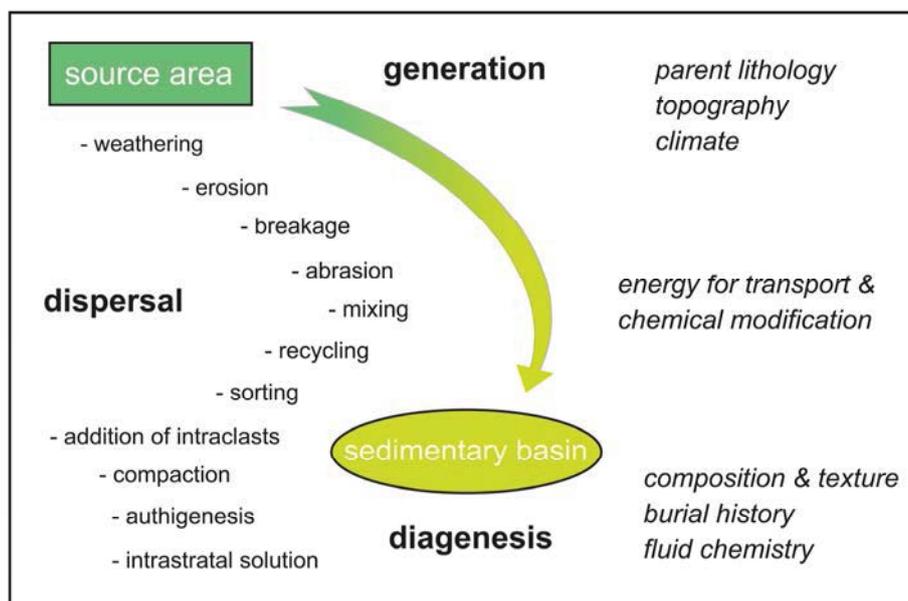
**Figura 1.1.** Perfil d'un model de *sediment-routing system* mostrant els sectors d'erosió, transferència i zones d'acumulació de sediment i els controls principals com poden ser el clima o el nivell de base en l'aport de sediment ( $Q_s$ ), i la senyal de propagació d'aquest al llarg del perfil ( extret de Romans *et al.*, 2016, després de Castelltort i Van Den Driessche, 2013).



**Figura 1.2.** Model conceptual d'un perfil *source to sink*, mostrant diferents paràmetres que poden contribuir a predir les dimensions d'un sistema sedimentari (extret de Sømme *et al.*, 2009).

A banda de l'estudi de la configuració d'un sistema sedimentari, l'anàlisi de la seva composició petrològica també ha estat objecte de nombrosos treballs, ja que la mineralogia dels grans que el configuren tenen un alt impacte en les propietats dels reservoris detrítics. Juntament amb l'estudi de l'estratigrafia seqüencial, els anàlisis petrològics han estat i són una eina molt valuosa en els estudis dels sistemes sedimentaris, i en la definició de les relacions àrea font-conca de sedimentació, ja que poden proporcionar informació referent a la paleogeografia, els patrons de les xarxes de drenatge o la localització de les àrees sotmeses a subsidència o a aixecament (Dickinson, 1970).

Un dels principals objectius de recerca pel que fa a l'anàlisi de conques, és establir l'origen dels grans que conformen un dipòsit sedimentari, és a dir, determinar la seva procedència. Els estudis de procedència van començar a ser emprats fa més de 100 anys, moment en el qual la fase de desenvolupament de la petrologia sedimentària es centrava en la descripció dels components principals dels dipòsits detrítics, així com de les associacions de minerals pesants continguts en ells (Lévy, 1978; Sorby, 1880; Dick, 1887). Als primers treballs ja s'intentava relacionar la composició dels grans, les àrees font, el context climàtic, i també s'hi van sumar la tectònica de plaques. En aquest sentit, els treballs per W.R. Dickinson (Dickinson i Suczek, 1979; Dickinson, 1985), van demostrar la influència de l'ambient geotectònic en la composició dels sediments que se'n derivaven. Això va permetre entendre que el clima, la tectònica, el relleu, el transport i la litologia de les àrees font, entre d'altres, tenen una clara influència en les composicions dels detritus que entra en el cicle de transport (Fig. 1.3). Des d'aleshores, altres tècniques s'han anat incorporant als estudis de procedència, com l'ús d'isòtops estables, anàlisis geoquímics, elements traça (Haughton *et al.*, 1991), i diverses tècniques de datacions geocronològiques i termocronològiques (Davis i Lin, 2003).



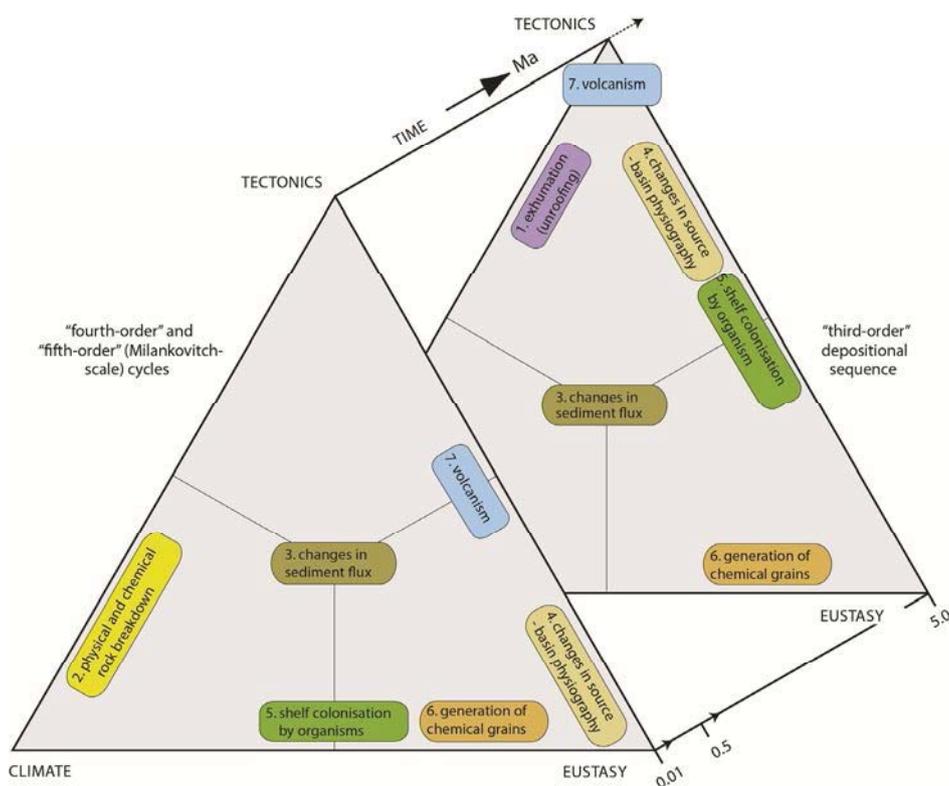
**Figura 1.3.** Principals estadis en l'evolució d'un sediment (en negreta) i els processos que poden modificar la composició d'aquest des de l'àrea font a la conca de sedimentació. En cursiva es detallen les característiques que afecten la resposta als diferents estadis com als processos al que és sotmès aquest sediment (extret de Weltje i von Eynatten, 2004).

En els últims temps, la gran quantitat d'estudis de procedència en sediments actuals ha contribuït notablement a millorar les interpretacions i els models clàssics, sobretot incorporant nous paràmetres a tenir en consideració sobre factors com la selecció hidràulica, la meteorització o la diagènesi (Garzanti *et al.*, 2007a; Andò *et al.*, 2012; Garzanti, 2015; Malusà *et al.*, 2016).

En l'avenç dels estudis de procedència ha quedat palès que aquests es troben subjectes a limitacions, en alguns casos importants. Aquestes limitacions poden venir donades per una gran varietat de processos i/o característiques. Per exemple, en contextos en els que intervenen múltiples àrees font o que es donen variacions litològiques en una mateixa àrea font o en els que són importants els processos de reciclatge, s'ha de ressaltar que les interpretacions sobre procedència són complexes, sobretot quan aquestes es basen en una única tècnica d'anàlisi (Nie *et al.*, 2012). En aquests contextos complexes, la integració de diferents tècniques de procedència pot resoldre, o reduir considerablement, les incerteses en les interpretacions. La integració de tècniques clàssiques, però bàsiques, com la petrografia sedimentària, amb l'anàlisi de minerals pesants, o la geocronologia i termocronologia, pot proporcionar una informació molt valuosa, que aquestes tècniques per si soles, no poden arribar a produir sense interrelacionar-se (Garzanti *et al.*, 2007b; Michael, 2013).

Els estudis de procedència no només requereixen la integració de diverses tècniques analítiques, sinó que la complementació amb la geologia regional, i amb altres disciplines, com ara l'estratigrafia seqüencial, pot ser clau per obtenir una major resolució en l'anàlisi de conques.

L'anàlisi detallat de la petrografia sedimentària en gresos ha estat clàssicament restringit als estudis de procedència i a les reconstruccions paleogeogràfiques. No obstant, ha quedat demostrat en diversos treballs que les discontinuïtats que delimiten les successions estratigràfiques van sovint acompanyades per canvis composicionals (Garzanti, 1991; Arribas *et al.*, 2007). En aquests casos és important establir el tipus de grans tenint en compte la seva composició (carbonàtic/no carbonàtic), el seu origen (intraconcal/extraconcal) i la seva temporalitat respecte el dipòsit en el aquests es troben continguts (coetani/no coetani) (Zuffa, 1980; Zuffa, 1985; Zuffa, 1987; Amorosi i Zuffa, 2011). A partir de la definició d'unes petrofàcies, és a dir, les característiques composicionals, obtingudes a través de l'anàlisi petrogràfic, i la seva integració en la estratigrafia definida, es pot arribar a relacionar els canvis composicionals amb els límits entre les diferents unitats estratigràfiques. En aquests sentit els tres majors controls al·logènics en una conca que controlen la composició dels sediments són la tectònica, l'eustatisme i el clima (Fig. 1.4) (Amorosi i Zuffa, 2011).



**Figura 1.4.** Factors al·logènics que controlen la composició dels sediments clàstics, en funció de la influència relativa de la tectònica, l'eustatisme i el clima. Tal i com es mostra en els diagrames triangulars, l'impacte de la tectònica, l'eustatisme i el clima varia en cada factor depenent de l'escala de temps observada (magnitud del cicle) (extret de Amorosi i Zuffa, 2011).

## 1.2 La conca Sudpirinenca: antecedents

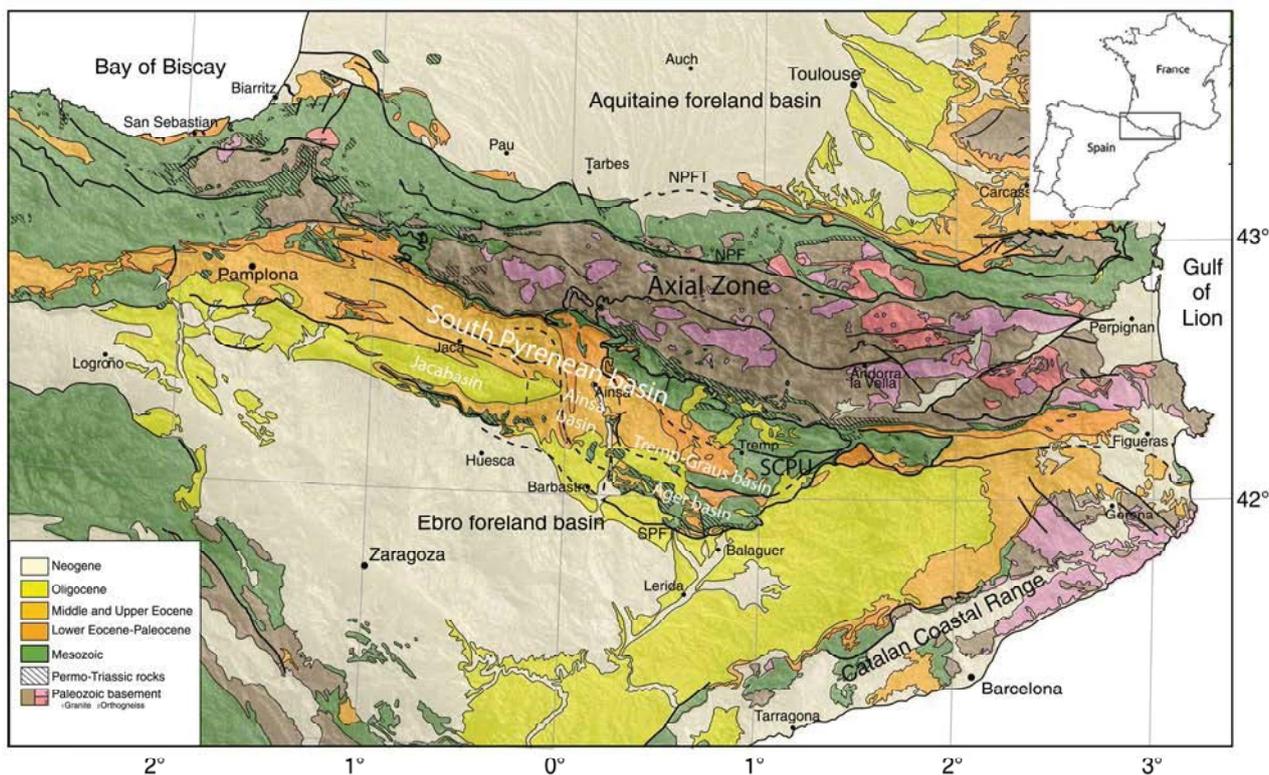
Les noves tècniques d'anàlisi de procedència han motivat l'impuls de la recerca referent a l'anàlisi de conques en els últims temps. Sobretot aquelles que permeten quantificar i datar d'una manera absoluta l'evolució dels sediments i les seves àrees font, com són els estudis termocronològics i geocronològics. Un exemple de l'expansió de l'ús d'aquestes tècniques és la conca Sudpirinenca, en la qual s'han dut a terme recentment nombrosos treballs per tal d'aportar noves dades sobre el creixement orogènic i la seva resposta en els sistemes sedimentaris (Fitzgerald *et al.*, 1999; Metcalf *et al.*, 2009; Beamud *et al.*, 2011; Whitchurch *et al.*, 2011; Filleaudeau *et al.*, 2012; Michael, 2013; Fillon *et al.*, 2013; Labaume *et al.*, 2016; Thomson *et al.*, 2017).

La present tesi doctoral es circumscriu en la conca Sudpirinenca, la qual constitueix un exemple àmpliament estudiat de conca d'avantpaís en un context compressiu. La qualitat dels afloraments, la seva preservació i les relacions tectònica-sedimentació que s'hi mostren han motivat la recerca referent tant en la seva vessant estructural com sedimentològica, estratigràfica i paleontològica, entre d'altres.

### 1.2.1 Marc geològic

La conca Sudpirinenca (Fig. 1.5) es troba incorporada en el cinturó de plects i encavalcaments que constitueixen els Pirineus, formats degut a la col·lisió entre les plaques Ibèrica i Euroasiàtica entre el Cretaci superior i el Miocè (Roure *et al.*, 1989; Muñoz, 1992; Teixell, 1998; Vergés *et al.*, 2002; Mouthereau *et al.*, 2014). Aquesta col·lisió es produeix de forma obliqua, originant una evolució orogènica diacrònica d'est a oest. L'orogen consisteix en un prisma de doble vergència, format per la Zona Nordpirinenca, delimitada per la conca de rerepaís d'Aquitània, i per la Zona Sudpirinenca, delimitada al seu torn per la conca d'avantpaís de l'Ebre (Fig. 1.5).

La Zona Nordpirinenca es troba constituïda per un seguit de conques mesozoiques invertides (Lagabrielle *et al.*, 2010), mentre que la Zona Sudpirinenca es caracteritza per un apilament d'encavalcaments de basament, que conformen la Zona Axial, formada per materials Paleozoics, connectant cap al sud amb les unitats de cobertura encavalcants, formades per materials Mesozoics i Cenozoics. És en aquest últim segment on es situen els materials sinorogènics de la conca Sudpirinenca, d'edat cretàica fins a miocena, els quals han motivat un gran nombre de treballs enfocats a reconstruir la paleogeografia de la conca durant aquest període de temps (Nijman i Nio, 1975; Mutti *et al.*, 1972; Valloni *et al.*, 1984; Nagtegaal i Weerd, 1985; Mutti, 1985; Fontana *et al.*, 1989; Puigdefàbregas *et al.*, 1992; Dreyer *et al.*, 1999; Vincent, 2001; Gupta i Pickering, 2008; Caja *et al.*, 2010; Whitchurch *et al.*, 2011; Gómez-Gras *et al.*, 2016; Thomson *et al.*, 2017).



**Figura 1.5.** Mapa geològic dels Pirineus, mostrant les conques d'Àger, Tresp-Graus, Ainsa i Jaca (de Mouthereau *et al.* 2014).

La conca Sudpirinenca es va formar inicialment com una conca estreta d'orientació est-oest, en connexió amb l'oceà Atlàntic fins a finals de l'Eocè (Costa *et al.*, 2010). En un primer estadi, aquesta conca era alimentada principalment per un sistema de drenatge axial, paral·lel a l'orogen, que progressivament va ser reemplaçat per sistemes de drenatge transversals, provocats per la creació de noves àrees font en el Pirineu central, i relacionats amb la intensa exhumació d'aquesta zona durant el Paleogen (Puigdefàbregas *et al.*, 1992; Fitzgerald *et al.*, 1999; Metcalf *et al.*, 2009).

Durant l'Eocè, aquesta conca acumulava sediments turbidítics (Grup Hecho) en el seu segment oest (Mutti, 1985), és a dir, en les sub-conques d'Ainsa i Jaca, les quals estaven alimentades pels sistemes al·luvials i deltaics de les conques *piggy-back* d'Àger i Tresp-Graus (Dreyer *et al.*, 1999), de la Unitat Sudpirinenca Central (en el sentit de Séguret, 1972). La present tesi s'emmarca en la conca de Jaca on, on la sedimentació turbidítica evoluciona a ambients continentals a finals de l'Eocè i Oligocè, constituint els últims estadis de rebliment de la conca (Mutti *et al.*, 1972; Puigdefàbregas, 1975).

A la conca de Jaca, les turbidites del Grup Hecho (Eocè inferior-mig) consisteixen en dipòsits de transició canal-lòbul i lòbuls tabulars (*sheet-like-lobes*) els quals evolucionen a dipòsits de plana submarina cap a l'oest de la conca (Remacha i Fernández, 2003). En aquests dipòsits turbidítics derivats de l'erosió d'àrees font

situades a l'est, es troben interestratificades puntualment diverses megaturbidites carbonàtiques les quals actuen com a veritables capes guia a nivell de conca, que deriven de la resedimentació de les plataformes carbonàtiques situades al marge sud de la conca (calcàries de Boltaña i Guara) (Soler-Sampere i Puigdefàbregas, 1970; Labaume *et al.*, 1985; Puigdefàbregas i Souquet, 1986; Barnolas i Teixell, 1994). El final de la sedimentació turbidítica es caracteritza per la presència de fàcies turbidítiques de canal (canal de Rapián) que presenten paleocorrents procedents del nord, les quals trenquen amb el patró generalitzat de transport est-oest, evidenciant un canvi paleogeogràfic important en la conca (Remacha *et al.*, 1995).

Paulatinament es va produint una somerització general a la conca i els ambients deltaics s'acaben imposant (Bartonià-Priabonià), representats per les Formacions Gres de Sabiñánigo i Belsué-Atarés (Hehuwat, 1970; Puigdefàbregas, 1975). Progressivament, i d'est a oest, seguint la direcció general de progració dels sistemes, aquests ambients transicionals van essent reemplaçats pels ambients fluvials i al·luvials, coneguts com a Formació Campodarbe (Puigdefàbregas, 1975). És durant la sedimentació de la Formació Campodarbe quan es dona el tancament de la conca, provocant l'inici d'un període endorreic, fa 36 Ma (Ortí *et al.*, 1986; Costa *et al.*, 2010). Els últims dipòsits preservats de la conca són els corresponents a la Formació Bernués, els quals es caracteritzen per fàcies al·luvials derivades de l'erosió dels terrenys situats al nord. Aquest dipòsits han estat atribuïts a l'Oligocè superior-Miocè inferior per Puigdefàbregas (1975), i a l'Oligocè inferior per Hogan (1993). Ambdues formacions (Campodarbe i Bernués) s'inclouen en l'anomenat Grup Campodarbe.

### 1.2.2 Antecedents

La majoria dels treballs paleogeogràfics i de procedència referents als Pirineus s'han centrat en desxifrar l'evolució dels sistemes sedimentaris de la conca Sudpirinenca durant el Paleogen. Sobretot, aquests estudis s'han focalitzat en les conques *piggy-back* d'Àger i Tremp-Graus, i es centren en la seva relació amb la sedimentació turbidítica a les conques d'Aínsa i Jaca durant els primers estadis d'exhumació de la part central del Pirineu.

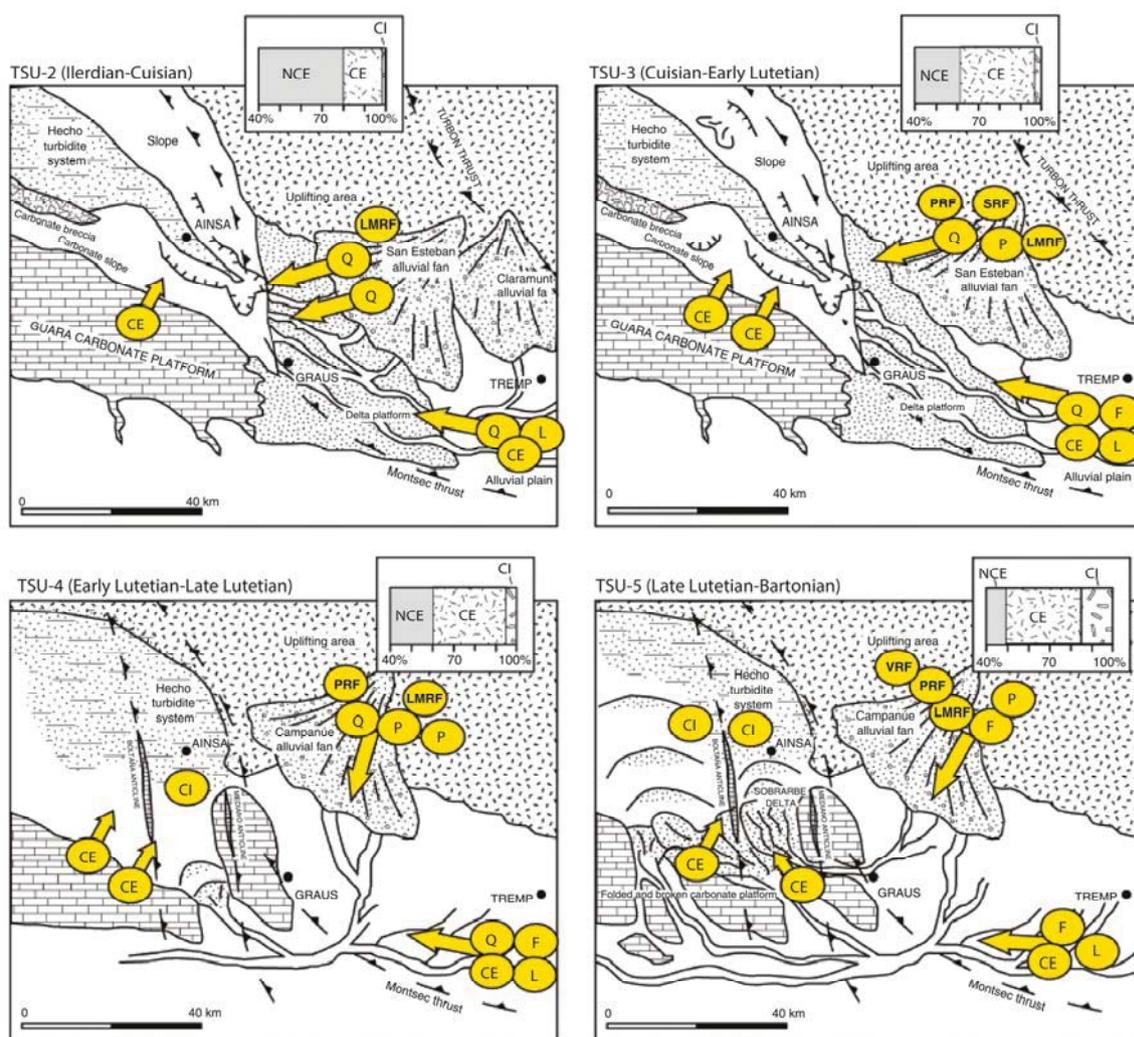
#### 1.2.2.1 La conca turbidítica eocena

Els estudis de Fontana *et al.* (1989) a les conques d'Aínsa i Jaca, i Caja *et al.* (2010) a la conca de d'Aínsa (Fig. 1.6) van caracteritzar la composició i procedència dels dipòsits turbidítics del Grup Hecho. Fontana *et al.* (1989) van definir tres petrofàcies, basades en els criteris de Zuffa (1980), el qual emfatitzava la coexistència de grans intraconcal i extraconcal, en gran part carbonàtics i que va definir com a gresos híbrids. Aquestes petrofàcies són litoarenites (*Sandstones*), gresos híbrids (*Hybrid arenites*) i calclites (*Calclithites*). A partir de la procedència dels grans, estableixen que la sedimentació turbidítica rebia components terrígens procedents



dels sectors localitzats a l'est de la conca, els quals estaven constituïts pel basament cristal·lí i metamòrfic (Zona Axial), i pels materials carbonàtics incorporats en les làmines encavalcant de la Zona Sud Pirinenca Central.

De particular interès en l'estudi de Fontana *et al.* (1989) és la tendència composicional que estableixen de base a sostre de cada sistema turbidític a partir de les proporcions entre grans carbonàtics intraconcal i extraconcal. Aquesta tendència consisteix en que a la base de cada sistema els components carbonàtics extraconcal són majoritaris (petrofàcies calcilites), els quals poden ser associats amb períodes de forta exhumació relacionada amb l'activitat dels encavalcaments, mentre que els grans carbonàtics intraconcal augmenten cap a sostre de cada sistema (gresos híbrids). L'augment en components intraconcal s'associa a la major producció d'aquests components quan s'imposen els ambients de plataformes carbonàtiques en moments de pujada de nivell del mar.



**Figura 1.6.** Mapa paleogeogràfic extret de Caja *et al.* (2010) mostrant la paleogeografia i l'evolució de les àrees font per cada Unitat Tectono-Sedimentaria durant la sedimentació del Grup Hecho a la conca d'Aínsa. Durant els estadis inicials la conca es nodria d'un basament paleozoic molt meteoritzat, mentre que en els estadis posteriors, la tectònica activa va exhumar roques fresques a la superfície, provocant un augment en els fragments de roca. NCE, grans extraconcal no carbonàtics; CE, grans carbonàtics extraconcal, CI, grans carbonàtics intraconcal; Q, quars; F, feldspat potàssic; P, plagioclasti; L, litics; LMRF, fragments metamòrfics de baix grau; PRF, fragments plutònics; SRF, fragments sedimentaris.

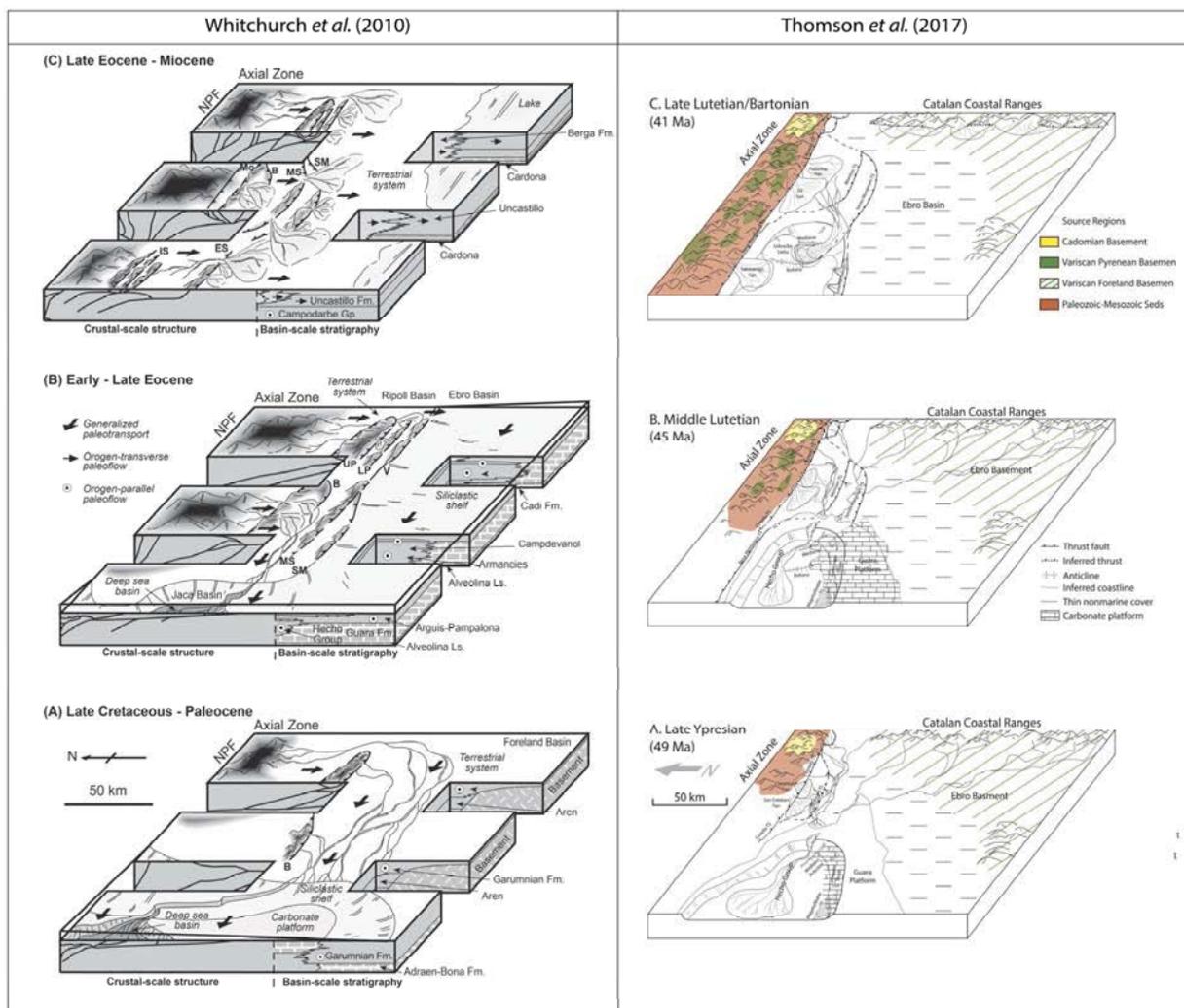
Caja *et al.* (2010) segueixen en aquesta línia d'estudi a la conca d'Aínsa i estableixen, a més a més, les contribucions litològiques de cada àrea font per a cada sistema turbidític (Fig. 1.6). Aquests autors descriuen una composició més quarzítica per als primers sistemes turbidítics de la conca (Ilerdià-Cuisià), que derivarien de l'erosió de materials Paleozoics fortament meteoritzats. En canvi, el contingut en feldspats i fragments de roca s'incrementen al llarg de la sedimentació turbidítica suprajacent (Cuisià-Lutecià), com a resposta a l'aixecament progressiu de la Zona Axial i de les unitats encavalcants de la Zona Central Sud Pirinenca.

Caja *et al.* (2010) també realitza diferents reconstruccions paleogeogràfiques en el temps, i destaca la presència d'una àrea font clarament situada al nord de la conca d'Aínsa, corresponent a la Zona Axial dels Pirineus, i també l'existència dels sistemes proximals (ambients deltaics i fluvials) de les conques d'Àger i Tremp. Precisament, l'àrea font d'aquests sistemes fluvials ha estat objecte de debat en nombrosos treballs (Whitchurch *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2017). Per Caja *et al.* (2010) aquests sistemes rebien aports de les àrees en vies d'aixecament al nord de la conca de Tremp, però també d'àrees font situades al sud, en el subsòl de la conca de l'Ebre i de la Serralada Costero-Catalana (Fig. 1.5).

El rol d'aquesta àrea font sud en els sediments de la conca Sudpirinenca ha estat en general poc investigat, no obstant, la possibilitat de la seva contribució com a àrea font activa s'ha de tenir en compte (veure Annex 1 i Annex 2). La importància de tenir en compte l'activitat d'aquesta àrea font queda palesa en alguns treballs com el de Whitchurch *et al.* (2011), en el qual les interpretacions a partir de les dades de geocronologia en zircons detrítics es realitzen només tenint en consideració aports de procedència pirinenca, sense contemplar l'activitat del marge passiu situat al sud. En canvi, l'estudi per Thomson *et al.* (2017) sí que té en compte l'activitat d'aquesta àrea font suplementària, que el fa obtenir una millor resolució en la reconstrucció paleogeogràfica de la conca (Fig. 1.7).

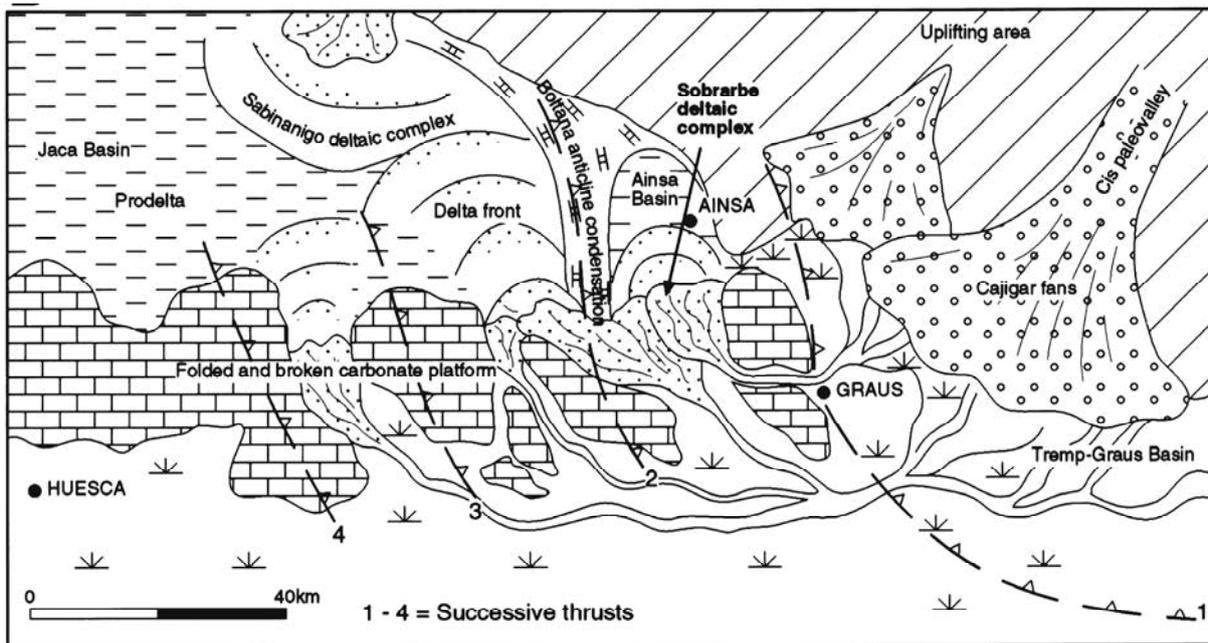
#### 1.2.2.2 La conca molàsica finieocena i oligocena

El reemplaçament de la sedimentació turbidítica a la conca Sudpirinenca es va donar de forma diacrònica (Lutecià-Bartonià), d'est a oest, seguint la direcció general de progració dels sistemes sedimentaris. El creixement de diverses estructures, com ara l'anticlinal de Boltaña (Fig. 1.8), condicionava en bona part la direcció de transport dels sistemes fluvials i al·luvials de la conca d'Aínsa que progradaven cap a la conca de Jaca.



**Figura 1.7.** A l'esquerra: reconstruccions paleogeogràfiques des del Cretaci fins al Miocè de Whitchurch *et al.* (2010), mostrant l'evolució de la conca Sudpirinenca sense tenir en compte l'àrea font sud (Massís de l'Ebre). A la dreta: mapa paleogeogràfic extret de Thomson *et al.* (2017) mostrant la paleogeografia i l'evolució de les àrees font per la conca Sudpirinenca durant l'Eocè, tenint en compte el rol de les àrees font sud.

A la conca d'Aínsa aquests sistemes correspondrien a les Formacions Escanilla i Graus, les quals eren alimentades per sistemes al·luvials del Sis i Gulp (Fig. 1.8) durant l'Eocè superior-Oligocè (Bentham *et al.*, 1992; Dreyer *et al.*, 1999; Vincent, 2001; Michael, 2013). A la conca de Jaca, els seus equivalents estarien representats pels sistemes deltaics de les Formacions Gres de Sabiñánigo i Belsué-Atarés, així com també pels sistemes fluvials de la Formació Campodarbe. Segons Puigdefàbregas (1975), aquestes últimes formacions presenten característiques composicionals i arquitecturals que evidencien la coexistència, d'una banda de sistemes derivats del nord de la conca de Jaca, els quals registren el reciclatge dels dipòsits turbidítics anteriors, i de sistemes que representen les parts distals de les formacions continentals de la conca d'Aínsa.



**Figura 1.8.** Mapa paleogeogràfic extret de Dreyer *et al.* (1999) mostrant la paleogeografia durant la instauració dels ambients continentals a la conca de Tremp-Graus i la seva evolució cap als sistemes deltaics de les Formacions Sobrarbe i Belsué-Atarés, sincrònica al creixement de les estructures.

No obstant, la falta de dades sobre la procedència d'aquests sediments a la conca de Jaca fa difícil interpretar la interacció de les diverses àrees font, així com la seva relació amb els sistemes de la conca d'Aínsa. Resoldre aquesta qüestió ha estat un dels principals objectius d'aquesta tesi, que ha estat tractat en el següent capítol (capítol 2).



## Capítol 2

*Interès, objectius i estructura de la tesi*



## 2.1 Interès i objectius del treball

Tal i com s'ha apuntat en la introducció, en un context amb múltiples àrees font que no presenten necessàriament litologies distintives, tal com succeeix als Pirineus, les interpretacions sobre procedència poden ser ambigües o poc fonamentades si aquestes es basen en una sola tècnica d'anàlisi.

En aquesta tesi s'empra un estudi de procedència detallat, integrant diverses tècniques per tal de contribuir al coneixement de l'evolució de les àrees font i els sistemes sedimentaris de la conca de Jaca. Tal i com es detalla en l'anterior capítol, són nombrosos els treballs sobre procedència i evolució paleogeogràfica que s'han centrat en les conques d'Àger, Tremp-Graus i Aínsa. En aquest aspecte, la conca de Jaca, la qual acumula la major part de la sedimentació distal de les mencionades conques, ha quedat oblidada en aquests treballs, sobretot en el que refereix a l'estadi de sedimentació molàssica, del que no existeix cap estudi sobre la procedència dels sistemes que la nodreixen.

A la conca de Jaca, la transició de l'estadi turbidític al continental ve acompanyada d'una reorganització en la configuració de la xarxa de drenatge. És precisament aquest estadi el que focalitza l'atenció d'aquesta tesi, on la tectònica controla la emergència de noves àrees font condicionant la dinàmica de tota la conca. A partir de la caracterització petrològica dels sistemes sedimentaris s'espera adquirir dades sobre la seva procedència dades que permetin realitzar les reconstruccions paleogeogràfiques des de l'Eocè mig fins al Miocè inferior.

Atenent a la premissa que afirma que en contextos actius, la tectònica pot causar canvis en la posició de les àrees font, i per tant, afectar a la composició dels sediments resultants (Amorosi i Zuffa, 2011), un dels principals objectius d'aquesta tesi és contribuir a la datació de l'activitat dels encavalcaments principals que tenen una influència determinant en els sistemes sedimentaris de la conca.

Tal i com s'ha mostrat en altres treballs de la conca Sudpirinenca (Fontana *et al.*, 1989; Caja *et al.*, 2010), els canvis en petrofàcies poden associar-se als canvis que es produeixen en la tectònica, o fins i tot en l'eustatisme. Per aquest motiu, un altre dels principals objectius d'aquesta tesi és establir les petrofàcies que permetin definir els canvis que es produeixen en el temps i en l'espai en la conca, per tal de caracteritzar la interacció entre les diverses àrees font actives durant el seu rebliment molàssic. Per tal d'integrar aquestes dades en el coneixement general de la conca Sudpirinenca, també en aquesta tesi s'ha considerat interessant ampliar l'estudi en seccions complementàries de les conques d'Aínsa i de l'Ebre, les quals contenen sistemes sedimentaris que van estar lligats genèticament amb els de la conca de Jaca.



Un altre dels objectius principals ha estat valorar la importància del procés de reciclatge dels sediments turbidítics, el qual queda particularment ben enregistrat en els ventalls al·luvials de la conca (Puigdefàbregas, 1975). La caracterització d'aquest procés resulta de particular interès, donat que el reciclatge de dipòsits clàstics es produeix en molts contextos, però sobretot en ambients tectònics de col·lisió com el que ens ocupa (Garzanti *et al.*, 2013), i per tant el seu estudi pot proporcionar informació sobre tectònica-sedimentació que sigui aplicable a altres zones d'estudi.

Els objectius concrets d'aquesta tesi són:

- Caracteritzar la composició petrològica dels gresos i conglomerats dels sistemes sedimentaris que representen els últims estadis de sedimentació turbidítica, i la seva evolució a ambients transicionals i continentals, els quals defineixen el rebliment final de la conca de Jaca.
- Identificar les diferents petrofàcies i determinar la seva procedència, per tal de reconstruir el marc paleogeogràfic de la conca, així com aportar noves dades sobre naturalesa de les àrees font de la conca Sudpirinenca. A partir de la definició de les petrofàcies s'espera poder definir les variacions espacials i temporals de les àrees font durant l'evolució tectonostratigràfica de la conca.
- Determinar la influència de l'activitat tectònica en la generació de noves àrees font, contribuint així al marc estructural i cronostatigràfic de la conca, per tal de documentar l'evolució i el moment d'emergència de la part interna del sector occidental del Pirineu oest-central. Es pretén definir la resposta dels sistemes sedimentaris a la creació de nous patrons de drenatge, i caracteritzar la major reorganització paleogeogràfica que va tenir lloc durant l'aixecament i creixement topogràfic dels Pirineus occidentals.
- Caracteritzar el procés de reciclatge dels dipòsits turbidítics durant la sedimentació al·luvial el qual es produeix com a conseqüència de la inversió de la conca, i determinar el seu efecte en les composicions petrològiques, mitjançant la integració de diferents tècniques d'anàlisi de procedència.

## 2.2 Estructura de la tesi

Aquesta memòria de tesi doctoral es presenta com un treball en format de compendi de publicacions, en la qual els capítols centrals corresponen a articles ja publicats en revistes científiques SCI (**capítols 4 i 5**), o bé enviats (**capítol 7**) o bé en preparació (**capítols 6 i 8**). El **capítol 1** és d'introducció la tesi, el present **capítol 2** exposa els objectius i l'estructura de la tesi, mentre que el **capítol 3** descriu la metodologia d'una forma general, ja que aquesta es troba ben detallada en cadascun dels capítols que mostren resultats. El **capítol 9** presenta una discussió integrada, i el **capítol 10** recull les conclusions més importants d'aquesta tesi. La bibliografia dels capítols en format article està inclosa en aquests, mentre que per la resta de capítols s'ha agrupat en l'apartat **Referències**. Els annexos contenen informació de suport a la tesi. L'**annex 1** consisteix en un article publicat, mentre que l'**annex 2** correspon a un pòster presentat en un congrés. L'**annex 3** presenta un mapa amb la localització de totes les mostres analitzades en aquesta tesi, i finalment, l'**annex 4**, presenta totes les dades tabulades d'U-Pb obtingudes en zircons detrítics.

Els capítols en format article han estat ordenats seguint la seqüència de rebliment de la conca de Jaca de nord a sud. Els **capítols 4, 5, 6 i 7** versen sobre la zona nord de la conca. Al **capítol 4** es descriu la petrologia i procedència de les últimes turbidites de la conca i la seva evolució als primers sistemes deltaics i al·luvials. El **capítol 5** detalla l'evolució deltaica i al·luvial del nord de la conca, descrivint acuradament la composició de les noves àrees font que s'estan generant. El **capítol 6** és un treball de procedència basat en geocronologia d'U-Pb en zircons detrítics, en el que es fa un esforç d'integració amb les dades petrogràfiques presentades en els anteriors capítols. El **capítol 7** sorgeix com a conseqüència del sorprenent descobriment de zircons d'edat cenozoica en el ventall més jove de la conca el qual fa replantejar la cronostratigrafia establerta. I per últim, en el **capítol 8 es caracteritzen petrogràficament** alguns afloraments de la conca de l'Ebre i la conca d'Aínsa per tal d'establir la seva correlació amb les unitats sedimentaries de la part sud de la conca, i, .

- Capítol 4: Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Daza, R., Boya, S., 2016. *Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees)*. *Comptes Rendus Geosciences* 348, 236-245. doi:10.1016/j.crte.2015.10.005
- Capítol 5: Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Boya, S., Viaplana-Muzas, M., Teixell, A., 2017. *Recycling an uplifted early foreland basin fill: An example from Jaca basin (Southern Pyrenees, Spain)*. *Sedimentary Geology* 360, 1-21. doi:10.1016/j.sedgeo.2017.08.007

- Capítol 6: Roigé, M., Gómez-Gras, Stockli, D.F., Teixell, A., Remacha, E., Boya, S. *Provenance constraints from coupling detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography in the Jaca foreland basin*. En preparació.
- Capítol 7: Roigé, M., Gómez-Gras, Stockli, D.F., Teixell, A., Boya, S., Remacha, E., *New insights into the chronology of the South Pyrenean basin from U-Pb provenance data: the record of Miocene volcanic zircon in the San Juan de la Peña fan*. Terra Nova (enviat).
- Capítol 8: Roigé, M., et al. *Interplay of multiple sediment sources in an overfilled foreland basin: axial versus transverse systems in the southern Jaca basin (southern Pyrenees)*. En preparació.

A l'apartat d'annexos hi figuren una publicació més i una contribució d'un pòster. L'**annex 1** correspon a un article publicat en el que es caracteritza la naturalesa de l'àrea font situada al marge sud de la conca Sudpirinenca, la qual ha estat poc valorada i en el que es destaca la importància de la seva contribució. L'**annex 2** mostra l'evolució d'aquesta àrea font des del Cretaci fins a l'Eocè, tenint que ser considerada per tant com a àrea font potencial per als dipòsits tractats en aquesta tesi.

- Annex 1: Gómez-Gras, D., Roigé, M., Fondevilla, V., Oms, O., Boya, S., Remacha, E., 2016. *Provenance constraints on the Tremp Formation paleogeography (southern Pyrenees): Ebro Massif VS Pyrenees sources*. *Cretaceous Research* 57, 414-427. doi:10.1016/j.cretres.2015.09.010.
- Annex 2: Roigé, M., Gómez-Gras, D., Fondevilla, V., Boya, S., Poyatos-Moré, M., Oms, O., Remacha, E., Teixell, A., 2017. – *Interplay of multiple sediment sources in the south-central Pyrenean Basin (Late Cretaceous – Early Eocene): the role of the Ebro Massif as a source area*. 33rd IAS Meeting of Sedimentology, 10-12th October 2017, Toulouse. Poster presentation.

# Capítol 3

*Metodologia*



La present tesi s'ha realitzat desenvolupant una metodologia basada en la integració de diverses tècniques d'anàlisi de procedència de sediments. Tal i com ja s'ha apuntat en els capítols anteriors, la caracterització de les àrees font en la conca Sudpirinenca requereix per la seva complexitat abordar-la sota el paraigua d'un estudi multidisciplinari, tenint en compte l'ambigüitat que sovint mostren les senyals composicionals, les quals ofereixen diverses possibilitats d'interpretació sobre procedència si només s'utilitza una tècnica.

La metodologia emprada combina eines més clàssiques, com la confecció de columnes estratigràfiques, el comptatge modal de gresos en microscopi petrogràfic o l'estudi dels mineral pesants, amb les noves tècniques d'anàlisi de procedència com és l'estudi geocronològic de zircons detrítics.

En aquest apartat es descriu de forma general les tècniques emprades emprat per tal d'assolir els objectius descrits en l'anterior capítol, donat que es tracten de forma molt més acurada en cadascun dels capítols següents, realitzats en format en article (capítols 4,5,6,7 i 8).

### **3.1 Recerca bibliogràfica i plantejament del treball de camp**

La conca Sudpirinenca ha motivat nombrosos treballs d'investigació, sobretot referents a la seva estratigrafia i sedimentologia, els quals han estat claus a l'hora de plantejar les zones i els sistemes a estudiar i mostrejar. La recerca bibliogràfica no s'ha centrat només en la conca de Jaca, sinó que ha abastat tota la conca Sudpirinenca, involucrat diferents períodes de temps, per intentar extreure el màxim d'informació sobre l'evolució i contribució de les àrees font i la configuració de les xarxes de drenatge en la conca.

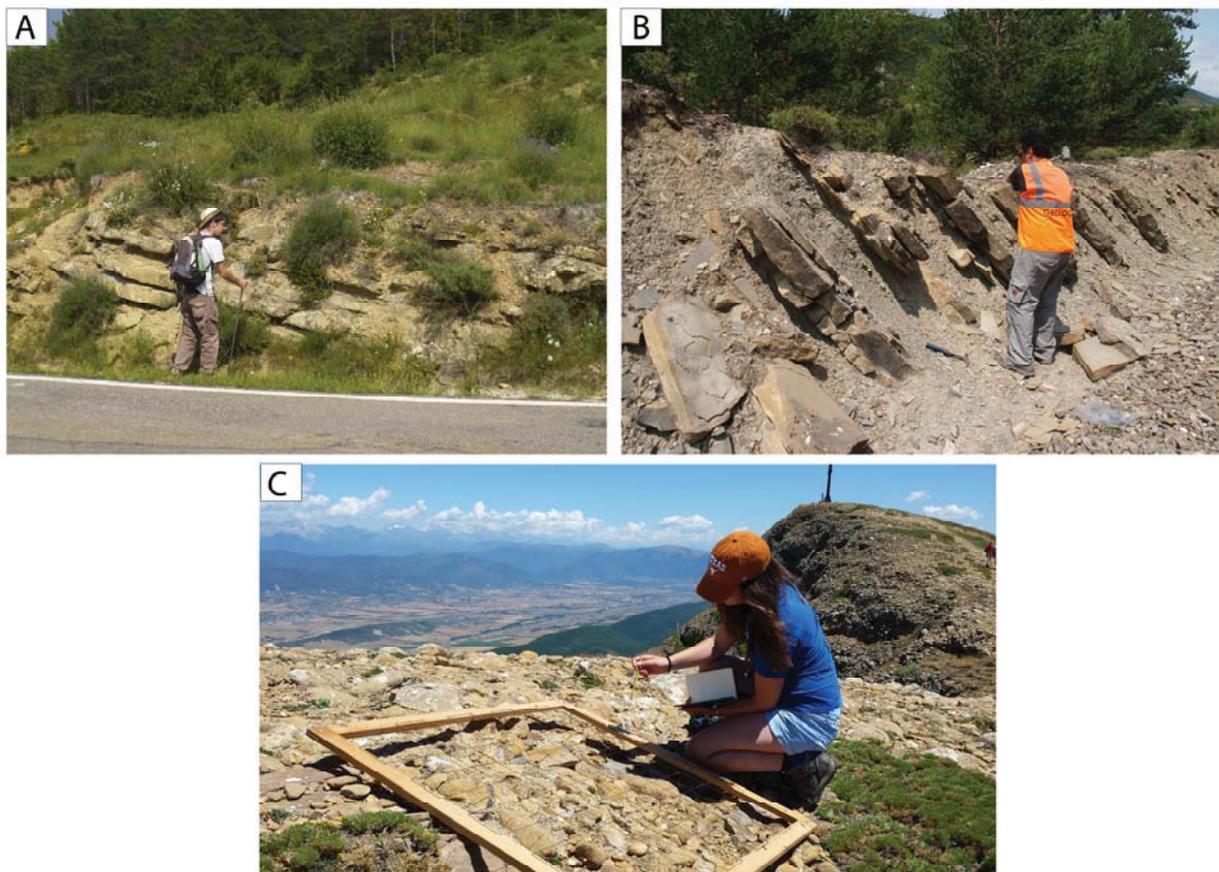
També s'han consultat la informació disponible referent als materials que conformen la vessant sud i nord dels Pirineus, i en menor detall altres sectors com la Serralada Costanera Catalana.

De l'anàlisi bibliogràfic es desprèn la existència d'una quantitat remarcable d'estudis de procedència que es centren en la part central-occidental de la conca Sudpirinenca (conques d'Àger, Tremp-Graus i Ainsa), mentre que la conca de Jaca ha quedat més al marge en quan a aquests tipus d'estudis. Els treballs existents són bàsicament estratigràfics, cronoestratigràfics o tectònics i han proporcionat dades essencials que han permès el plantejament de la present tesi doctoral.

### 3.2 Treball de camp

El treball de camp ha consistit principalment en la realització de columnes estratigràfiques, en el mostreig dels gresos i en l'anàlisi petrològic dels clasts *in situ* i (Fig. 3.1). La distribució de les seccions estratigràfiques a mostrejar s'ha realitzat en funció de la distribució i representativitat d'aquestes en la conca, i s'ha organitzat de forma que permeti caracteritzar els canvis composicionals de la conca, tant en el seu marge sud com nord, i d'est a oest, seguint la principal progradació dels sistemes (veure Annex 3).

La distribució areal de les mostres de gresos per a l'estudi petrogràfics'ha establert en virtut a la representativitat dels sistemes analitzats, així com als possibles canvis detectats en les observacions al camp. En seccions especialment llargues sovint s'ha començat realitzant un primer mostreig preliminar, que ha estat posteriorment completat per un de més detallat en funció dels canvis petrogràfics observats amb el microscopi.

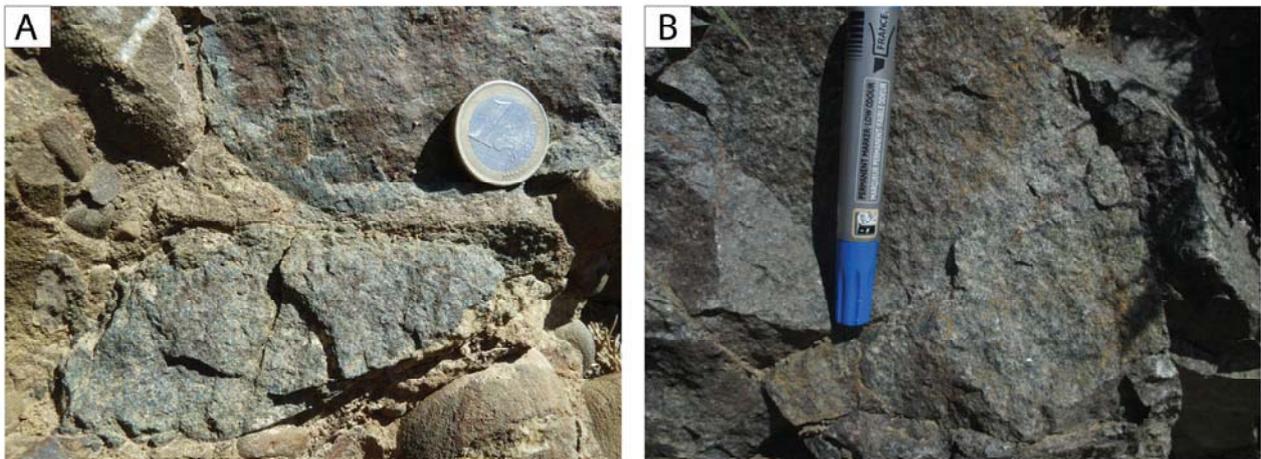


**Figura 3.1.** A) Realització de columnes estratigràfiques. B) Mostreig de gresos per a la identificació petrogràfica i per l'anàlisi dels minerals pesants. C) Comptatge *in situ* de la composició modal dels conglomerats.

La presa de mostres per a l'anàlisi de minerals pesants s'ha plantejat en funció dels canvis composicionals observats en làmina prima amb el microscopi petrogràfic de forma que cada sistema sedimentari analitzat estigui representat per un mínim de tres mostres.

El comptatge *in situ* de clasts de conglomerats s'ha realitzat d'acord a la metodologia especificada en cada capítol, la qual es basa en la descrita per Howard (1993). L'anàlisi de les litologies de la fracció rudítica s'ha dut a terme detalladament, incloent la classificació dels clasts en funció de les seves granulometries o textures cristal·lines. En casos en que la determinació de la litologia dels còdols ha estat més complicada, s'ha procedit a mostrejar-los per a classificar-los en làmina prima mitjançant el microscopi petrogràfic (Fig.3.2A).

Una altra part destacable del treball de camp efectuat ha consistit en el mostreig de possibles àrees font per a facilitar la identificació de les litologies dels còdols presents en els dipòsits conglomeràtics, en aquest sentit s'han inclòs diverses localitats de la vessant sud dels Pirineus, així com de la vessant Nordpirinenca de les que també s'ha obtingut una làmina prima (Fig. 3.2B). Així mateix, s'ha mostrat diferents sistemes detrítics dipositats en les subconques sudpirinenques adjacents com les d'Àger, Tremp-Graus i Aínsa per a establir possibles correlacions o bé per identificar les diferents àrees font actives en cada estadi de la conca i la seva evolució des del Santonià fins al Miocè.



**Figura 3.2.** A) Còdols de roques sub-volcàniques (ofites, color verdós) en els conglomerats de Santa Orosia. B) Ofites triàsiques de la zona de Bedous (Zona Nordpirinenca) potencials de ser la roca font dels còdols de la Figura 3.2A.



### 3.3 Treball de laboratori

El treball de laboratori ha consistit en l'anàlisi petrogràfic dels gresos, la separació i estudi dels minerals pesants i l'anàlisi geocronològic d'U-Pb en zircons detrítics.

L'anàlisi petrogràfic ha consistit en l'observació de làmines primes mitjançant el microscopi petrogràfic (Laboratori de làmines primes i Microscòpia de la Universitat Autònoma de Barcelona), que ha servit per escollir les més representatives per a procedir al seu comptatge modal, basat en els mètodes de Gazzi (1966); Dickinson (1970); Zuffa (1980); Zuffa (1985); Ingersoll *et al.* (1984). En total en aquesta tesi s'han realitzat 15 columnes estratigràfiques de les que s'han obtingut un total de 300 mostres, i s'han escollit 171 mostres per al seu comptatge. Els detalls del mètode de comptatge seguit es troben especificats ens els capítols 4, 5 i 8. Tal com s'explica en els capítols 5, 8 i 9, és a partir dels resultat petrogràfics obtinguts que s'estableixen unes petrofàcies que són utilitzades per determinar les seves relacions de procedència i que a la finalment serveixen com a base per a justificar els canvis paleogeogràfics principals a nivell de conca.

Les làmines primes de les mostres corresponents a les litologies mostrejades directament a les àrees font han estat simplement descrites i comparades amb els fragments de roca observats tant en els afloraments conglomeràtics com al microscopi. Tan mateix, les mostres dels sistemes sedimentaris del Cretaci fins a l'Eocè de la part central de la conca Sudpirinenca (conques de Tremp-Graus i Àger) han estat analitzades i s'incorporen en aquesta tesi en els annexos 1 i 2.

La separació dels minerals pesants (minerals amb densitat  $>2.9 \text{ g/cm}^3$ ) de 26 mostres corresponents a la part nord de la conca de Jaca es va realitzar al Laboratori de Minerals Pesants del *Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali* de la *Università di Bologna* (Itàlia), en una estada de recerca breu sota la supervisió del Dr. William Cavazza. Els procediments per a la separació mineral estan descrits en els capítols 6 i 7, i es basen en la metodologia proposada per Mange i Maurer (1992).

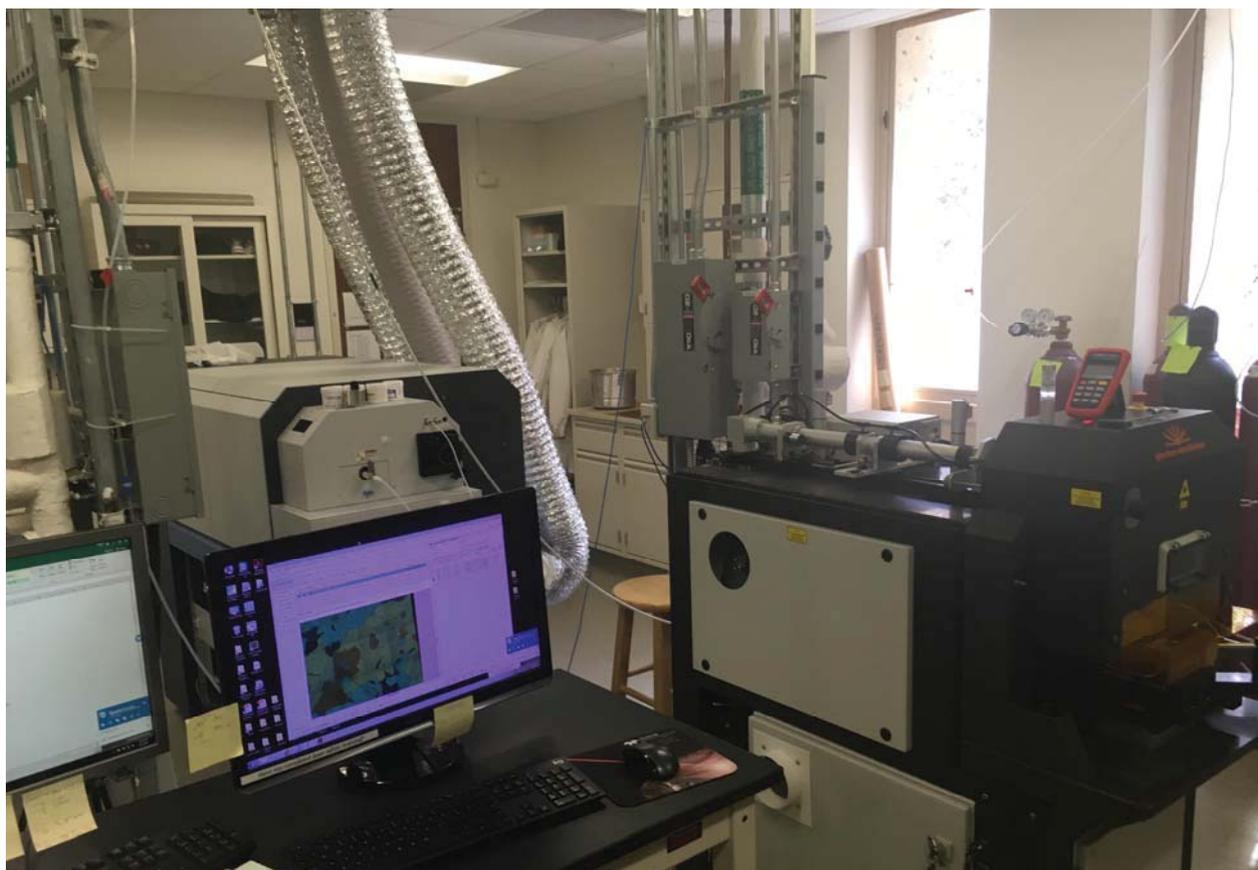
Els passos que es van seguir van consistir en la disgregació de les mostres (Fig. 3.3A), fins a aconseguir una mida sorra, de la que es van seleccionar només les granulometries inferiors a  $250 \mu\text{m}$ . En un següent pas, es va realitzar una primera separació relativa de densitats mitjançant la taula d'aigües (taula Gemini, Figura 3.3B). Després de la dessecació de les mostres, aquestes van estar sotmeses al separador magnètic Frantz (Fig. 3.3C) per tal d'evitar incloure els minerals altament magnètics, i finalment a la separació dels líquids densos (Fig. 3.3D) que va permetre obtenir dos fraccions de minerals pesats; aquells d'entre  $2.9 \text{ g/cm}^3$  i  $3.1 \text{ g/cm}^3$ , i aquells  $>3.1 \text{ g/cm}^3$ .



**Figura 3.3.** Fotografies dels diferents passos en el protocol de separació de minerals pesants. A) Premsa hidràulica per a fragmentar les mostres litificades. B) Taula d'aigües Gemini per aconseguir una primera separació de les fraccions pesades vers les lleugeres. C) Separador magnètic Frantz, el qual permet separar diferents tipus de minerals pesants en funció del seu magnetisme. D) Separació final mitjançant líquids densos ( $2.89\text{g/cm}^3$  i  $3.2\text{g/cm}^3$ )

L'objectiu de la separació de minerals pesants era obtenir les fraccions de zircons detrítics, per a utilitzar-los en l'anàlisi geocronològic (U-Pb) amb la finalitat d'obtenir les poblacions representatives de cada mostra (Davis i Lin, 2003). La descripció més acurada d'aquesta tècnica es porta a terme en el capítol 7, la qual consisteix en l'anàlisi de 120 zircons detrítics per cada mostra, per tal d'obtenir una distribució representativa de les edats (Vermeesch, 2004). Un total de 24 mostres van ser analitzades al laboratori *UTChron* de la *Univeristy of Texas at Austin* (Fig.3.4) sota la supervisió del Dr. Daniel Stockli.

Amb motiu d'haver obtingut edats cenozoïques en una mostra mitjançant la datació per U-Pb, es va realitzar una tècnica addicional, que és la doble datació dels mateixos zircons (veure capítol 7), mitjançant l'anàlisi d'(U-Th)/He per a establir l'edat exhumació d'aquests grans (Dickinson i Gehrels, 2009; Saylor *et al.*, 2012). Aquesta tècnica no estava prevista inicialment en l'estudi, no obstant, la rellevància de la presència d'aquests zircons va requerir l'ús d'aquesta per tal d'establir la determinació més plausible sobre l'origen d'aquests grans i la seva àrea font de procedència.



**Figura 3.4.** Equip d'anàlisi geocronològic LA-ICP-MS del laboratori *UTChron* a la *University of Texas en Austin* (*Jackson School of Geosciences*).

### 3.4 Síntesi dels resultats i preparació d'articles

Finalment, la redacció d'aquesta memòria de tesi ha estat presentada en format de compendi d'articles, on els capítols centrals corresponen a treballs bé publicats, bé enviats o en preparació. Una part important de la feina relacionada amb el desenvolupament de la tesi doctoral ha consistit en la preparació d'aquests articles, i en ells s'han integrat els resultats que s'han obtingut en el decurs de la tesi i que es troben sintetitzats en cada capítol.

## Capítol 4

*Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees)*

El capítol 4 presenta l'article publicat a la revista *Comptes Rendus Geosciences* publicat l'any 2016 com a part d'un volum especial sobre els Pirineus.

M. Roigé ha mostrejat totes les seccions, ha realitzat el comptatge de totes les mostres, excepte les corresponents al sistema turbidític de Jaca, i ha mesurat la columna estratigràfica de Yebra de Basa. Ha sintetitzat i classificat les mostres, i ha confeccionat tots els diagrames composicionals. També ha redactat la major part del text i ha realitzat totes les figures.

*Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Daza, R., Boya, S., 2016. Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees). Comptes Rendus Geosciences 348, 236-245. doi:10.1016/j.crte.2015.10.005*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631071315001704>







Supplementary information. Table 3 Clast compositional data (point counting on clasts) for the Santa Orosia and Canciás fans.

	JY-28 %	JY-30 %	JY-34%	JY-38%	JY-36%
Total siliciclastic extrabasinal	44	47	57	60	42
Total detrital quartz	0	0	2	0	0
Quartz	0	0	2	0	0
Total fine lithics	44	47	55	60	42
Plutonic r.f.	1	1	2	0	0
Subvolcanic r.f.	2	0	0	0	0
Hybrid silstone	0	0	0	2	0
Hybrid sandstone very fine	3	16	23	15	15
Hybrid sandstone fine	23	22	20	31	20
Hybrid sandstone medium	12	4	8	5	4
Hybrid sandstone coarse	2	3	2	4	0
Hybrid sandstone very coarse	1	0	0	2	2
Sandstone coarse	0	0	0	1	0
Conglomerate	0	1	0	0	1
Total carbonate extrabasinal	20	19	14	8	16
Mudstone grey	9	1	4	4	3
Grainstone	1	0	0	0	4
Bioclastic	1	0	0	0	0
Limestone with rudists	1	0	0	0	0
Grainstone with red algae	1	0	0	0	0
Mudstone white	2	1	0	0	0
Packestone-Grainstone grey	1	1	0	0	2
Mudstone orange	0	6	2	0	0
Mudstone black	0	1	0	0	0
Grainstone black	0	3	5	2	0
Wackestone grey	0	4	0	1	0
Packestone orange	4	2	3	1	0
Mudstone brownish	0	0	0	0	7
Total matrix	36	34	29	29	42
Fine-medium	0	0	0	0	42
Medium	36	34	0	29	0
Coarse-very coarse	0	0	29	0	0
Total cc	0	0	0	3	0
Cc intergranular	0	0	0	3	0
TOTAL POINTS	100	100	100	100	100



## Capítol 5

*Recycling an uplifted early foreland basin fill: An exemple from the Jaca basin (Southern Pyrenees)*

El capítol 5 correspon a l'article publicat a la revista *Sedimentary Geology* publicat l'any 2017.

M. Roigé ha mostrejat totes les seccions, ha realitzat el comptatge de totes les mostres i ha contribuït a la realització de totes les columnes estratigràfiques. Ha sintetitzat i classificat les mostres, i ha confeccionat tots els diagrames composicionals. També ha redactat la major part del text i ha realitzat totes les figures.

*Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Boya, S., Viaplana-Muzas, M., Teixell, A., 2017. Recycling an uplifted early foreland basin fill: An example from Jaca basin (Southern Pyrenees, Spain). Sedimentary Geology 360, 1-21. doi:10.1016/j.sedgeo.2017.08.007*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>



<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0037073817301811>

Supplementary information. Table 1 Sandstone compositional data (point counting analyses).

	SANTA CRUZ SECTION										CANCUN SECTION									
	1932%	1933%	1934%	1935%	1936%	1937%	1938%	1939%	1940%	1941%	1932%	1933%	1934%	1935%	1936%	1937%	1938%	1939%	1940%	1941%
Total siliceous extrabasinal	187.9	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67	187.67
Total detrital quartz	21.04	26.00	29.68	7.84	18.88	10.34	8.83	17.56	20.40	11.56	10.70	12.87	15.23	10.53	4.85	14.29	16.24	11.78	12.31	
Quartz monocrystalline	12.74	18.36	22.68	5.54	11.36	4.82	6.39	14.77	11.13	8.67	7.16	4.62	10.94	7.16	4.85	6.08	7.24	4.47	7.28	
Monocr. undulose quartz	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz syndetrital cement	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz poly. with 2-3 grains	1.93	3.44	2.84	1.53	2.66	1.50	0.38	1.40	2.57	2.12	1.56	2.34	2.15	0.38	0.97	3.33	2.74	0.97	0.75	
Qtz poly. with >3 subgrains	1.35	1.15	1.13	0.19	0.19	0.75	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Quartz keuper	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Quartz in metamorphic r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Quartz in sandstone r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz in hybrid sandstone r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz replacement on quartz	4.83	3.06	2.84	0.38	0.76	1.32	1.13	0.60	2.38	2.53	0.97	1.17	0.56	0.97	0.98	0.59	0.58	0.78	0.78	
Qtz replacement on feldspar	0.77	2.53	1.91	0.19	0.57	1.13	2.01	1.80	3.89	3.71	0.97	1.17	0.56	0.97	0.98	0.59	0.58	0.78	0.78	
K-feld in plutonic r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Plagioclase in plutonic r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Detrital Microcline	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Microcline in plutonic r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz replacement on K-feld	7.53	9.18	8.70	26.20	20.87	26.13	21.99	14.57	12.08	22.54	18.87	17.15	27.15	30.26	23.75	26.61	18.20	24.32	15.86	
Total line lithics	0.58	2.10	3.21	0.19	1.52	0.38	0.40	0.79	0.39	0.78	0.58	1.17	0.56	0.19	0.93	0.26	0.36	3.64	0.58	
Phyllites	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Shales	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Chertoid shale lithic	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Quartzite	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Plutonic r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz replacement on plit. r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Volcanic chert	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Volcanic lithic	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Volcanic lithic with microlitic	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Volcanic lithic with microlitic	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Sandstone r.f.	2.70	1.15	1.32	0.76	2.09	2.07	0.94	0.80	0.40	0.40	0.58	0.39	2.34	0.19	0.37	3.47	3.47	1.31	2.55	
Hybrid sandstone r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Siltstone r.f.	2.51	1.91	0.38	1.90	0.38	1.80	0.39	0.58	0.39	0.75	0.91	1.17	2.15	3.86	2.16	1.17	1.72	1.17	0.58	
Hybrid Siltstone r.f.	0.39	0.57	0.38	4.74	10.53	3.76	2.20	6.53	12.14	2.20	6.53	8.38	7.62	10.53	5.21	5.28	2.94	7.34	0.93	
Chert	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Mussel	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Biotite	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Heavy minerals	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Qtz replacement siltified r.f.	0.56	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Feld replacement r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Siltified limestone	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Radiolarite r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Alterite	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Total carbonate extrabasinal	37.45	39.58	33.46	37.28	36.43	35.15	37.41	35.73	30.50	39.50	35.41	28.27	35.55	39.10	14.29	28.18	39.14	32.82	38.99	
Monocr. sparite limestone	5.21	6.31	6.99	1.34	5.69	1.32	3.38	4.75	2.70	0.97	3.12	4.69	3.38	1.91	1.37	4.89	2.51	1.37	4.89	
Esparite polycrystalline r.f.	2.51	8.41	6.62	5.93	7.97	4.14	4.89	3.99	2.77	6.74	2.72	5.26	9.57	9.59	3.47	5.68	7.83	3.47	6.72	
Dolom. sparite poly. r.f.	1.74	0.19	0.38	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Biomeric	13.51	17.40	11.15	13.58	12.71	15.23	12.03	12.57	11.68	15.41	14.01	9.36	8.79	10.34	4.25	10.18	16.24	15.83	15.49	
Bioespatic	8.49	6.69	7.56	9.37	7.97	9.59	9.59	6.79	5.35	7.51	5.25	3.70	5.27	8.27	1.16	5.87	4.11	7.92	2.80	
Dolomericite r.f.	2.52	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Dolom. micropolytalline	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Biochert (grainstone r.f.)	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Dolom. Bioch. grainstone r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Dolom. bioch. Packs-Wackes r.f.	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Biomeric mudstone r.f.	0.19	0.38	0.57	4.78	1.90	4.51	5.64	2.40	3.17	5.78	5.84	4.09	6.05	5.83	3.09	3.72	5.68	2.12	8.21	
Dolom. Biom. mudstone	0.77	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Extrabasinal bioclasts	1.35	1.94	0.76	1.72	0.19	1.32	0.94	1.60	1.19	0.58	0.97	0.58	0.39	1.32	0.39	0.98	1.17	2.70	0.37	
Total carbonate intrabasinal	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Reworked calcareous clasts	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Unfossiliferous foraminifer	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Miliolites simple	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Nannulites	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Dolocyclone	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	
Adularite	0.19	0.19	0.1																	



Supplementary information. Table 2 Clast compositional data (point counting on clasts).

	Canciás section		Santa Orosia section					Sabi. Section	Peña Oroel section				San Juan de la Peña section			
	CANC8%	CANC18%	JY-28 %	JY-30 %	JY-34%	JY-38%	JY-36%	SAB5%	JJ9-1%	JJ16-3%	JJ21-1%	JJ25-2%	SP3-1%	SP4-5%	SP14-1%	SP15%
Crystal siliciclastic extrabasinal	58.3	33.3	44.6	47.0	57.8	60.0	49.0	50.0	58.8	65.3	66.5	78.9	38.6	55.8	72.2	59.8
Total detrital quartz	-	0.9	-	-	2.0	-	-	1.1	1.7	2.0	-	-	0.9	2.2	2.5	1.1
Quartz	-	0.9	-	-	2.0	-	-	1.1	1.7	2.0	-	-	0.9	2.2	2.5	1.1
Total fine lithics	58.3	32.4	44.6	47.0	55.9	60.0	49.0	48.9	57.1	63.3	66.5	78.9	37.7	53.5	69.6	58.6
Plutonic	-	0.9	1.0	1.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ophite	-	0.9	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volcanic	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hybrid siltstone	10.2	-	-	-	-	2.0	-	10.2	-	-	11.2	8.5	-	-	27.8	5.7
Hybrid sandstone vf	22.2	-	3.0	16.0	22.5	15.0	15.0	11.4	-	-	19.4	14.1	21.4	17.7	27.8	19.5
Hybrid sandstone f	17.6	18.0	22.8	22.0	19.6	31.0	20.0	14.8	53.3	52.0	21.2	35.2	8.8	30.1	7.6	31.0
Hybrid sandstone m	5.6	9.0	11.9	4.0	7.8	5.0	4.0	6.8	0.4	6.1	5.3	11.3	2.3	3.1	2.5	1.1
Hybrid sandstone c	2.8	-	2.0	3.0	2.0	4.0	-	1.1	-	-	2.4	2.8	-	-	-	-
Hybrid sandstone vc	-	-	1.0	-	-	2.0	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volcanic sandstone silex	-	-	1.0	-	2.0	-	7.0	2.3	3.3	3.1	5.9	7.0	5.1	2.2	3.8	1.1
Sandstone c	-	0.9	-	-	-	1.0	-	2.3	-	2.0	-	-	-	-	-	-
Sandstone m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conglomerate/Breccia	-	2.7	-	1.0	-	-	1.0	-	-	-	1.2	-	-	0.4	-	-
Quartzitic red conglomerate	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Radiolarite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metamorphic	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Crystal carbonate extrabasinal	18.5	55.9	19.8	19.0	13.7	8.0	9.0	23.9	7.5	6.1	7.6	8.5	18.6	13.7	5.1	8.0
Mudstone (grey)	16.7	53.2	7.9	1.0	3.9	4.0	3.0	9.1	4.6	4.1	4.7	7.0	2.3	-	3.8	5.7
Grainstone	-	2.7	1.0	-	-	-	4.0	-	-	-	-	-	0.5	4.4	-	-
Bioclastic	1.9	-	1.0	-	-	-	-	3.4	-	-	2.9	-	0.9	-	-	-
Biomicrite (grey)	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.3	-	1.1
Limestone with rudists	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wackestone (orange)	-	-	4.0	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grainstone with red algae	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.1
stone blanc (calc. Alveol)	-	-	2.0	1.0	-	-	-	2.3	-	-	-	-	-	-	1.3	-
Packstone-Grainstone (grey)	-	-	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mudstone (orange)	-	-	-	6.0	2.0	-	-	4.5	-	1.0	-	-	-	-	-	-
Black dolostone	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-	-	-	-	-	-	-
Grainstone (grey)	-	-	-	4.0	4.9	2.0	-	3.4	-	-	-	-	3.3	2.7	-	-
Packstone	-	-	-	1.0	-	-	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wackestone (grey)	-	-	-	4.0	-	1.0	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-	-
Packstone (orange)	-	-	-	2.0	2.0	1.0	-	-	2.5	1.0	-	1.4	11.6	1.3	-	-
Total intrabasinal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lacustrine limestone r.f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Silt soil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total matrix	23.1	10.8	35.6	34.0	28.4	29.0	42.0	26.1	33.8	28.6	25.9	12.7	42.8	30.5	22.8	32.2
Coarse	-	-	-	-	-	-	42.0	26.1	-	-	-	12.7	-	-	22.8	-
Medium	-	-	35.6	34.0	-	29.0	-	-	-	-	15.3	-	-	-	-	32.2
Very coarse	23.1	10.8	-	-	28.4	-	-	-	33.8	28.6	10.6	-	42.8	30.5	-	-
Total cc	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cc intergranular	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL POINTS	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

## Capítol 6

*Provenance constraints from coupling detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography in the Jaca foreland basin*

El capítol 6 correspon a un article en preparació.

M. Roigé ha mostrejat totes les seccions i ha realitzat la separació de minerals pesants durant una estada de recerca de tres mesos a la *Università di Bologna* (Itàlia). També va realitzar tots els anàlisis d'U-Pb en zircons detrítics al laboratori *UTChron* de la *Univeristy of Texas at Austin*. A part, també ha redactat tot el text i ha realitzat totes les figures.

## **Provenance constraints from coupling detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography in the Jaca foreland basin**

Roigé, M.<sup>1\*</sup>, Gómez-Gras, D.<sup>1</sup>, Daniel F. Stockli<sup>2</sup>, Antonio Teixell<sup>1</sup>, Eduard Remacha<sup>1</sup>, Salvador Boya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain

<sup>2</sup>The University of Texas at Austin, Department of Geological Sciences, Austin, TX 78712, USA

(\* ) Corresponding author

*Keywords: provenance, geochronology, Jaca basin, Pyrenees, zircon*

### ABSTRACT

The Eocene to Miocene clastic systems of the South Pyrenean basin are a good natural laboratory to investigate paleoenvironment, source areas and sediment composition changes during the progressive evolution of a foreland basin. We provide new detrital zircon (DZ) U-Pb data of the northern Jaca basin in the southern Pyrenees, where the evolution from Lutetian deep-marine to Early Miocene alluvial systems records a major tectonic and drainage reorganization in the active Pyrenean pro-wedge. Detrital zircon geochronology results show a clearly different signature between the Hecho Group turbidites and the alluvial fans which can be associated to a major change in source area. This change consists on a decrease of the Variscan-aged population, which can be associated with the replacement of axially-fed sediments from the east by transversely-fed sediments from the north.

Coupling of DZ U-Pb data with petrographic analysis allows a better resolution of the source-area shifts and a better discrimination between first-cycle zircon derived from Paleozoic plutonic rocks and multi-cycle zircon derived from the erosion of intermediate reservoirs (Mesozoic and Cenozoic). As the Upper Eocene-Early Miocene alluvial systems of the Jaca basin were fed from the erosion of the older Hecho Group foredeep turbidites, our study provides valuable insights on the response and propagation of detrital zircon U-Pb signatures during the recycling of sediment within the basin.



## 1. Introduction

Sediment provenance studies contribute to solve geological problems in a wide range of tectonic settings across the geological time. During the past decade detrital zircon (DZ) U-Pb geochronology has become a powerful provenance tool, widely applied in a successful way in a huge amount of case studies (Davis and Lin, 2003; Fedo *et al.*, 2003; Gillis *et al.*, 2005). Zircon is a heavy mineral very resistant to weathering and diagenetic processes, widely represented in crustal rocks. U-Pb dating of zircons constitutes an unequivocal tool chiefly in geological settings with distinct magmatic events, or in cases that sources exhibit diagnostic age distributions. Moreover, this technique can be applied to fine grained deposits, commonly avoided by other classical provenance techniques, like petrographic analyses. Nonetheless, some factors such as the presence of multiple source areas with similar DZ age distributions, or recycling and/or cannibalization of previous clastic rocks can complicate provenance interpretations, reproducing a distorted image of the source area (Dickinson *et al.*, 2009; Garzanti *et al.*, 2013). Other limitations like zircon fertility (Moecher and Samson, 2006; Dickinson, 2008), hydraulic sorting or grain size variations (Garzanti *et al.*, 2009) or climatic and weathering effects (Amidon *et al.*, 2005) on the source rocks are challenging factors to be faced. In these cases, integration with other provenance techniques can help to elucidate and solve ambiguous interpretations.

In the southern Pyrenees, the Jaca basin represents a magnificent example of sediment recycling, on which the well-known Eocene Hecho Group turbidites are uplifted and submitted to erosion, and re-deposited into the Eocene to Miocene alluvial fans (Puigdefàbregas, 1975; Teixell and García-Sansegundo, 1995; Roigé *et al.*, 2016). The excellent exposure of the evolution from deep-marine to terrestrial environments has motivated a great number of scientific research, mainly for stratigraphic, sedimentological and structural studies (Soler-Sampere and Puigdefàbregas, 1970; Puigdefàbregas, 1975; Mutti, 1985; Labaume *et al.*, 1987; Barnolas and Teixell, 1994; Payros *et al.*, 1999; Oms *et al.*, 2003; Remacha *et al.*, 2005; Boya *et al.*, 2015; Teixell *et al.*, 2016; Labaume *et al.*, 2016; Crognier, 2016; among others). Also provenance studies have been carried out, mainly applying conventional methods as sandstone petrography or heavy mineral analyses (Valloni *et al.*, 1984; Fontana *et al.*, 1989; Gupta and Pickering, 2008; Roigé *et al.*, 2013; Roigé *et al.*, 2016; Roigé *et al.*, 2017; Coll *et al.*, 2017). These works have contributed to the knowledge of the evolution of the sediment routing systems during a foreland stage mainly controlled by tectonics. It has been proved that a main drainage reorganisation occurs during the deep-marine to terrestrial transition, which consists on the change of axially-fed dominated systems, sourced from the east, by transverse-dominated systems with a northern provenance. This change is represented by a major shift on the nature of the source areas, from a turbidite deposits fed from Paleozoic basement rocks to alluvial deposits shed from the former turbidite rocks. According to these sediment routing changes, we apply for first time detrital zircon (DZ) U-Pb analyses

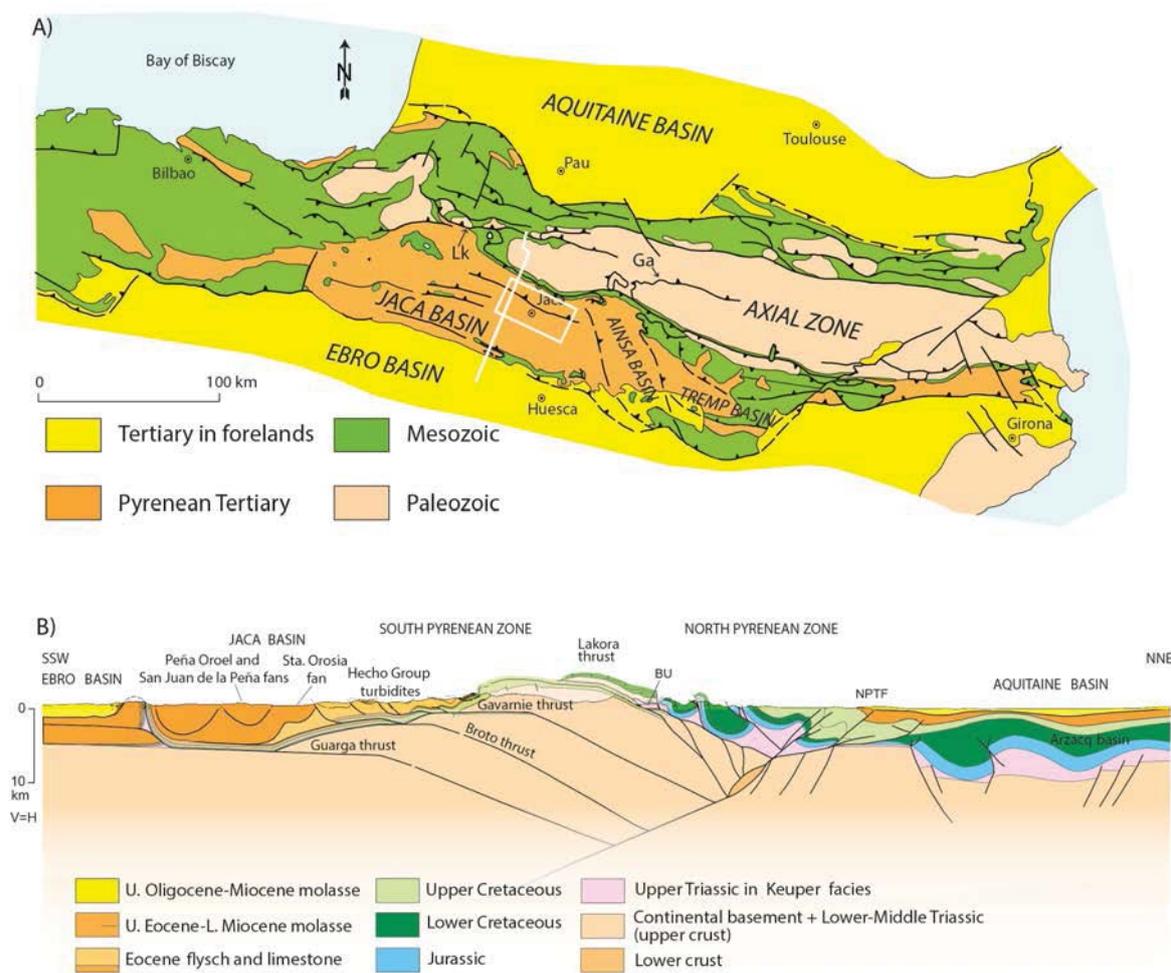
in the Jaca basin. The main aim of this study is: (a) to describe the zircon populations that are represented in the turbidites, deltas and alluvial fan systems of the Jaca basin, (b) to compare this results with the proximal-time equivalents of the nearby Ainsa and Tremp-Graus basins (Whitchurch *et al.*, 2011; Filleaudeau *et al.*, 2012; Michael, 2013; Thomson *et al.*, 2017), and (c) to contribute to the knowledge of the propagation of detrital zircon signatures during recycling processes.

In order to minimize limitations of provenance studies that incorporate single techniques in complex provenance evolution settings, we propose also a integration of the DZ U-Pb results with the sandstone petrography results published in Roigé *et al.* (2016) and Roigé *et al.* (2017).

## 2. Geological setting

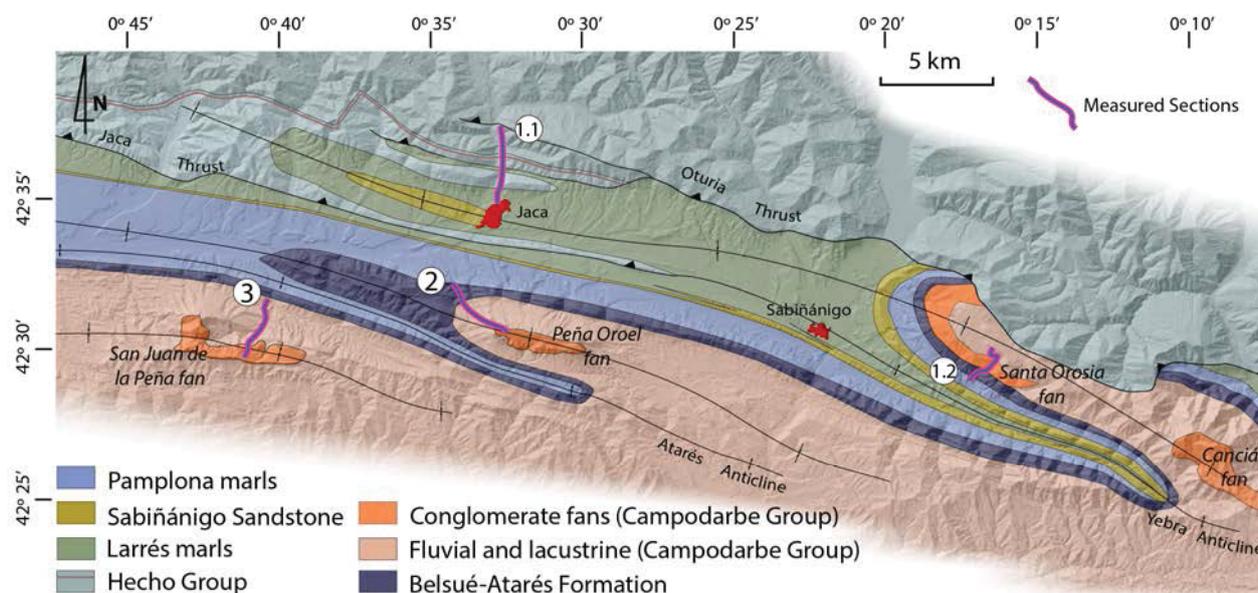
### 2.1 Geological and stratigraphic framework

The study area is located in the Jaca basin, which constitutes the western sector of the south Pyrenean basin (Fig. 1). The Pyrenean chain resulted from the collision between the European and Iberian plates during late Cretaceous-early Miocene times. The northern side of the belt is known as North Pyrenean Zone (Fig. 1) that flanked to the north by the Aquitaine retro-wedge foreland basin. The southern side (South Pyrenean Zone) is characterized by a basement-involved thrust stack that in the west-central Pyrenees is composed by four main thrust sheets, flanked to the south by the Ebro basin: The Lakora-Eaux-Chaudes, Gavarnie, Broto and Guarga thrust sheets (Fig. 1B). This thrust stack involve Paleozoic basement and a cover assemblage with preorogenic Mesozoic rocks and a foreland basin sequence of late Cretaceous-early Miocene rocks. The Paleozoic basement constitutes the core of the belt, and is mainly constituted by low-grade metamorphic rocks and granitoids, that are unconformably overlain by Permo-Triassic red beds, or directly by Cretaceous limestones. Synorogenic rocks from late Santonian to early Miocene constitute the South Pyrenean foreland basin, which record a major drainage reorganization from mid-late Eocene times (Whitchurch *et al.*, 2011) consisting on the replacing of an axial drainage network parallel to the orogen, to generalized transverse sediment transport.



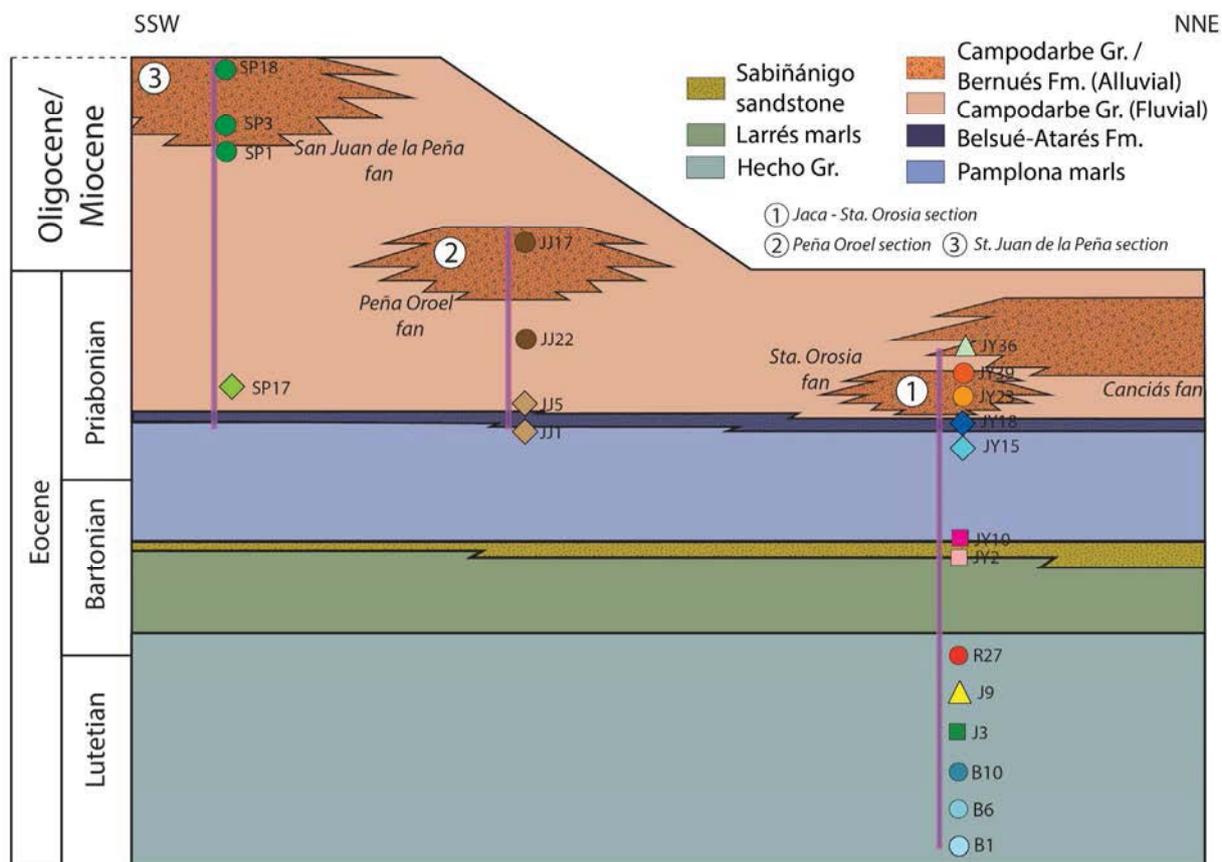
**Figure 1.** (A) Simplified geological map of the Pyrenees (redrawn from Teixell, 1996), showing the location of the study area (white frame). White line indicates cross-section in Figure 1B. Lk: Lakora thrust; Ga: Gavarnie thrust. (B) Crustal cross-section of the west-central Pyrenees (simplified from Teixell et al., 2016), showing both the South Pyrenean Zone and the North Pyrenean Zone. NPFT: North-Pyrenean Frontal Thrust; BU: Bedous Triassic Unit.

During Eocene times the Àger and Tremp-Graus basins (Fig. 1A) concentrated fluvio-deltaic sedimentation that funneled sediments to the west, in the slope and deep-marine Ainsa and Jaca basins (Nijman and Nio, 1975; Puigdefàbregas *et al.*, 1992; Caja *et al.*, 2010). In the Jaca basin, the deep-marine consisted on turbidites (lower-middle Eocene flysch, Hecho Group) and deltaic (Sabiñanigo and Belsué-Atarés deltas) to terrestrial deposits (upper Eocene–lower Miocene molasses, i.e. Campodarbe Group) during the overfilled stage (Puigdefàbregas, 1975; Labaume *et al.*, 1985; Mutti, 1985; Teixell, 1996) (Fig. 2).



**Figure 2.** Geological map of the northern sector of the Jaca basin modified from Puigdefàbregas (1975). Red-blue lines show the location of the three measured sections represented in Figure 9. Numbers refer to each section: (1) Jaca- Santa Orosia section; (2) Peña Oroel section; (3) San Juan de la Peña section.

In the Jaca basin, the Banastón and Jaca turbidites (Lutetian according to Labaume *et al.* 1985; Oms *et al.* 2003) constitute the upper part of the Hecho Group (Fig. 3), and represent sheet-like lobes changing to basin plain facies to the west (Remacha and Fernández, 2003; Remacha *et al.*, 2005). The Hecho Group turbidites were fed axially from the east, mainly sourced from erosion of the uplifting Pyrenees, including the South Pyrenean Central (Séguret, 1972), and the Ebro massif to the south (Caja *et al.*, 2010; Gómez-Gras *et al.*, 2016; Thomson, 2016). The last stage of turbidite sedimentation is represented by channelized facies (Rapitán channel) derived from new emerged source areas located to the north of the Jaca basin (Remacha and Picart, 1991; Roigé *et al.*, 2016). The deep-marine sedimentation is replaced by the delta front environments of the Sabiñánigo sandstone and Belsué-Atarés Formations (Bartonian-Priabonian according to Canudo and Molina, 1988; Hogan and Burbank, 1996; Oms *et al.* 2003) which display interference of eastern and northern source areas until the establishment of full terrestrial environments (Puigdefàbregas, 1975; Roigé *et al.*, 2017). Coastal and terrestrial deposits of the Jaca basin can be included into the so called Campodarbe Group, which includes de Campodarbe and Bernués Formations (Puigdefàbregas, 1975). They are represented by two main sediment routing systems: an east-derived fluvial system that enters through the southeastern zone of the basin, and north-derived alluvial fan systems that dominate the northern limb of the basin (Puigdefàbregas, 1975; Montes, 2002). The north-derived alluvial fans occupies an important part of this work. Its source area is mainly constituted by the Hecho Group turbidites, uplifted by the Gavarnie thrust, and the Mesozoic and Paleozoic formations of the North Pyrenean Zone (Roigé *et al.*, 2017).



**Figure 3.** General stratigraphic cross-section sketch summarizing the relationships of the analyzed sedimentary systems of the Jaca basin. Stratigraphic ages extracted from Labaume *et al.* (1985), Hogan and Burbank (1996) and Oms *et al.* (2003). Blue-purple bars indicate the position of the measured stratigraphic logs, and analyzed samples are represented according to their relatively stratigraphic position.

## 2.2 U-Pb characterization of potential source areas

The main potential sources defined for the analyzed systems of this work comprise different structural domains of the central and western Pyrenees (Fig. 1). These domains involve source rocks represented by the Paleozoic basement of the Axial Zone, the preorogenic Mesozoic cover successions and the synorogenic deposits from the late Cretaceous to middle Eocene.

Ordovician-Devonian metasedimentary deposits of the Axial Zone show detrital zircon U-Pb signatures dominated by components ranging from 520 to 700 Ma and minor components of Cadomian ages (420-250 Ma) and >700 Ma, while orthogneissic rocks range from 600 to 450 Ma (Hart *et al.*, 2016; Margalef *et al.*, 2016). Carboniferous strata are characterized by the dominance of Cambro-Devonian signals incorporating syndepositional volcanic zircons of around 325 to 360 Ma (Martínez *et al.*, 2015). The plutonic rocks of the Paleozoic basement have been dated using  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  and U-Pb geochronology (Whitchurch *et al.*, 2011 and

refs within). In the central Pyrenees, these plutonic rocks are mainly represented by Variscan granitoids with ages ranging from 280 to 315 Ma. Triassic clastic deposits are characterized by dominant Cadomian zircon ages and minor Variscan zircons (Hart *et al.*, 2016). Permian volcanic and upper Triassic and subvolcanic rocks are not expected to contain zircon grains due to their mafic composition. Cretaceous siliciclastic rocks are few but with different age distributions, ranging from Variscan-dominated signals in the lower Cretaceous Turbon Formation (Filleaudeau *et al.*, 2012) to the Cadomian-dominated signals for the upper Cretaceous Aren Formation (Whitchurch *et al.*, 2011). The Paleocene and Eocene formations in the nearby Ainsa, Tremp and Àger basins (Fig.1) show again different detrital zircon distributions depending on the provenance of the sedimentary systems, where dominant eastern Pyrenean Cadomian zircons are replaced by dominant central Pyrenean Variscan components through time, while supplementary sources from the Ebro massif provide abundant Cadomian components (Whitchurch *et al.*, 2011; Filleaudeau *et al.*, 2012; Thomson *et al.*, 2017).

The variability on zircon fertility among all the described source rocks can have an impact on detrital zircon age distributions of the studied deposits (Moecher and Samson, 2006; Dickinson, 2008; Malusà *et al.*, 2016). There is not any quantitative study about the zircon fertility in the Pyrenees, but a qualitative approach has been described in Thomson *et al.* (2017). Variscan granitoids are likely to have the highest zircon fertility, while the Cambro-Ordovician metasedimentary formations are expected to have a moderate zircon fertility (Hart *et al.*, 2016). Triassic sandstones are in contrast expected to have a high zircon fertility due to its dominant arkosic composition related to dominant crystalline source areas. Cretaceous to Paleocene formations are mainly represented by carbonates, and are therefore, expected to have a low zircon fertility. The Eocene clastic formations, including the Hecho Group turbidites, are here assumed to be moderate in zircon fertility, depending mainly on its sandstone compositional variations (from carbonate dominated to siliciclastic dominated).

### 3. Methodology

The Jaca-Santa Orosia, Peña Oroel and San Juan de la Peña sections were measured and sampled for detrital zircon geochronology analysis (Fig. 2). Twenty-four medium sandstone samples (2-5 kg) were collected along the stratigraphic sections (Fig. 2, 3) seeking for the most representative outcrop exposures. Samples were collected selecting medium to coarse sandstone beds, avoiding the reworked ones in order to minimize the effects of hydrodynamic grain size fractionation (Malusà *et al.*, 2016). Following the standard heavy mineral separation methods, samples were crushed and sieved to obtain the <250 µm fraction. Zircon grains were isolated using the Gemini water table separation, Frantz isodynamic magnetic separation and the heavy liquid separation (Bromoform and Methylene Iodide).

Mineral separation was performed in the heavy mineral separation laboratory of the Department of Biological, Geological and Environmental Sciences of the University of Bologna according to procedures described by Mange and Maurer (1992). All U-Pb analysis were performed at the UTChron facility at the University of Texas at Austin. Zircons grains were mounted onto double-sided adhesive plastic pucks, and were left unpolished (Campbell *et al.*, 2005; Hart *et al.*, 2017). For each sample 120 zircons were selected randomly and analyzed using the laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS) U-Pb geochronology, in order to obtain a representative provenance dataset (Vermeesch, 2004).

U-Pb analysis was performed using a PhotonMachine Analyte G.2 excimer laser with a HeLex 238 sample cell and a Thermo Scientific Element2 ICP-MS. *GJ1* was used as a primary standard (Jackson *et al.*, 2004), and *91500* (Wiedenbeck *et al.*, 1995), *Plesovice* (Sláma *et al.*, 2008) and *Pak1* were used as secondary standards, in order to obtain a data quality control. A 30  $\mu\text{m}$  laser spot ablated 15  $\mu\text{m}$  deep pits on the flat prism plane of the zircon grains. Data were reduced using VizualAge™ data reduction scheme for the Lolite™ on Igor Pro™ software (Paton *et al.*, 2011). During data reduction individual analysis were deleted if the grains were not zircon or there was evidence of errors in analysis.  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages are used for grains younger than 850 Ma, while  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ages are used for grains older than 850 Ma. Individual zircon ages were excluded if there was a  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$   $2\sigma$  error greater than 10%, or  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  discordance greater than 10% for grains younger than 850 Ma or  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age and  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  discordance greater than 20% for grains older than 850 Ma. All the ages are presented with two sigma absolute errors.

## 4. Results and discussion

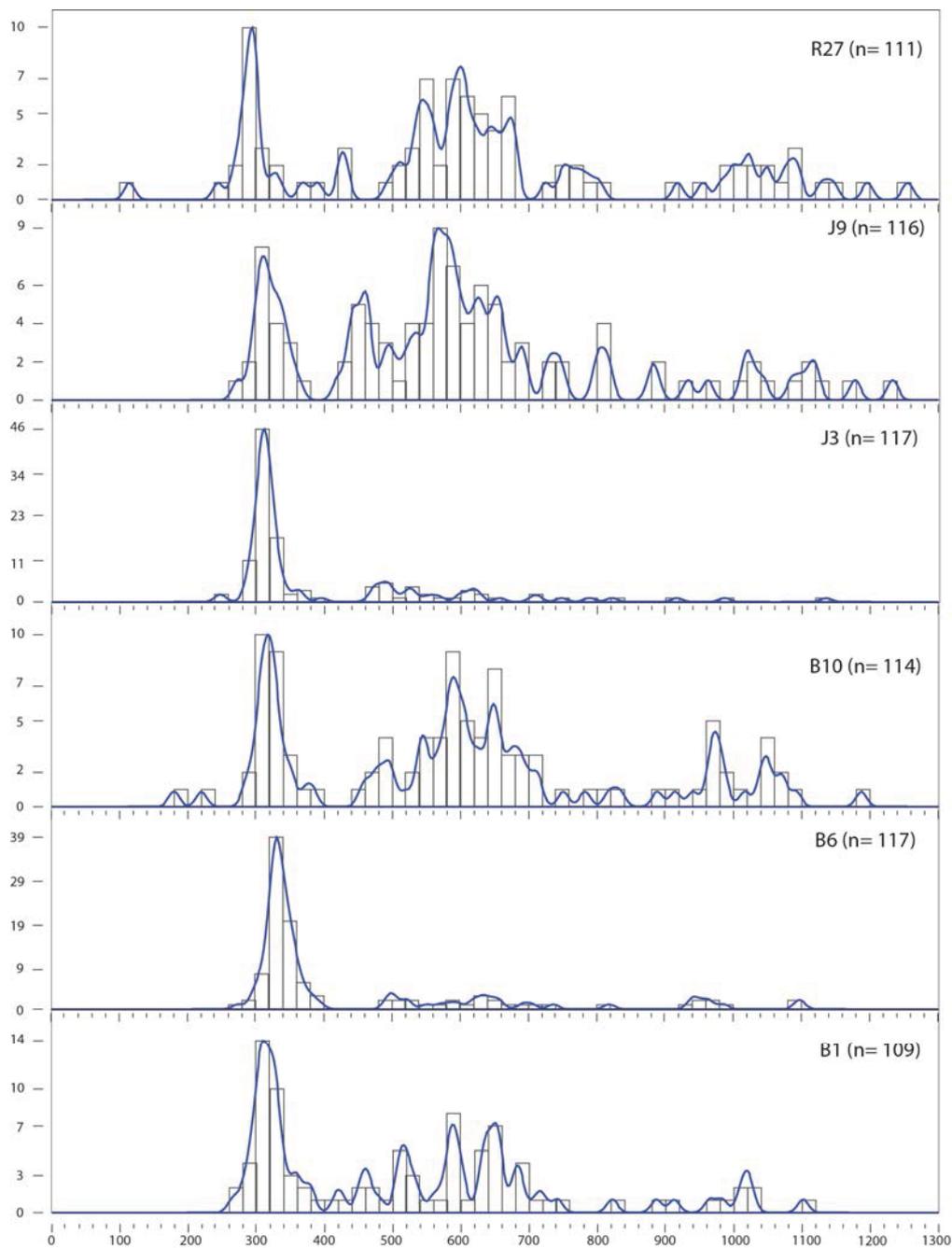
### 4.1 DZ U-Pb geochronology results

Analysis of 24 samples from the three measured sections yielded an amount of 2769 grain ages (see Annex 4 for full data). Detrital zircon U-Pb results are shown as kernel density estimation plots (KDE; Vermeesch, 2012) and histogram diagrams in Figures 4, 5, 6, 7, 8, and as pie charts in Figure 9.

#### 4.1.1 Jaca section

Samples from the Banastón turbidites (samples B1, B6 and B10) are characterized by the dominance of Variscan age components (280 to 380 Ma). At the base of this system early Variscan ages dominate, displaying central peaks around 330 Ma (Figs. 4, 9). From base to top of this system Variscan ages decrease, and are progressively replaced by Cadomian age populations. The overlying Jaca turbidite system (samples J3 and J9)

display a similar trend and starts with a marked increase on the Variscan ages, while upsection these populations decrease and are replaced by Cadomian and >700Ma populations.



**Figure 4.** Detrital zircon U-Pb results for the Hecho Group turbidites (see location in Figure 3), represented as Kernel density estimators (KDE) and histogram diagrams from 0 to 1300 Ma. Nonadaptative KDE bandwidth of 8 Ma; histogram bin width of 20 Ma.



The age distribution of the Banastón and lower Jaca turbidites are very similar to those contained in the proximal time equivalents of the Ainsa basin, in the upper Hecho Group (Whitchurch *et al.*, 2011; Thomson *et al.*, 2017). The dominant Variscan ages can be attributed to erosion of Variscan rocks of the central Pyrenees, consistent with paleocurrents and petrographic sandstone composition (Roigé *et al.*, 2016).

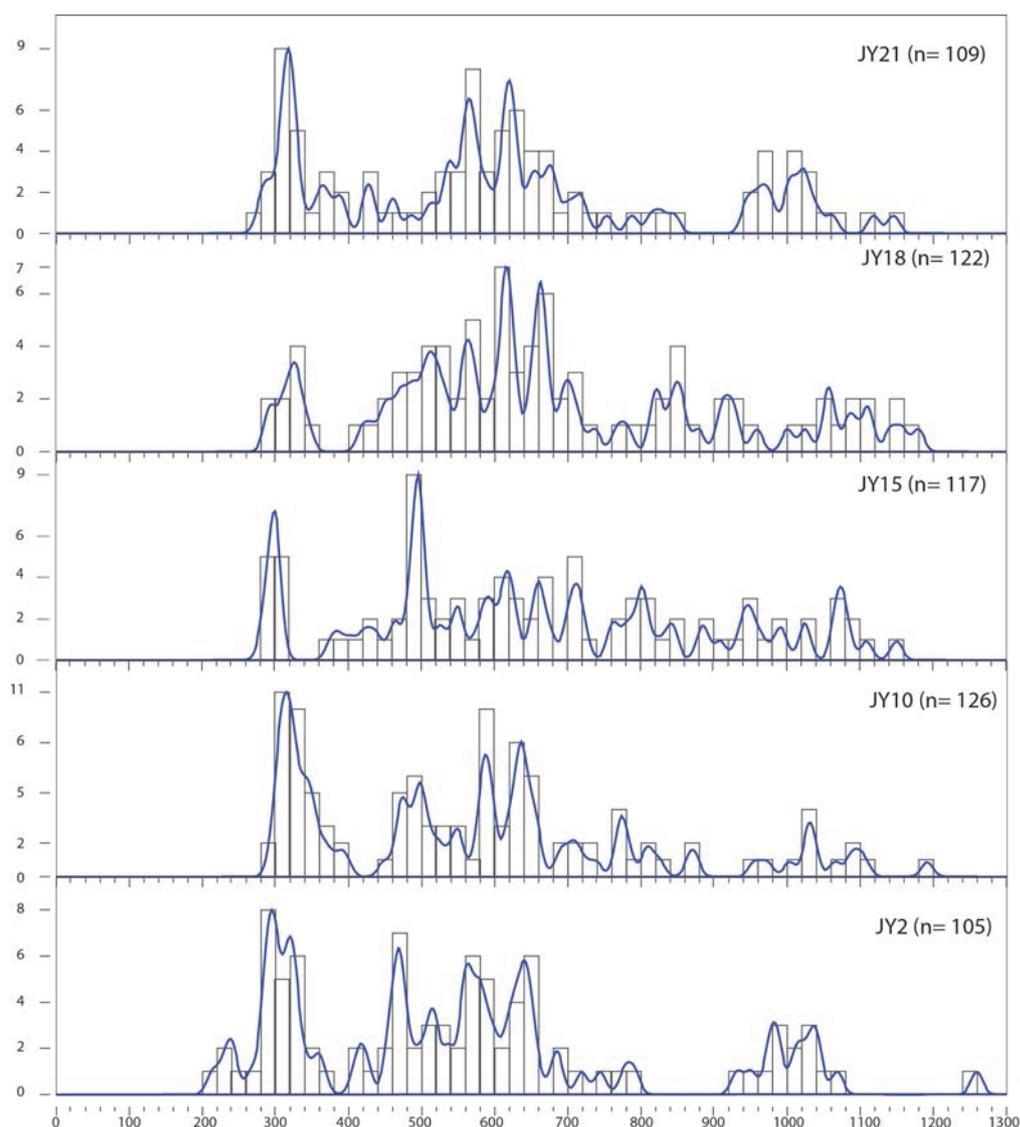
The last turbidite system (Rapitán channel, sample R27) shows a significant decrease on the Variscan populations, while Cadomian age and >700 Ma components dominate (Figs. 4, 9). For first time in the section, Mesozoic grain ages appear with age peaks placed at 115 Ma and 250 Ma. These change on the age distributions can be associated to the replacement of the eastern sources by a northern source constituted by less Paleozoic basement rocks, and more Mesozoic and Cenozoic deposits. This hypothesis is confirmed by the presence of the 250 Ma age signal that can be associated to the erosion of the Triassic sub-volcanic rocks, and with the 115 Ma signal, which can be related to erosion of volcanic lava rocks within the Cretaceous successions.

#### 4.1.2 Santa Orosia section

When compared to the last analyzed sample (Rapitán channel, sample R27) the first deposits of the Sabiñánigo delta (samples JY2 and JY10) display even a more important Permo-Triassic age population (ranging from 200 to 280 Ma) and a slight increase on Variscan signals.

Nonetheless, the important Cadomian age population can support also the interference of different sources areas, by the introduction of significant amounts of volcanic rock fragments, with some plutonic and metamorphic contributions. The overlying Atarés delta (samples JY15, JY18 and JY21) records an upsection decrease of the Variscan ages, while Cadomian and >700 Ma age dominate (Figs. 5, 9).

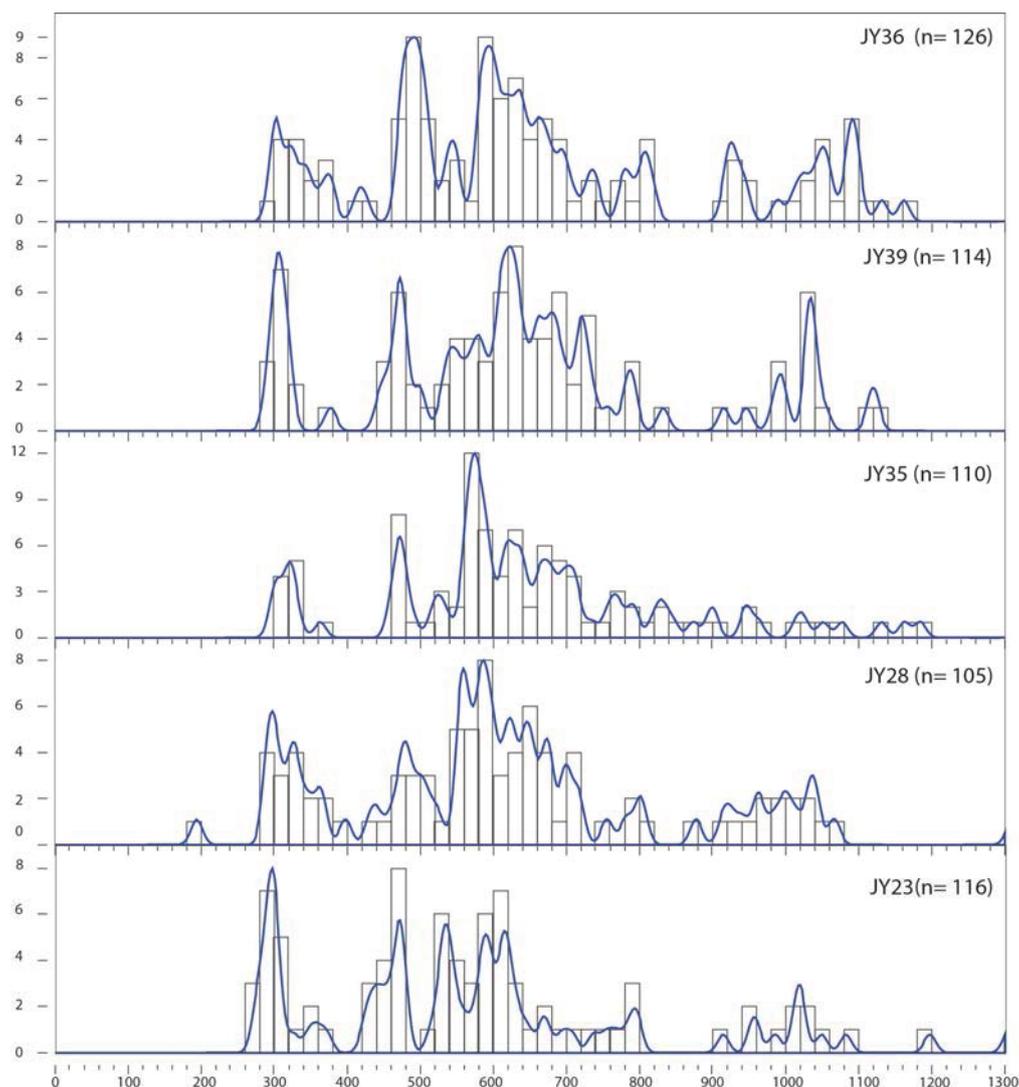
The first alluvial conglomerates of the Jaca basin (samples JY23, JY28, JY35, JY39 from the Santa Orosia fan and sample JY36 from the Canciás fan) show a homogenous age distribution, with minor changes, evidencing the continuous erosion of an unique source area (Figs. 6, 9). Three main age populations at 280 to 380 Ma, 450 to 850 Ma and 900 to 1200 Ma are shown in the age spectra of most of the samples. Once again, late Variscan components decrease towards the upper part of the section while the overwhelming representation of Cadomian and >700Ma ages are coincident with the highest contents of recycled turbidite clasts.



**Figure 5.** Detrital zircon U-Pb results for the Sabiñánigo and Atarés deltas in the Santa Orosia section (see location in Figure 3), represented as Kernel density estimators (KDE) and histogram diagrams from 0 to 1300 Ma. Nonadaptative KDE bandwidth of 8 Ma; histogram bin width of 20 Ma.

#### 4.1.3 Peña Oroel section

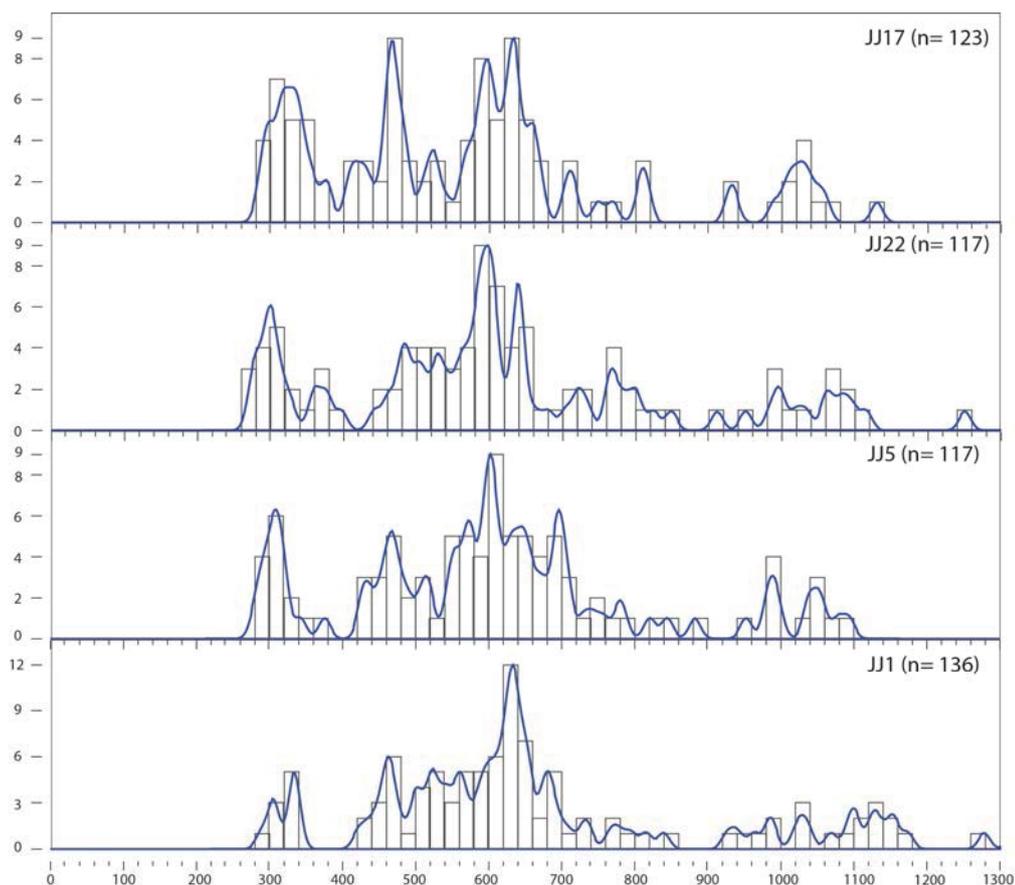
The Belsué-Atarés deposits in this section (samples JJ1 and JJ5) display also a dominant Cadomian population, with minor representation of Variscan age signals (Figs. 7, 9). Age distributions are very similar to those from the Santa Orosia conglomerates (Figs. 6, 7), which is in concordance with the equivalence between these deposits according their compositional features (Roigé *et al.*, 2017). The overlying conglomerates of the Peña Oroel fan (samples JJ17 and JJ22) show similar age distributions, but a slight increase on Variscan ages is recorded upsection, together with an increase of an age peak around 475 Ma. In overall, age populations ranging from 440 Ma to 880 Ma dominate through all the alluvial fan, displaying similar age distribution to the Santa Orosia fan samples.



**Figure 6.** Detrital zircon U-Pb results for the Santa Orosia and Canciás alluvial fans (see location in Figure 3), represented as Kernel density estimators (KDE) and histogram diagrams from 0 to 1300 Ma. Nonadaptive KDE bandwidth of 8 Ma; histogram bin width of 20 Ma.

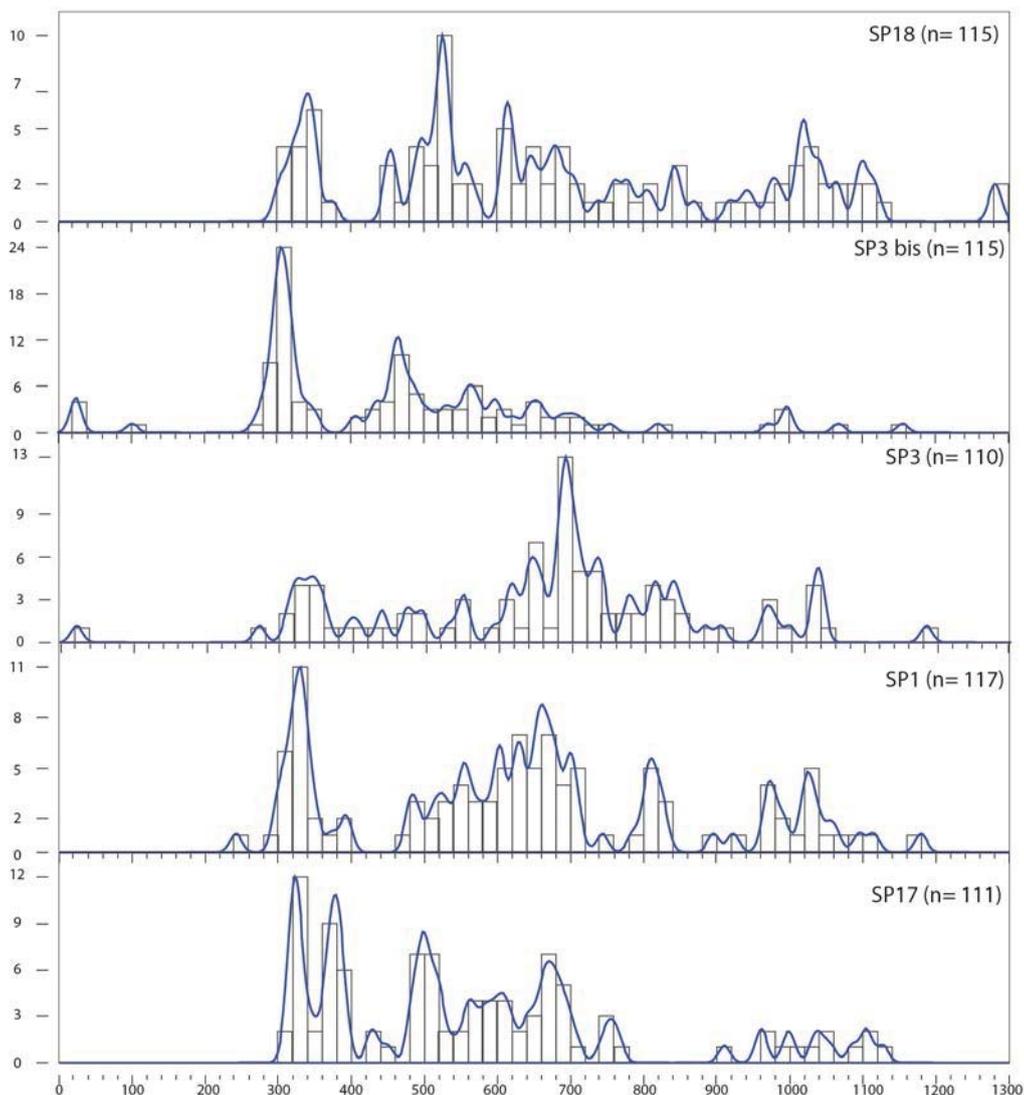
#### 4.1.4 San Juan de la Peña section

The basal sample (SP17), which belongs to the fluvial Campodarbe Formation, shows three main populations at 310-380Ma, 500-780Ma and 900-1120Ma. It lacks any late Variscan signal (280-310Ma), and shows marked age peaks around 325 Ma and 375 Ma (Figs. 8, 9). The overlying San Juan de la Peña conglomeratic beds (samples SP1, SP3, SP18) show also minor to absent late Variscan ages, but an upsection increase of the Cadomian and >700 Ma signals can be observed (Figs. 8, 9). Compared to the Campodarbe fluvial sandstone, the alluvial conglomerates show low to absent content of the 360 to 400Ma signal and a higher the population around 700 to 900Ma. This change can be related to the provenance variation resulting from the replacement of the east-derived fluvial system (sample SP17) by the north-derived alluvial system (samples SP1, SP3, SP18), already described by Puigdefàbregas (1975).



**Figure 7.** Detrital zircon U-Pb results for the Peña Oroel section (see location in Figure 3), represented as Kernel density estimators (KDE) and histogram diagrams from 0 to 1300 Ma. Nonadaptative KDE bandwidth of 8 Ma; histogram bin width of 20 Ma.

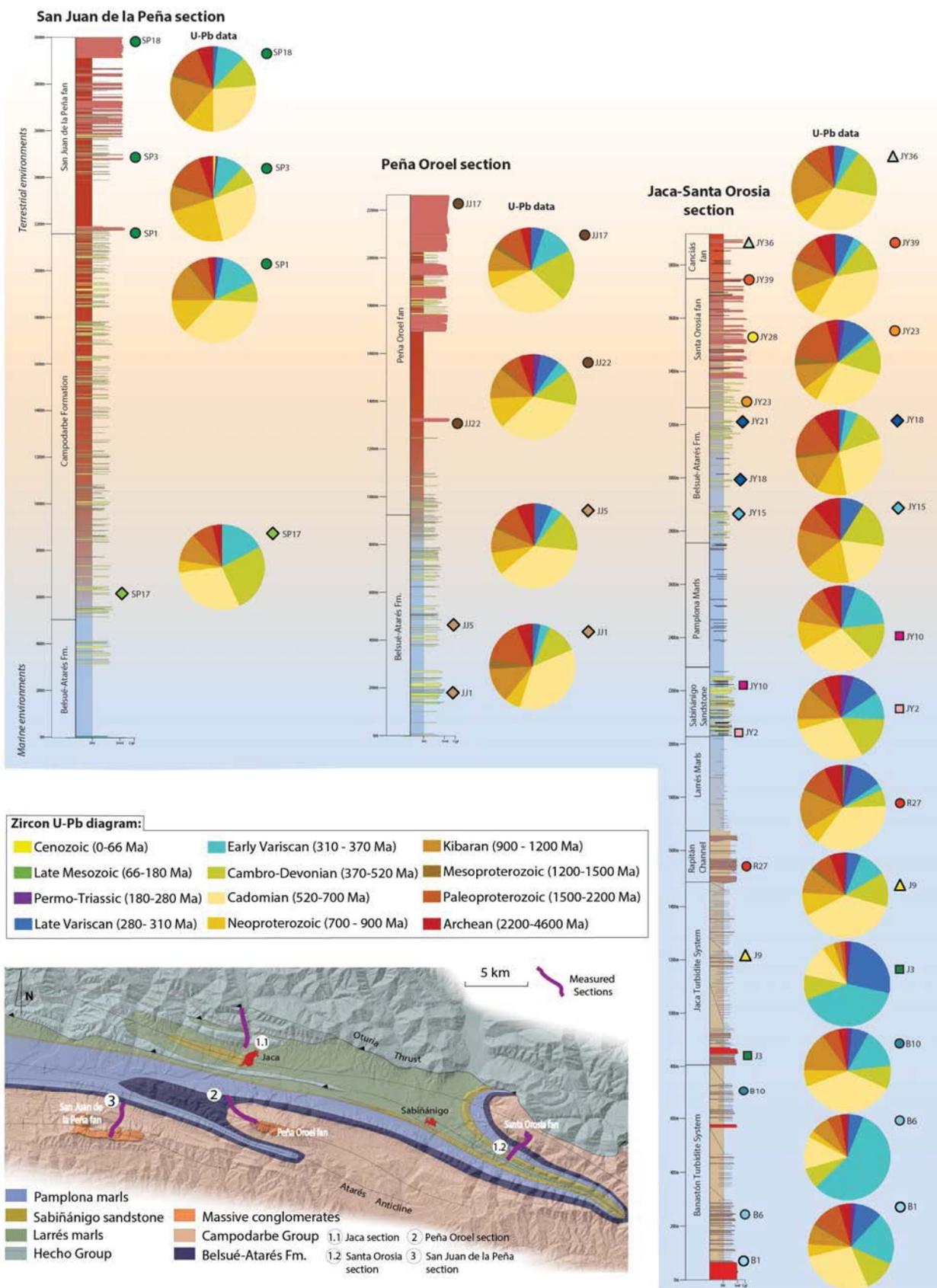
The presence of early Variscan and Cambro-Devonian age components in the east-derived fluvial system is consistent with the erosion of the Carboniferous strata, while the Cadomian age peaks can be associated to metamorphic rock fragments of the east-central Axial Zone (Roigé *et al.*, 2017), which contain these age populations (Martínez *et al.*, 2015). In contrast, the conglomeratic beds of the San Juan de la Peña show a decrease on the 360 to 440Ma signal, that could be associated to the lack of significant contributions of the Paleozoic basement, and the high increase of recycling of the Hecho Group turbidites forming the hinterland north of the Jaca basin at that time (Teixell, 1998; Roigé *et al.*, 2017). The presence of Miocene volcanic zircons in sample SP3 represent the youngest zircon age found in the Pyrenees, and implies the attribution of a Miocene age to the San Juan de la Peña fan (Roigé *et al.*, 2018 *in prep.*, chapter 5).



**Figure 8.** Detrital zircon U-Pb results for the San Juan de la Peña section (see location in Figure 3), represented as Kernel density estimators (KDE) and histogram diagrams from 0 to 1300 Ma. Nonadaptive KDE bandwidth of 8 Ma; histogram bin width of 20 Ma.

#### 4.2 DZ U-Pb trends coupled with sandstone petrography

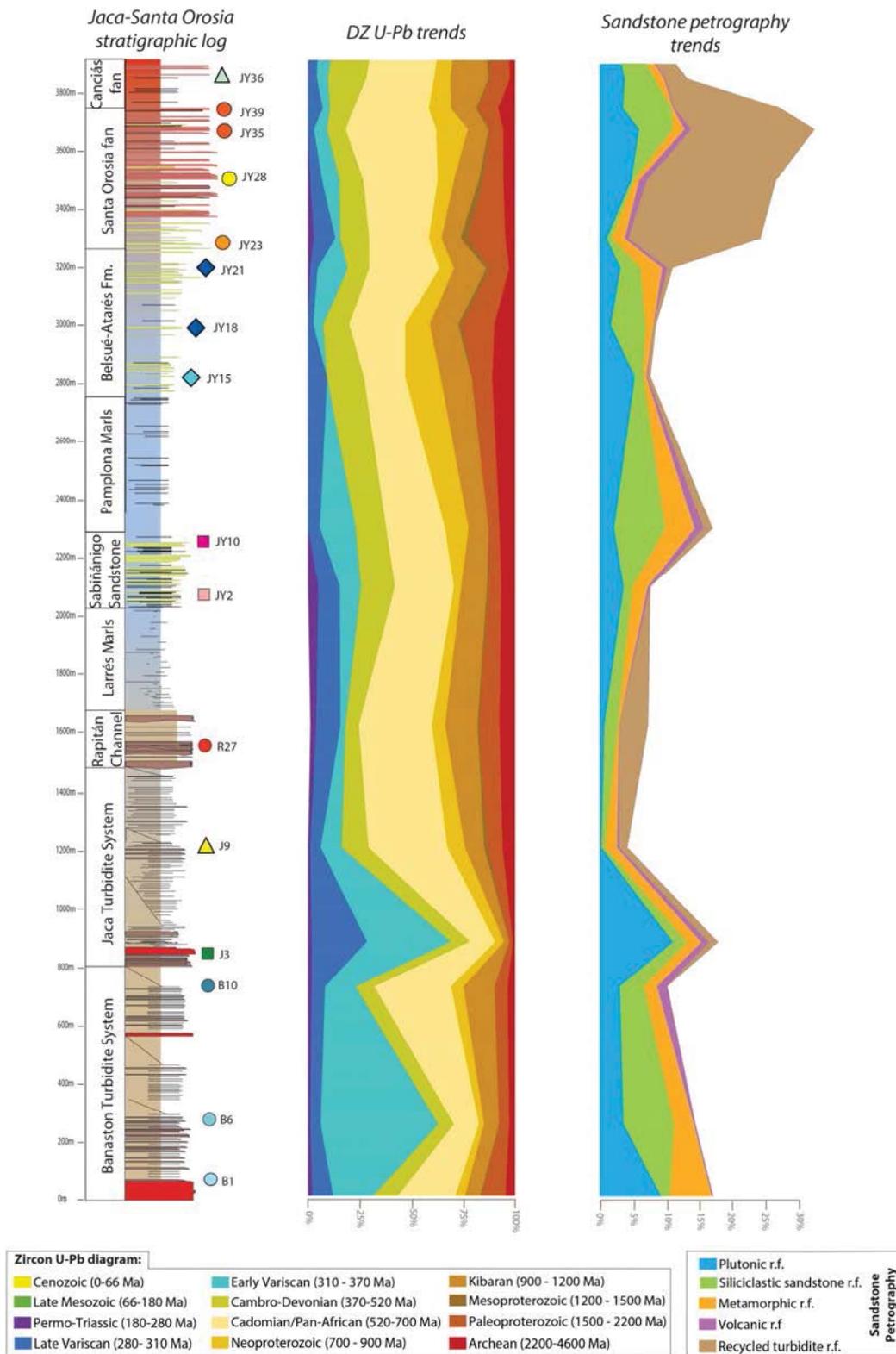
Sandstone petrography data is here incorporated in order to compare it to the detrital zircon U-Pb dataset, and to attempt an association that could facilitate the provenance interpretations both in the Jaca basin and the entire south Pyrenean foreland basin. Sandstone petrography results are already published in Roigé *et al.* (2016) and Roigé *et al.* (2017), and summarized in the graphics of Figure 10, in order to illustrate the main compositional trends.



**Figure 9.** Stratigraphic sections of Jaca-Santa Orosia, Peña Oroel and San Juan de la Peña showing the transition from deep-marine to terrestrial environments of the Jaca basin. Detrital zircon U-Pb results are represented along the sections as pie charts. Bottom: see legend of pie charts and location of sections.

From base to top, DZ U-Pb age distributions show a clear change, consisting on the replacing of dominant Variscan age components by Cadomian and >700 Ma age components (Fig. 10). Sandstone petrography coincides also with a shift mainly consisting on the replacement of siliciclastic and plutonic rock fragments by the dominance of hybrid sandstone fragments. In the turbidite section, samples with age peaks concentrated around 280 to 310 Ma (late Variscan) are those that show a higher proportion of K-feldspar and plutonic rocks fragments (Roigé *et al.* 2016), while those rich on early Variscan age components are associated with higher concentrations on sandstone and metamorphic rock fragments (Fig. 10). According to the Pyrenean sources, we can conclude that late Variscan signals together with plutonic rock fragments are indicative of direct supply from the late Variscan granitoids, while early Variscan population appears related with siliciclastic sandstone rock fragments suggesting erosion from the Carboniferous flysch (Paleozoic basement). No correlation between volcanic rock fragments and DZ permo-triassic ages is observed, which is consistent with the low fertility of the upper Triassic sub-volcanic rocks in the Pyrenees. As observed in Figure 10, late Variscan DZ components are very sensitive to little variations on the concentration of plutonic rock fragments. This effect is here interpreted as the result of the high fertility of the crystalline rocks in the source area. In contrast, fluctuations in the proportion of recycled turbidite sandstones have nule/little effect on the DZ ages distributions of the deltas and alluvial fans (Fig. 10).

Moreover, cyclic pattern trends can be identified from coupling of sandstone petrography and DZ U-Pb data. In the Banastón and Jaca turbidite systems, Variscan components and plutonic rock fragments show a decreasing trend upsection until the beginning of the next system (i.e. sequence boundary), while Cadomian populations increase (Fig. 10). We interpret these trends as high-frequency tectono-stratigraphy cyclicity (i.e. each turbiditic system) contained into a large scale cyclicity (i.e. Jaca-Santa Orosia section). This kind of ciclicity has been already identified in the Hecho Group turbidites, were proportion of extrabasinal and intrabasinal carbonate grains changes from base to top of each sedimentary system (Fontana *et al.*, 1989; Caja *et al.*, 2010; Roigé *et al.*, 2016). These fluctuations could be the results of multiple mechanisms in the source areas and/or in the transfer zones (Amorosi and Zuffa, 2011). Thomson *et al.* (2017) distinguished these fluctuations in the proximal time equivalents of the Hecho Group in the Ainsa basin. They proposed that the continuous shifting of basin axis, related to tectonic activity, could connect different domains with different feeder systems from the Ager and Tremp basins. Other mechanisms as eustacy, climate variability and orbital forcing could be a possible driver an exert some controls on the variation of DZ age distributions (Cantalejo and Pickering, 2014; Castelltort *et al.*, 2017).



**Figure 10.** Jaca-Santa Orosia stratigraphic section with detrital zircon U-Pb age trends faced with the sandstone petrography compositional trends of the components able to provide detrital zircon published in Roigé et al. (2016) and Roigé et al. (2017).



### 4.3 Evolution of source areas

The works by Whitchurch *et al.* (2011), Filleaudeau *et al.* (2012) and Thomson *et al.* (2017) described the evolution from deltaic and fluvial systems dominated by Cadomian and >700 Ma age components, to sedimentary systems with dominant DZ Variscan age components during Eocene times in the nearby Ainsa and Tremp-Graus basins. This change has been interpreted to represent the shift from an axial transverse drainage network eroding the Cadomian rocks of the eastern Pyrenees, to a transverse drainage network tapping Variscan plutons of the central Pyrenees.

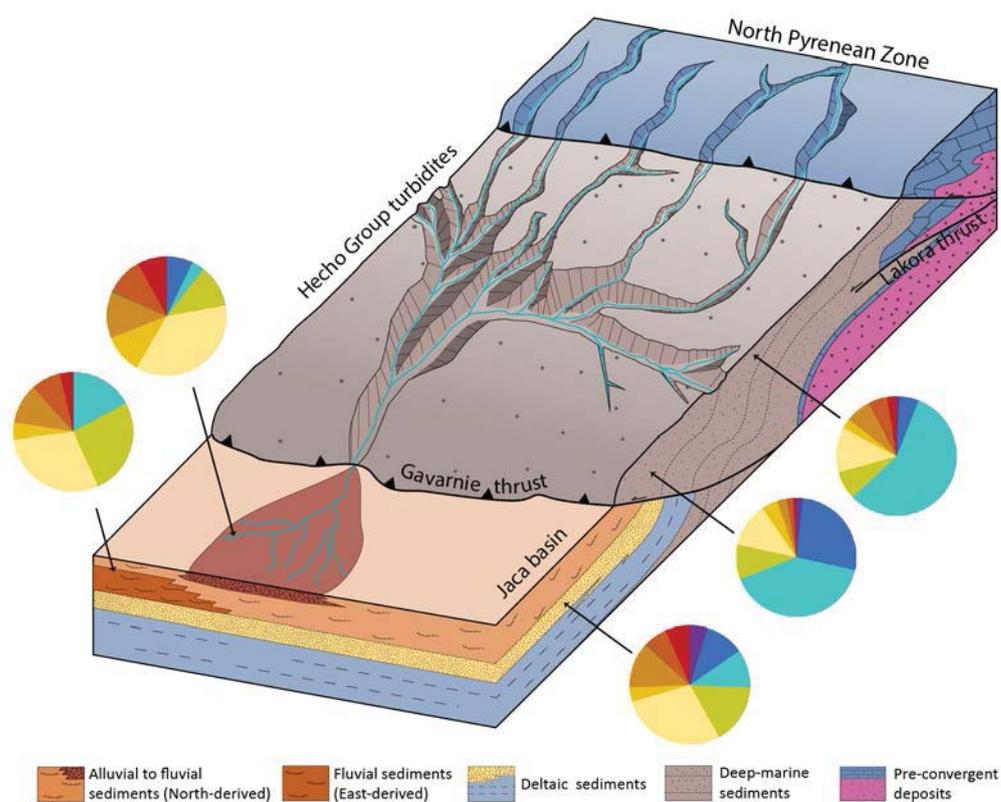
Our results show that the upper Hecho Group turbidites in the Jaca basin record dominant Variscan age components, and therefore confirm their equivalence with the transverse-fed turbidite deposits of the Ainsa basin during Lutetian times. However, in the Jaca basin the eastern sediment input is displaced to the southern part of the basin due to progradation of north-derived systems (Bartonian-Priabonian) fed from new source areas yielding to Cadomian and >700 Ma dominated age distributions (Fig. 11). Through the evolution of the basin, the displaced east-derived systems display also a shift on the age distributions. This change is recorded both in sandstone petrography and U/Pb ages. It mainly consists on the evolution from a plutonic source area (active during Hecho Group turbidites) to a metamorphic and siliciclastic source (active during fluvial Campodarbe Group) (Fig. 11). This provenance change has been also identified in the Eocene Escanilla fluvial system in the Ainsa basin, interpreted as resulted from a reorganization of the catchment areas in the central Pyrenees (Michael, 2013).

### 4.4 The recycling effect on DZ U-Pb populations

The overwhelming presence of turbidite pebbles in the Santa Orosia, Peña Oroel and San Juan de la Peña fan allow to infer a drainage area for these alluvial fans mainly constituted by the Hecho Group turbidites (Roigé *et al.*, 2017). Contrary to what one would expect, the U/Pb age distributions of the alluvial fan samples are very different from the turbidite ones (Fig. 11). Three main hypothesis are here proposed in order to explain the recycling effect on the propagation of detrital zircon U-Pb signatures.

The first one would be that the lower Hecho Group turbidites, not analysed in the Jaca basin, could have a different DZ signature, more close to the age distribution recorded in the alluvial fans (Fig. 11). Nonetheless, the DZ age signatures of the lower Hecho Group time equivalents in the Ainsa basin (Thomson *et al.*, 2017) do not support this possibility.

The second explanation could be related to the effect of the grain-size of the parent rocks on the U-Pb age distributions. Although few is known about this effect, some studies have already pointed to the influence of grain size variation on DZ U-Pb interpretations (Garzanti *et al.*, 2008; Garzanti *et al.*, 2009; Malusà *et al.*, 2016). In our case study, samples were targeted according to a medium-fine grain size. Nonetheless, turbidites of the Jaca basin are mainly distal deposits, ruled by fine to very fine grained turbidites. Therefore, if substantial differences on U-Pb age distributions could occur in the Hecho Group turbidites, our DZ U-Pb results for the turbidites would not be representative of the entire drainage area (Fig. 11). Although further analyses are needed to discard this hypothesis, it seems that the no variability of DZ distributions between fine and medium size grained samples does not point to this explanation.



**Figure 11.** Sketch model for the sedimentary systems of the Jaca basin during alluvial sedimentation (late Eocene-Miocene), with U-Pb pie charts for the Hecho Group turbidites (samples B6 and J3), deltaic deposits (sample JY2), east-derived fluvial Campodarbe (sample SP17) and for the north-derived alluvial fans (sample JY39). Note the different age signatures between the alluvial fans, and their main source area (Hecho Group turbidites).

The third possibility, which seems the more plausible, could be related to the capability of the parent rocks to provide a zircon distribution representative according to their spatial distribution in the source area. This effect could be produced by the low capability of the Hecho Group turbidites to provide a sand to silt size fraction containing a fair representation of their zircon age populations. This situation would cause an overrepresentation of the North Pyrenean rocks signals, located in the headwaters (Fig.11). Some intrinsic factors of the Hecho Group turbidites as their good cementation degree, could also explain their resistance to be disaggregated into sand and silt sized fractions.

Moreover, distal sources located in the headwaters (North Pyrenean Zone) would be easily disaggregated into sand and silt sized grains while the proximal source area (Hecho Group turbidites) (Fig. 11), would be preferably fragmented in clast-size fragments, also influenced by the relatively weaker weathering processes affecting this new source. According to all these characteristics the source rock distribution would not provide the expected representation of zircon grains. This effect can also be observed when comparing the sand-sized and pebble fractions of the alluvial fans, where turbidite fragments are more represented in the coarser fractions (Roigé *et al.*, 2017). In addition, this process is also supported by the fact that the Rapitán channel is assumed as mainly sourced from the North Pyrenean Zone, with little recycling from the former turbidites, and shows an U-Pb zircon distribution very close to those recorded in the overlying alluvial fans that clearly erode the Hecho Group turbidites.

With all, our results emphasize the Jaca basin as an excellent setting in which to investigate sediment recycling, where different factors as grain sorting, weathering, transport can play an important role when predicting the signal propagation on DZ U-Pb ages.

## 5. Conclusions

New detrital zircon U-Pb geochronology analysis allow to characterize the provenance changes that occur from middle Eocene to early Miocene times in the Jaca basin. Our results reveal a clearly different signature between the Hecho Group turbidites and the alluvial fans which can be associated to a major change in source area. The turbidite deposits show an age distribution distinguished by the dominance of Variscan ages, which can be clearly associated with sediment input funneled through the Ainsa basin, derived from eastern source areas, in the Paleozoic basement of the central Pyrenees. Coupling of sandstone petrography and DZ U-Pb data has allowed to identify compositional trends that are here interpreted as high-frequency tectono-stratigraphy cyclicity, which can be identified in each of the analyzed turbidite system.

In contrast the overlying fluvial to alluvial systems display dominant Cadomian and >700 Ma age populations, which are linked to new uplifted northern sources, with a drainage area mainly composed by the former uplifted turbidites, and by the North Pyrenean Zone located in the headwaters.

Unexpectedly, alluvial fan DZ age distributions are not similar to those recorded in the analyzed turbidites, highlighting the complexity of a process such as sediment recycling, which is dependent of a wide range of factors. We propose that intrinsic factors such as the degree of cementation, composition or zircon fertility of source rock lithologies, or also effects as transport distance or differentiated weathering processes affecting the source areas can act as a major control on DZ age distributions. If these interpretations are correct, recycling in the alluvial fans of the Jaca basin causes a DZ age spectra not representative of the spatial distribution of the source rocks.

Therefore, our results highlight the importance of integration of different provenance techniques in geological settings with complex provenance evolution.

## 6. Acknowledgements

This work is a contribution to project CGL2014-54180-P, financed by the MINECO of Spain. The authors are very grateful for support by Jackson School of Geosciences (UT). We thank Lisa Gilley Stockli, Kelly Thomson and Margo Odlum for assistance during the DZ U-Pb analysis, and for fruitful discussions.

## 7. References

- Amidon, W.H., Burbank, D.W. and Gehrels, G.E., 2005. Construction of detrital mineral populations: insights from mixing of U–Pb zircon ages in Himalayan rivers: *Basin Research*, **17**, p. 463–485.
- Amorosi, A. and Zuffa, G.G., 2011. Sand composition changes across key boundaries of siliciclastic and hybrid depositional sequences: *Sedimentary Geology*, **236**, p. 153–163, doi: 10.1016/j.sedgeo.2011.01.003.
- Barnolas, A. and Teixell, A., 1994. Platform sedimentation and collapse in a carbonate dominated margin of a foreland basin (Jaca basin, Eocene, southern Pyrenees): *Geology*, **22**, p. 1107–1110.
- Boya, S., Remacha, E., Roigé, M. and Gómez-Gras, D., 2015. The Sabiñánigo flood-dominated delta systems revisited (Jaca basin, South-central Pyrenees, Spain). In: *Abstract Book of 31st IAS Meeting of Sedimentology, 22-25 June, 2015, Kraków, Poland* p. 83.
- Caja, M.A., Marfil, R., Garcia, D., Remacha, E., Morad, S., Mansurbeg, H., Amorosi, A., Martínez-Calvo, C. and

- Lahoz-Beltrá, R., 2010. Provenance of siliciclastic and hybrid turbiditic arenites of the Eocene Hecho Group, Spanish Pyrenees: Implications for the tectonic evolution of a foreland basin: *Basin Research*, **22**, p. 157–180, doi: 10.1111/j.1365-2117.2009.00405.x.
- Campbell, I.H., Reiners, P.W., Allen, C.M., Nicolescu, S. and Upadhyay, R., 2005. He-Pb double dating of detrital zircons from the Ganges and Indus Rivers: Implication for quantifying sediment recycling and provenance studies: *Earth and Planetary Science Letters*, **237**, p. 402–432, doi: 10.1016/j.epsl.2005.06.043.
- Cantalejo, B. and Pickering, K.T., 2014. Climate forcing of fine-grained deep-marine systems in an active tectonic setting: Middle Eocene, Ainsa Basin, Spanish Pyrenees: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **410**, p. 351–371.
- Canudo, J.I. and Molina, E., 1988. Biocronología de foraminíferos planctónicos de la secuencia deposicional de Jaca (Pirineo Aragonés): Eoceno medio y superior. In: *II Cong. Geol. Esp.* SGE, Granada, p. 273–276.
- Castelltort, S., Honegger, L., Adatte, T., Clark, J.D., Puigdefàbregas, C., Spangenberg, J.E., Dykstra, M.L. and Fildani, A., 2017. Detecting eustatic and tectonic signals with carbon isotopes in deep-marine strata, Eocene Ainsa Basin, Spanish Pyrenees: *Geology*, **45**, p. 707–710, doi: 10.1130/G39068.1.
- Coll, X., Gómez-Gras, D., Roigé, M. and Mestres, N., 2017. Heavy-mineral assemblages as a provenance indicator in the Jaca basin ( Middle-Late Eocene , southern Pyrenees ): , p. 159–162.
- Crognier, N., 2016. Évolution Thermique, Circulation De Fluides Et Fracturation Associées À La Structuration Du Bassin D'Avant-Pays Sud-Pyrénéen: , p. 339.
- Davis, D. and Lin, S.F., 2003. Unraveling the geologic history of the Hemlo Archean gold deposit, Superior province, Canada: a U-Pb geochronological study.: *Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists*, **70**, p. 335–348.
- Dickinson, W.R., 2008. Impact of differential zircon fertility of granitoid basement rocks in North America on age populations of detrital zircons and implications for granite petrogenesis.: *Earth and Planetary Science Letters*, **275**, p. 80–92.
- Dickinson, W.R., Lawton, T.F. and Gehrels, G.E., 2009. Recycling detrital zircons: A case study from the Cretaceous Bisbee Group of southern Arizona: *Geology*, **37**, p. 503–506, doi: 10.1130/G25646A.1.
- Fedo, C.M., Sircombe, K.N. and Rainbird, R.H., 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record: *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, **53**, p. 277–303, doi: 10.2113/0530277.

- Filleaudeau, P.Y., Mouthereau, F. and Pik, R., 2012. Thermo-tectonic evolution of the south-central Pyrenees from rifting to orogeny: Insights from detrital zircon U/Pb and (U-Th)/He thermochronometry: *Basin Research*, **24**, p. 401–417, doi: 10.1111/j.1365-2117.2011.00535.x.
- Fontana, D., Zuffa, G.G. and Garzanti, E., 1989. The interaction of eustasy and tectonism from provenance studies of the Eocene Hecho Group Turbidite Complex (South-Central Pyrenees, Spain): *Basin Research*, **2**, p. 223–237, doi: 10.1111/j.1365-2117.1989.tb00037.x.
- Garzanti, E., Andò, S. and Vezzoli, G., 2009. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies: *Earth and Planetary Science Letters*, **277**, p. 422–432, doi: 10.1016/j.epsl.2008.11.007.
- Garzanti, E., Andò, S. and Vezzoli, G., 2008. Settling equivalence of detrital minerals and grain-size dependence of sediment composition: *Earth and Planetary Science Letters*, **273**, p. 138–151, doi: 10.1016/j.epsl.2008.06.020.
- Garzanti, E., Limonta, M., Resentini, A., Bandopadhyay, P.C., Najman, Y., Andò, S. and Vezzoli, G., 2013. Sediment recycling at convergent plate margins (indo-burman ranges and andaman-nicobar ridge): *Earth-Science Reviews*, **123**, p. 113–132, doi: 10.1016/j.earscirev.2013.04.008.
- Gillis, R.J., Gehrels, G.E., Ruiz, J. and Flores de Dios González, L.A., 2005. Detrital zircon provenance of Cambrian-Ordovician and Carboniferous strata of the Oaxaca terrane, southern Mexico: *Sedimentary Geology*, **182**, p. 87–100, doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.07.013.
- Gómez-Gras, D., Roigé, M., Fondevilla, V., Oms, O., Boya, S. and Remacha, E., 2016. Provenance constraints on the Tremp Formation paleogeography (southern Pyrenees): Ebro Massif VS Pyrenees sources. *Cretac. Res.* 57. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.09.>: *Cretaceous Research*, **57**, doi: 10.1016/j.cretres.2015.09.010.
- Gupta, K. Das and Pickering, K.T., 2008. Petrography and temporal changes in petrofacies of deep-marine Ainsa-Jaca basin sandstone systems, Early and Middle Eocene, Spanish Pyrenees: *Sedimentology*, **55**, p. 1083–1114, doi: 10.1111/j.1365-3091.2007.00937.x.
- Hart, N.R., Stockli, D.F. and Hayman, N.W., 2016. Provenance evolution during progressive rifting and hyperextension using bedrock and detrital zircon U-Pb geochronology, Mauléon Basin, western Pyrenees: *Geosphere*, **12**, p. 1166–1186, doi: 10.1130/GES01273.1.
- Hart, N.R., Stockli, D.F., Lavier, L.L. and Hayman, N.W., 2017. Thermal evolution of a hyperextended rift basin,

Mauléon Basin, western Pyrenees: *Tectonics*, **36**, p. 1103–1128, doi: 10.1002/2016TC004365.

Hogan, P.J. and Burbank, D.W., 1996. Evolution of the Jaca piggyback basin and emergence of the External Sierra, southern Pyrenees: *Tertiary basins of Spain the stratigraphic record of crustal kinematics*, **1**, p. 153–160, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Jackson, S.E., Pearson, N., Griffin, W.L. and Belousova, E.A., 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology: *Chemical Geology*, **211**, p. 47–69.

Labaume, P., Meresse, F., Jolivet, M., Teixell, A. and Lahfid, A., 2016. Tectono-thermal history of an exhumed thrust-sheet-top basin: an example from the south Pyrenean thrust belt: *Tectonics*,

Labaume, P., Mutti, E. and Séguret, M., 1987. Megaturbidites: a depositional model from the Eocene of the SW-Pyrenean Foreland Basin, Spain: *Geo-Marine Letters*, **7**, p. 91–101.

Labaume, P., Séguret, M. and Seyve, C., 1985. Evolution of a turbiditic foreland basin and analogy with an accretionary prism: Example of the Eocene South-Pyrenean Basin: *Tectonics*, **4**, p. 661–685, doi: 10.1029/TC004i007p00661.

Malusà, M.G., Resentini, A. and Garzanti, E., 2016. Hydraulic sorting and mineral fertility bias in detrital geochronology: *Gondwana Research*, **31**, p. 1–19, doi: 10.1016/j.gr.2015.09.002.

Margalef, A., Castiñeiras, P., Casas, J.M., Navidad, M., Liesa, M., Linnemann, U., Hofman, M. and Gärtner, A., 2016. Detrital zircons from the Ordovician rocks of the Pyrenees: Geochronological constraints and provenance: *Tectonophysics*, **681**, p. 124–134.

Martínez, F.J., Dietsch, C., Aleinikoff, J., Cirés, J., Arboleya, M.L. and Reche, J., 2015. Provenance, age, and tectonic evolution of Variscan flysch, southeastern France and northeastern Spain, based on zircon geochronology: *Geological Society of America Bulletin*, p. 1–18, doi: 10.1130/B31316.1.

Michael, N., 2013. Functioning of an ancient routing system, the Escanilla Formation, South Central Pyrenees: Imperial College London, 318 p.

Moecher, D. and Samson, S., 2006. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis.: *Earth and Planetary Science Letters*, **247**, p. 252–266.

Montes, M., 2002. Estratigrafia del Eoceno-Oligoceno de la Cuenca de Jaca (Sinclinorio del Guarga):

Universitat de Barcelona, 365 p.

- Mutti, E., 1985. Turbidite systems and their relations to depositional sequences. In: *Provenance of Arenites* (Zuffa, G.G., ed.) NATO ASI Ser., p. 65–93.
- Nijman, W. and Nio, S.-D., 1975. *The Eocene Montañana Delta (Tresp-Graus Basin, provinces of Lérida and Huesca, Southern Pyrenees, N Spain): Field trip B guidebook* (The sedimentary evolution of the Paleogene south Pyrenean Basin), XI International Sedimentological Congress, International Association of Sedimentologists, Nice, Excursion Guidebook.
- Oms, O., Dinarès-Turell, J. and Remacha, E., 2003. Magnetic stratigraphy from deep clastic turbidites: An example from the Eocene Hecho group (Southern Pyrenees): *Studia Geophysica et Geodaetica*, **47**, p. 275–288, doi: 10.1023/A:1023719607521.
- Paton, C., Hellstrom, J., Paul, B., Woolhead, J. and Hergt, J., 2011. Lolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **26**, p. 2508–2518.
- Payros, A., Pujalte, V. and Orue-Etxebarria, X., 1999. The South Pyrenean Eocene carbonate megabreccias revisited: New interpretation based on evidence from the Pamplona Basin: *Sedimentary Geology*, **125**, p. 165–194, doi: 10.1016/S0037-0738(99)00004-4.
- Puigdefàbregas, C., 1975. La sedimentación molásica en la cuenca de Jaca: *Pirineos*, **104**, p. 1–188.
- Puigdefàbregas, C., Muñoz, J.A. and Verges, J., 1992. Trusting and foreland basin evolution in the southern Pyrenees. In: *Thrust Tectonics* Springer Netherlands, p. 247–254.
- Remacha, E. and Fernández, L.P., 2003. High-resolution correlation patterns in the turbidite systems of the Hecho Group (South-Central Pyrenees, Spain): *Marine and Petroleum Geology*, **20**, p. 711–726, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2003.09.003.
- Remacha, E., Fernández, L.P. and Maestro, E., 2005. The Transition Between Sheet-Like Lobe and Basin-Plain Turbidites in the Hecho Basin (South-Central Pyrenees, Spain): *Journal of Sedimentary Research*, **75**, p. 798–819, doi: 10.2110/jsr.2005.064.
- Remacha, E. and Picart, J., 1991. El complejo turbidítico de Jaca y el delta de la arenisca de Sabiñánigo. In: *Libro Guía Excursión nº8, I Congreso Español del Terciario*, Vic. p. 116p.
- Roigé, M., Gómez-Gras, D. and Remacha, E., 2013. Procedencia de las areniscas y conglomerados de la sucesión estratigráfica del flanco sur del sinclinal de Santa Orosia (Bartoniense y Priaboniense inferior



de la cuenca de Jaca ): *Geogaceta*, **53**, p. 93–96.

Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Boya, S., Viaplana-Muzas, M. and Teixell, A., 2017. Recycling an uplifted early foreland basin fill: An example from the Jaca basin (Southern Pyrenees, Spain): *Sedimentary Geology*, **360**, p. 1–21, doi: 10.1016/j.sedgeo.2017.08.007.

Roigé, M., Gómez-Gras, D., Remacha, E., Daza, R. and Boya, S., 2016. Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees): *Comptes Rendus - Geoscience*, **348**, p. 236–245, doi: 10.1016/j.crte.2015.10.005.

Séguret, M., 1972. Etude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant sud des Pyrénées: Université Montpellier, 155 p.

Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S., Morris, G.A., Nasdala, L. and Norberg, N., 2008. Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis: *Chemical Geology*, **249**, p. 1–35.

Soler-Sampere, M. and Puigdefàbregas, C., 1970. Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental: *Pirineos*, p. 5–20.

Teixell, A., 1996. The Anso transect of the southern Pyrenees: basement and cover thrust geometries: *Journal of the Geological Society*, **153**, p. 301–310, doi: 10.1144/gsjgs.153.2.0301.

Teixell, A. and García-Sanseguendo, J., 1995. Estructura del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales): *Rev. Soc. Geol. España*, **8**, p. 215–228.

Teixell, A., Labaume, P. and Lagabrielle, Y., 2016. The crustal evolution of the west-central Pyrenees revisited: Inferences from a new kinematic scenario: *Comptes Rendus - Geoscience*, **348**, p. 257–267, doi: 10.1016/j.crte.2015.10.010.

Thomson, K.D., 2016. Detrital zircon ( U-Th )/( Pb-He ) geo- and thermo-chronometric constraints on provenance and foreland basin evolution of the Ainsa Basin , south-central Pyrenees , Spain : , p. 175.

Thomson, K.D., Stockli, D.F., Clark, J.D., Puigdefàbregas, C. and Fildani, A., 2017. Detrital zircon (U-Th)/(He-Pb) double-dating constraints on provenance and foreland basin evolution of the Ainsa Basin, south-central Pyrenees, Spain: *Tectonics*, **36**, p. 1352–1375, doi: 10.1002/2017TC004504.

Valloni, R., Marchi, M. and Mutti, E., 1984. Studio conoscitivo della moda detritica delle torbiditi eoceniche del Gruppo di Hecho (Spagna): *Giornale di Geologia*, **46**, p. 45–56.

Vermeesch, P., 2004. How many grains are needed for a provenance study? *Earth and Planetary Science Letters*, **224**, p. 441–451, doi: 10.1016/j.epsl.2004.05.037.

Vermeesch, P., 2012. On the visualisation of detrital age distributions: *Chemical Geology*, **312**, p. 190–194.

Whitchurch, A.L., Carter, A., Sinclair, H.D., Duller, R.A., Whittaker, A.C. and Allen, P.A., 2011. Sediment routing system evolution within a diachronously uplifting orogen: Insights from detrital zircon thermochronological analyses from the South-Central pyrenees: *American Journal of Science*, **311**, p. 442–482, doi: 10.2475/05.2011.03.

Wiedenbeck, M., Alle, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., Quadt, A. von, Roddick, J.C. and Spiegel, W., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses: *Geostandards newsletter*, **19**, p. 1–23.

