UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DIPARTIMENTO DI CHIMICA, SCIENZE DELLA VITA E DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE
UNITÀ DI SCIENZE DELLA TERRA

# Interpretazione paleoambientale e significato paleoclimatico dei depositi di marea del bacino di Ager formatisi durante l'optimum climatico dell'Eocene inferiore (Pirenei centro meridionali)

## Relazione assegno di ricerca (Progetto Dipartimenti di Eccellenza COMP-HUB)

Simone Lombardi

L'attività di ricerca svolta nel periodo compreso tra l'1 settembre 2021 e il 28 febbraio 2023 ha avuto come scopo quello di studiare i depositi tidali dell'Eocene inferiore del bacino di Ager nei Pirenei centro meridionali (Fig. 1). Questo tipo di depositi che derivano da complesse tipologie di correnti di marea, hanno da sempre rivestito una particolare importanza nel mondo scientifico ed esplorativo, non solo perché formano l'ossatura di molti bacini sedimentari ma anche perché costituiscono ottime rocce serbatoio per varie risorse naturali (Davis e Darlymple, 2012). Un altro aspetto che rende questi tipi di depositi estremamente importanti riguarda la loro forte analogia con i depositi conturitici di mare profondo che negli ultimi anni sono diventati uno dei principali obiettivi dell'esplorazione petrolifera (vedasi Stow e Smillie, 2020). I depositi dell'Ipresiano del bacino di Ager, infine, possono rivestire anche un ruolo chiave nella comprensione delle relazioni tra sedimentazione clastica e cambiamenti climatici dal momento che questi sedimenti si depongono durante l'optimum climatico dell'Eocene inferiore caratterizzato da repentini aumenti di temperatura legati a periodi ipertermali (vedasi ad esempio Castelltort et al. 2020).

Tutto questo ha reso i depositi tidali del bacino di Ager un punto di riferimento per la ricerca di moltissime università e compagnie petrolifere di tutto il mondo grazie anche ai magnifici affioramenti e alla loro continuità laterale (vedasi Mutti et al. 1984, 1985, 1994). Paradossalmente, nonostante questi depositi siano estremamente famosi e noti in letteratura, una stratigrafia fisica ad alta risoluzione e una dettagliata analisi di facies sono ancora sostanzialmente mancanti.

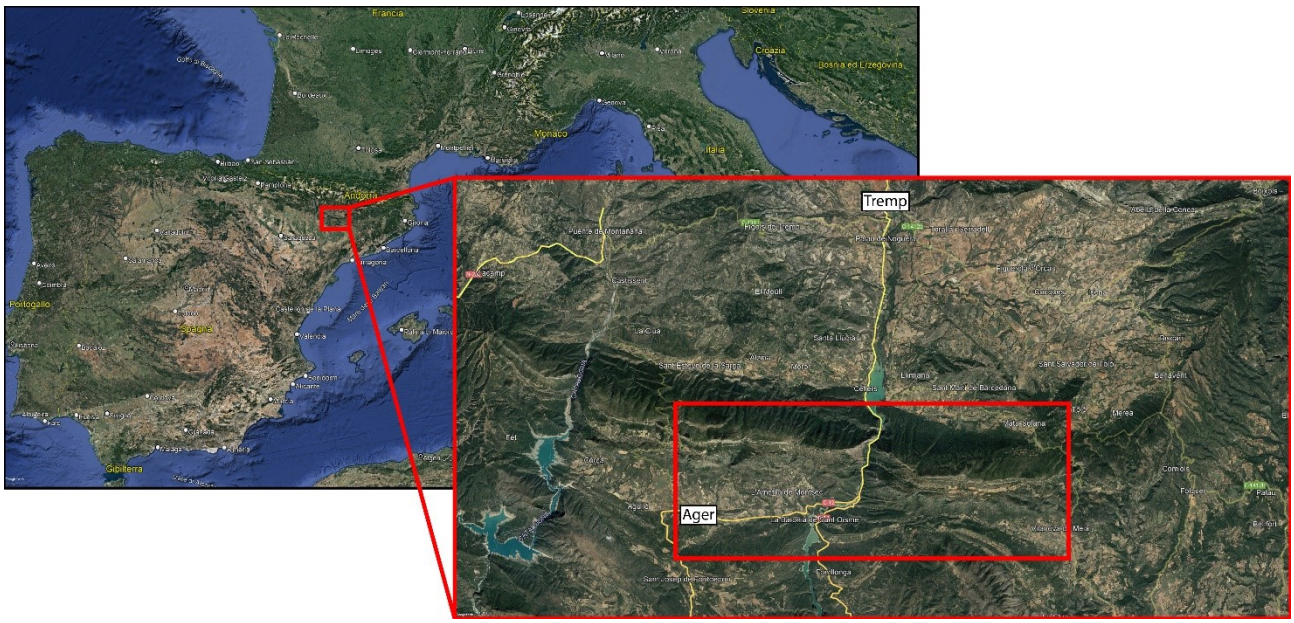


*Figura **Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.**1: Inquadramento geografico dell'area di studio.*

L'obiettivo primario quindi è stato quello di ricostruire l'impalcatura stratigrafica ad alta risoluzione dei depositi tidali dell'Allogruppo di Figols nel Bacino di Ager (Figols 1 e 2 di Mutti et al., 1994), con il fine di porre delle basi solide per un successivo studio paleoambientale di dettaglio, per analizzare i parametri paleoclimatici mediante l'integrazione delle analisi stratigrafiche e paleontologiche. L'importanza di questa attività risiede nella possibilità di mettere a confronto lo scenario attuale del nostro pianeta, in cui si sta verificando un globale innalzamento delle temperature medie, alle condizioni che caratterizzavano il momento della sedimentazione dei depositi oggetto di studio, i quali vengono attribuiti all'Eocene inferiore, un periodo a cui vengono attribuiti diversi eventi ipertermali (PETM e ETM-2 per citarne alcuni) durante i quali si sono verificati aumenti della temperatura media globale di circa 5-8°C.

L'area di studio è situata nel settore nord-orientale della Spagna, più precisamente ai piedi della catena pirenaica nella provincia di Lleida (Catalogna), a circa 20 km a sud della cittadina di Tremp. Il bacino di Ager corrisponde ad un bacino di piggy-back collocato sul thrust sheet della Sierra Marginales, l'ultimo di una serie di thrusts (da nord a sud: Boixols, Montsec e Sierra Marginales) con propagazione verso sud innescati dalle spinte tettoniche provocate dall'orogenesi pirenaica (Munoz, 1992). Questa conformazione ha generato un bacino con una morfologia relativamente stretta e allungata in direzione est-ovest, con un'apertura sull'oceano verso occidente e confinato a nord dal thrust del Montsec e a sud dal thrust della Sierra Marginales. Questa sua morfologia ha permesso alle onde di marea di entrare in risonanza e quindi amplificare la loro forza, dando origine ad un ambiente macrotidale, come quello che si può osservare attualmente nella Baia di Fundy, in Canada, con onde di marea che raggiungono anche i 12 m. Il bacino oggi si presenta in una struttura a sinclinale con asse circa est-ovest e con il fianco nord sub-verticale, mentre il fianco sud con un'inclinazione compresa tra i 20° e i 30°. Questa deformazione è stata causata principalmente dalla propagazione del thrust del Montsec, la quale era già in corso durante le fasi iniziali di riempimento del bacino, in quanto sul fianco nord non sono presenti i depositi relativi al Figols 1, mentre sul fianco sud raggiungono addirittura i 100 m di spessore (Mutti et al. 1985). Ciò fa supporre che nel settore nord era già in atto un sollevamento da parte del thrust del Montsec che ha impedito la deposizione dei primi apporti silicoclastici creando un depocentro verso sud. Questa asimmetria nei depositi caratterizzata da evidenti chiusure stratigrafiche verso nord, tende a caratterizzare, anche se in maniera meno accentuata, anche la parte sommitale dell'allogruppo. Oltre ad apporti silicoclastici, in bacino sono presenti due eventi a composizione carbonatica nella porzione basale, il più basso stratigraficamente è attribuibile ad un evento di tsunami scatenato probabilmente da un terremoto; il secondo, più alto stratigraficamente, potrebbe corrispondere ad un evento di tempesta (vedasi Mutti et al. 1985, 1994). Gli eventi appena citati assumono una particolare importanza nel lavoro svolto, poiché sono stati utilizzati come livelli-guida nell'attività di campagna e successivamente nei pannelli di correlazione.

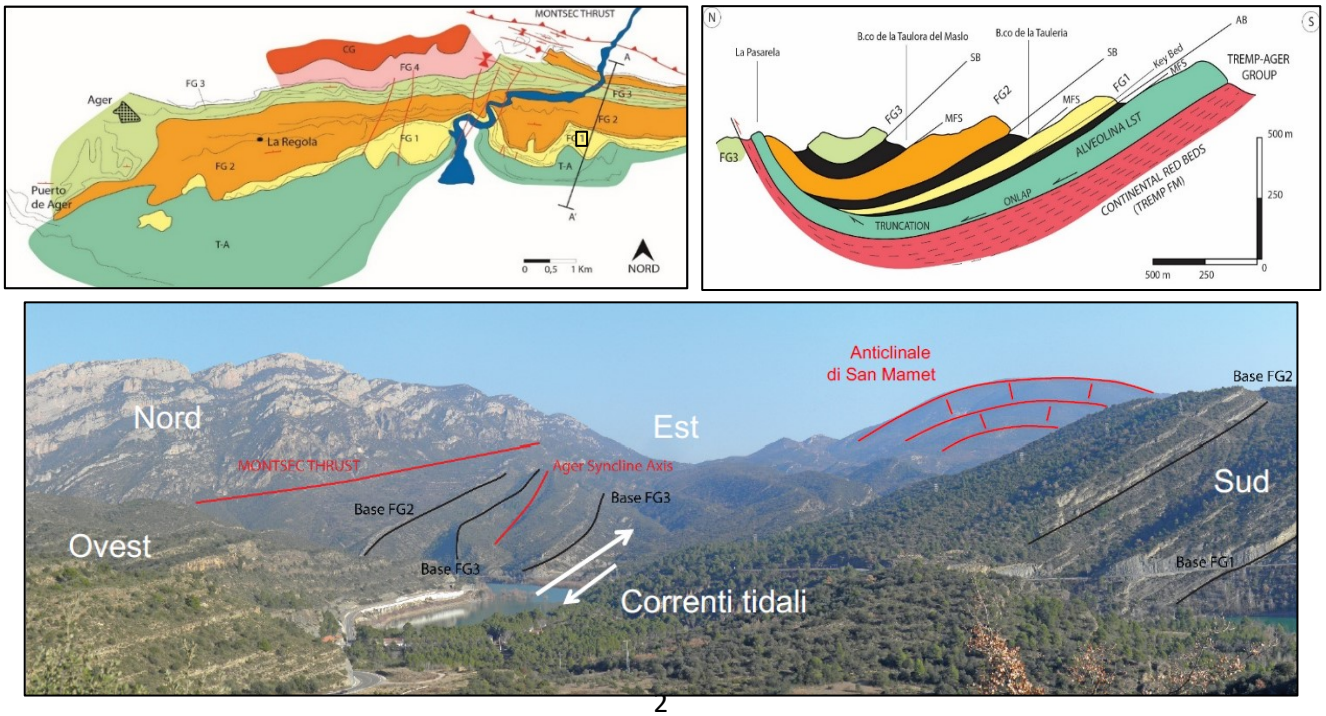




*Figura **Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.**2: Inquadramento geologico e assetto strutturale dell'area di studio (in alto a sinistra: in pianta; in alto a destra: in sezione; da Mutti et al., 1985) e panoramica della sinclinale vista da L'Ametlla de Montsec (in basso).*

La prima fase del lavoro si è concentrata sullo studio della bibliografia esistente dell'area e dei dati già in possesso dal gruppo di ricerca in concomitanza all'esplorazione della zona d'interesse, sia in modalità digitale mediante Google Earth, sia fisicamente in situ. Dopodiché si è iniziata un'intensa attività di campagna durante la quale sono stati misurati, descritti e interpretati 14 log stratigrafici (per un totale di circa 1,5 km di successione misurata), i quali coprono uno spessore di successione stratigrafica di circa 220 metri (nella zona depocentrale), per un'estensione areale di più di 20 km². Grazie a queste sezioni stratigrafiche è stato possibile costruire più pannelli di correlazione, paralleli e perpendicolari alle paleocorrenti, attraverso i quali si sono potute apprezzare le variazioni latero-verticali di questi depositi. In particolare, sono state misurate 7 sezioni stratigrafiche in corrispondenza del fianco sud della sinclinale dove affiora la successione che costituisce il Figols 1; 2 sezioni stratigrafiche nella zona più assiale dove affiorano in continuità sia il Figols 1 che il Figols 2; infine sono state misurate 5 sezioni stratigrafiche sul fianco nord, dove è presente (come accennato in precedenza) solamente il Figols 2 in discordanza angolare sui Calcari ad Alveolina (Fig. 3).

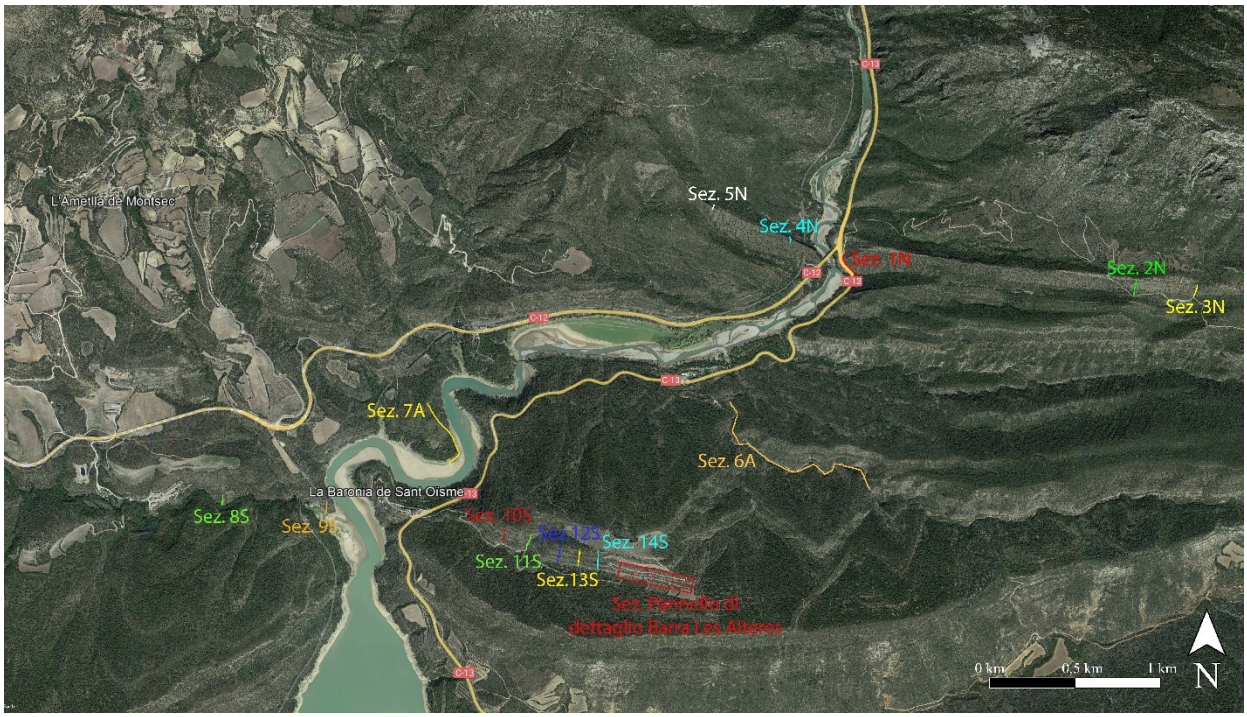


*Figura **Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.**3: Ubicazione delle sezioni stratigrafiche misurate nel bacino di Ager.*

Durante il lavoro, sono state riconosciute le principali facies legate ad una piana tidale (cioè, stratificazione sigmoidale, harring-bone cross stratification, strutture a flaser, wavy e lenticular, come discusso da Davis e Dalrymple, 2012 *cum biblio*).

In particolare, il lavoro focalizzato sulle barre sigmoidali a più grande scala ha permesso di individuare 5 tipologie di facies all'interno delle sequenze di facies coarsening-upward che caratterizzano questi tipi di depositi e che rispecchiano le dinamiche progradazionali della barra e le differenti intensità delle correnti tidali. Queste facies, dal basso verso l'alto sono: 1) facies siltosa con intensa bioturbazione con una frequente presenza di frammenti di glauconite e di fossili; 2) facies bioturbata per lo più massiva con una pseudo-laminazione ondulata in granulometria molto fine arenaceo-siltosa, con rare strutture sedimentarie; 3) facies di arenaria fine con laminazione ondulata alternata a sigmoidi a piccola scala; 4) facies di arenaria medio-grossolana caratterizzata da sigmoidi ben sviluppati, spesso con superfici di troncatura al tetto, con presenza di fossili e concrezioni allineate alle lamine oblique sigmoidali; 5) facies di arenaria medio-grossolana caratterizzata da clinostratificazioni a grande scala, con una presenza diffusa di detrito fossilifero.

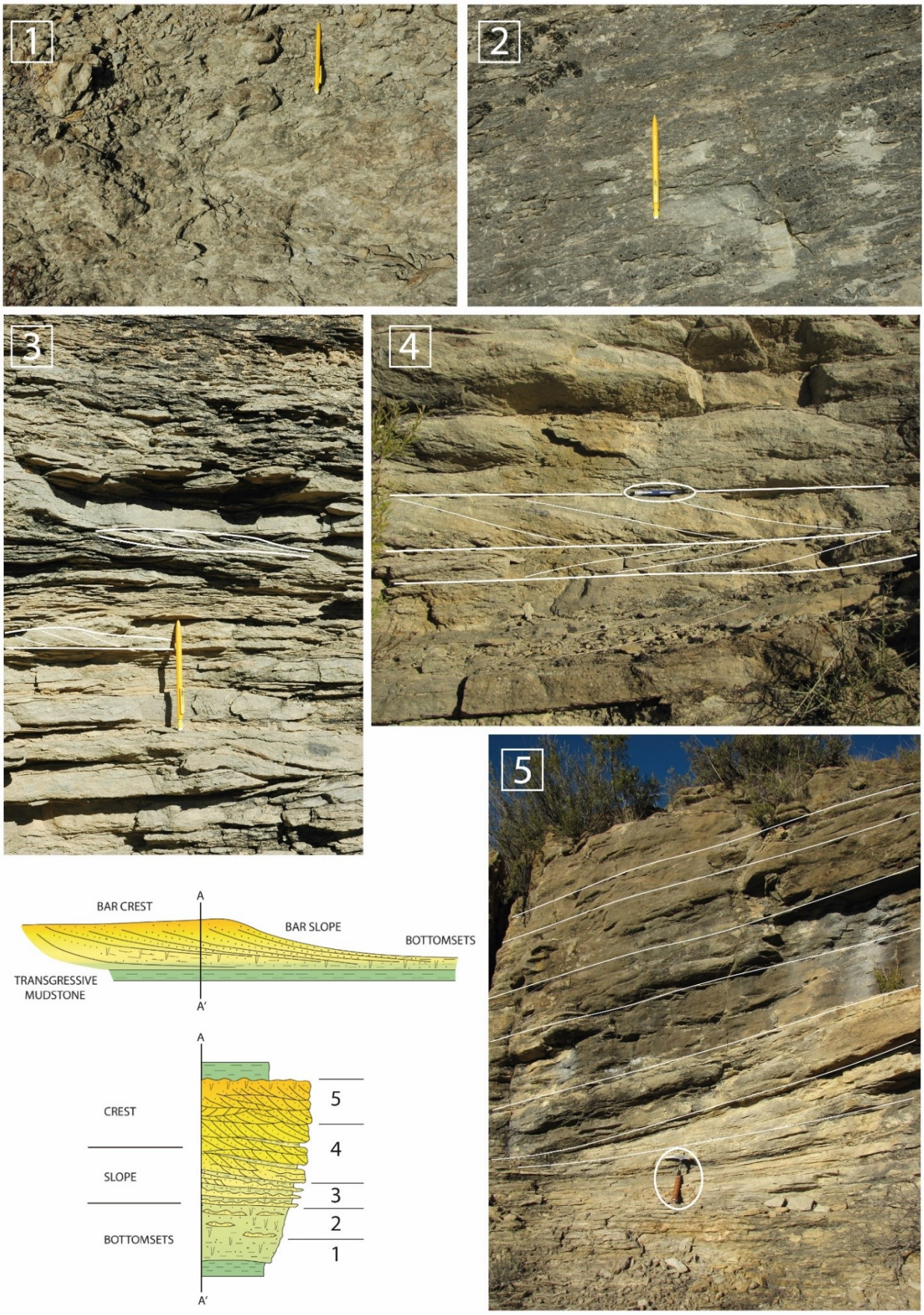


*Figura* ***Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.****4: Esempi delle varie tipologie di facies riconosciute (vedasi testo per maggiori dettagli). In basso a sinistra è riportato il modello di una barra sigmoidale con le facies corrispondenti (modificato da Mutti et al., 1985).*

A questo proposito è stato anche effettuato uno studio di dettaglio su una barra sigmoidale ben affiorante nell'area di Les Alteres sul fianco sud della sinclinale (vedasi Mutti et al. 1994, 2000). In questo caso la misurazione di 9 log stratigrafici di dettaglio lungo un affioramento che mostra una continuità laterale di circa 400 metri, ha permesso di realizzare un pannello di correlazione di dettaglio per osservare le variazioni latero-verticali delle facies di una barra tidale progradante. Durante questo studio sono stati prelevati anche dei campioni su cui si è cominciato a svolgere analisi granulometriche, mediante il granulometro Mastersizer 3000 appartenente al gruppo Next del plesso di Scienze della Terra, per valutare la presenza di eventuali variazioni apprezzabili di granulometria rispetto alle valutazioni effettuate direttamente sul terreno.

Le barre sigmoidali del Figols 1 sul fianco sud caratterizzano le parti basali di 5 EDS (Elementary depositional sequences nel senso di Mutti et al. 1994). Queste ultime, legate ad una ciclicità ad alta frequenza attribuibile ai cicli astronomici di Milankovic (vedasi Mutti et al. 2000), formano il mattone fondamentale della stratigrafia degli allogruppi. Ogni EDS, infatti, è costituita da una successione sedimentaria di ordine decametrico composta da una litofacies basale grossolana che passa verso ad una litofacies fine che registrano una fase iniziale di progradazione dei depositi tidali (regressione) seguita da una fase di abbandono e trasgressione. Le EDS, quindi, unità ben individuabili grazie all'alternanza tra depositi prevalentemente siltitici ricchi in tracce fossili e glauconite e le barre tidali, sono fondamentali non solo per le ricostruzioni paleoambientali, ma anche perché rappresentano le unità chiave che legano la ciclicità climatica ad alta frequenza con i vari tipi di facies.

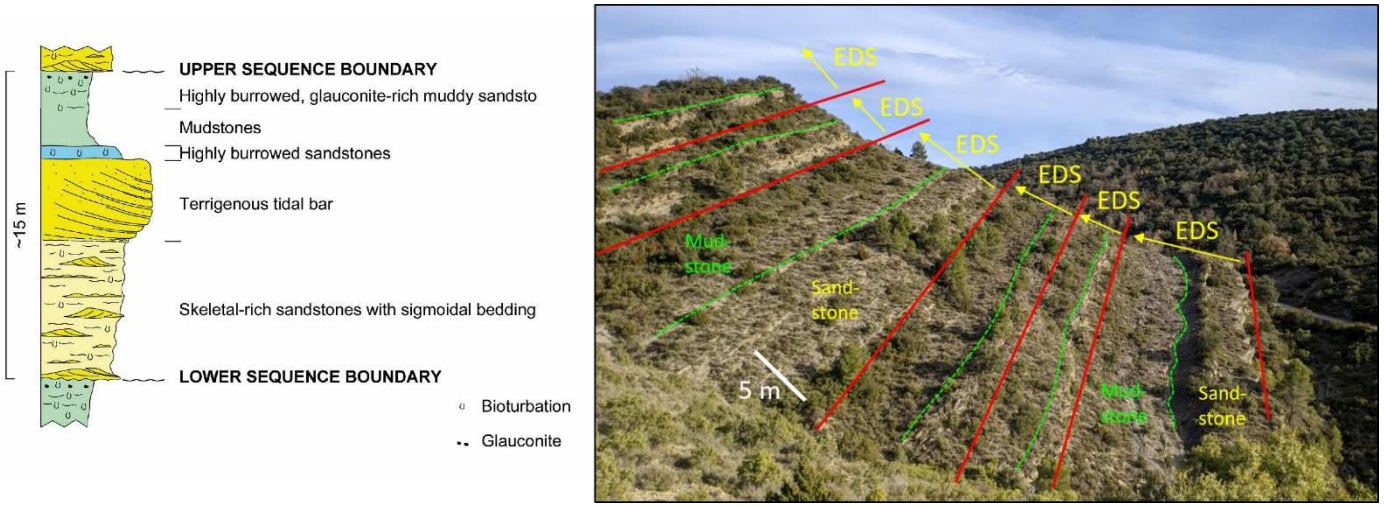


*Figura **Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.**5: Esempio di EDS (a sinistra, da Mutti et al. 2000); panoramica della successione in località Les Alteres del Figols 1 con la divisione in EDS (a destra).*

Da questo punto di vista, la ricostruzione paleogeografica dei depositi studiati mette in evidenza la presenza (al tempo della deposizione del Figols 1 e 2) di un golfo ristretto, allungato est-ovest ed aperto verso l'oceano dove le correnti tidali avevano la capacità di rielaborare i sedimenti trasportati in bacino da sistemi fluvio-deltizi (vedasi anche Mutti et al. 1985). In particolare i dati sulle paleocorrenti e sulle dimensioni delle strutture sigmoidali mostrano la presenza di correnti dominanti verso Est particolarmente efficienti sul fianco nord e correnti subordinate che tendevano ad uscire dal golfo prediligendo il fianco sud del bacino con un profilo delle velocità relativamente asimmetrico. In particolare, il fianco sud della sinclinale è caratterizzato da spessori delle barre sigmoidali piuttosto omogenei, ma spostandosi verso la zona più assiale della sinclinale si nota come lo spessore delle barre aumenta leggermente, suggerendo la presenza di una zona più depocentrale. Totalmente differente è la situazione sul fianco nord, dove le sezioni sono costituite (soprattutto nelle porzioni basali) da numerosi orizzonti conglomeratici, probabilmente legati ad eventi gravitativi legati a piccoli sistemi alluvionali sviluppati sull'alto strutturale creato dal Thurst del Montsec. Oltre a questi livelli, il Figols 2 è costituito prevalentemente da intervalli continui anche spessi decine di metri di arenaria media organizzata in sigmoidi spessi e molto spessi che superano frequentemente i 20 cm. La mancanza di una percentuale consistente di sedimento fine potrebbe indicare, come detto sopra, un ambiente tidale più energetico legato all'interazione delle correnti tidali con il fianco nord più ripido a causa della attività sinsedimentaria del Thrust del Montsec.

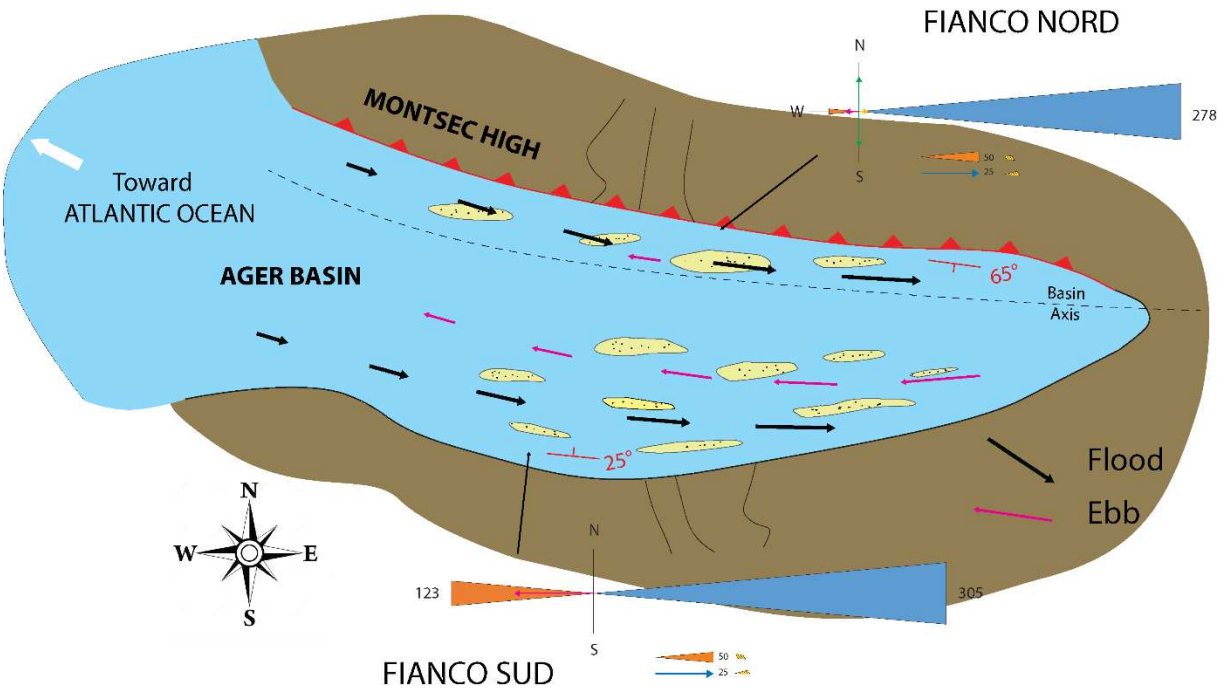


*Figura 6: Paleogeografia del bacino di Ager nell'Eocene inferiore. Le paleocorrenti si basano sui dati derivanti dalle strutture sigmoidali.*

In conclusione, sebbene buona parte dei dati raccolti sia ancora in una fase di elaborazione, il lavoro svolto durante questi 18 mesi ha portato, come principale risultato, l'ottenimento, per la prima volta, di una stratigrafia fisica di dettaglio dei depositi tidali cha caratterizzano le sequenze deposizionali del Figols 1 e 2 (Eocene inferiore) del bacino di Ager. Questa stratigrafia fisica ad alta risoluzione servirà come base per eseguire ulteriori analisi più approfondite per comprendere e valutare le relazioni tra le variazioni di facies e i cambiamenti climatici ad alta frequenza correlabili con i periodi ipertermali dell'optimum climatico dell'Eocene inferiore. Da questo punto di vista, c'è quindi l'intenzione di proseguire nell'elaborazione e approfondimento dei dati raccolti con lo scopo di affinare le osservazioni già avanzate e poter terminare gli articoli in preparazione da pubblicare su riviste scientifiche di impatto.

Elenco degli elaborati prodotti:

- Pannelli di correlazione del fianco nord e del fianco sud paralleli alle paleocorrenti (vedasi Fig. 3)
- Pannello di correlazione in direzione nord-sud perpendicolare alle paleocorrenti (vedasi Fig. 3)
- Pannello di dettaglio della barra tidale di Les Alteres (vedasi riquadro rosso in Fig. 3)
- Grafici di distribuzione delle paleocorrenti indicate dalle strutture sigmoidali
- Grafici di distribuzione degli spessori e della granulometria delle strutture sigmoidali
- Analisi granulometriche di dettaglio (mediante granulometro Mastersizer 3000) sulle facies caratterizzanti le barre sigmoidali (vedasi Fig. 4)

**Bibliografia:**


Boyd, R., Dalrymple, R.W., Zaitlin, B.A., (2006). Estuary and incised valley facies models. In: Posamentier, H.W., Walker, R.G. (Eds.), Facies Models Revisited. SEPM Special Publication, vol. 84, pp. 171–234.

Davis R.A. and Darlymple R.W. (2012). Principles of tidal sedimentology. Springer, 621 p.

Castelltort S., Nowak A., Hunger T., Laeuchli C., Honegger L., Spangerberg J., Adatte T., Puigdefabregas C., Fildani A., Chanvry E., Foreman B., Poyatos-More M., Clark J. (2018). Climatic controls on clastic deposition - Early Eocene hyperthermals force deltaic regression in the South-Pyrenean Foreland Basin, Roda de Isabena, Spain. ISC 2018, Québec City.

Dominici, S. and Kowalke, T. (2007). Depositional dynamics and the record of ecosystem stability: early Eocene coastal communities in the Pyrenean foreland, Spain. Palaios, 22, 268-284.

Dominici, S. and Kowalke, T. (2014). Early Eocene Cerithioidean gastropods of mangrove-fringed coasts (South-central Pyrenees, Spain). Boll. Soc. Paleont. It., 53, 137-162.

Llompart (1977). Paleoecologia de la fauna de moluscos ilerdienses en un sector de la vall d'Ager (prov. Lleida). Universidad Autonoma de Barcelona, Publicaciones de Geologia, 7, 1-249.

Luterbacher, H.P. (1970): Environmental distribution of early Tertiary microfossils, Tremp Basin, northeastern Spain. Rept. Esso Prod. Research-European Labs., 48 p., Bègles

Mutti, E. (1992). Turbidite Sandstones. Agip-Istituto di Geologia, Universita` di Parma, San Donato Milanese, 275 pp.

Mutti, E., Allen, G.P. and Rosell, J., (1984). Sigmoidal-cross stratification and sigmoidal bars: depositional features diagnostic of tidal sandstones. 5th IAS European Regional Meeting, Marsiglia, Abstract volume, 312-313.

Mutti E., Rosell J., Allen G.P., Fonnesu F., Sgavetti M. (1985). The Eocene Baronia tide dominated delta shelf system in the Ager Basin. In: Mila M.D., Rosell J. (eds) Excursion guidebook: VI Eur. Reg. Meeting, IAS, Lerida, p. 579–600.

Mutti E, Sgavetti M, Waehry A, Carminatti M, Davoli G, Ghielmi M, Figoni M, Mora S (1994). Regional stratigraphy and sequence-stratigraphic aspects of the Figols Group.In: Mutti E., Davoli G., Mora S. and Sgavetti M. (eds) The eastern sector of the south-central folded Pyrenean Foreland: criteria for stratigraphic analysis and excursion notes. Second high-resolution sequence stratigraphic conference, Tremp, p. 37–41.

Mutti E., Davoli G., Tinterri R., Zavala C. (1996). The importance of ancient fluvio-deltaic systems dominated by catastrophic flooding in tectonically active basins. Memorie Di Scienze Geologiche, 48, 233-291.

Mutti E., Tinterri R., Di Biase D., Fava L., Mavilla N., Angella S., Calabrese L. (2000). Delta-front associations of ancient flood-dominated fluvio-deltaic systems. Revista de la Sociedad Geológica de España, 13, 165-190.

Mutti E., Tinterri R., Benevelli G., Di Biase D., Cavanna G. (2003). Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins. Marine and Petroleum Geology, 20, 733-755.

Mutti, E., Tinterri, R., Minelli, N., Caré D. (2009). Some remarks on the tidal facies associations of the Ager Basin (lower Eocene, south-central Pyrenees). In: Pascucci V. & Andreucci S. (Eds), 27th IAS MEETING OF SEDIMENTOLOGY, Alghero 20-23 September 2009, Abstract Book, p. 620.

Stow, D. and Smillie, Z. 2020. Distinguishing between Deep-Water Sediment Facies: Turbidites, Contourites and Hemipelagites. Geosciences, 10, 1-43.

Tinterri R. (2007). The lower Eocene Roda Sandstones (south-central Pyrenees): an example of a flood-dominated river delta system in a tectonically controlled basin. Riv. It. Paleo. Strat., 113, 223-255.

Tinterri R. (2011). Combined flow sedimentary structures and the genetic link between sigmoidal- and hummocky-cross stratification. GeoActa, 10, 1-43.