

Università degli studi di Genova



Dipartimento di Scienze della Terra

dell'Ambiente e della Vita

Scuola di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Corso di Laurea Magistrale in Scienze Geologiche

Tesi di Laurea Magistrale

**Ricostruzione paleoambientale e calibrazione di alcuni
campioni prelevati presso ritrovamenti di grandi cetacei
cenozoici presso Asti**

Candidato:

Giacomo Glioti, 4989349

Relatore:

Antonino Briguglio

Correlatore:

Michele Piazza

Sessione di Laurea:

10 settembre 2026

Anno Accademico:

2025/2026

Indice

1. Riassunto	3
2. Introduzione	4
3. Inquadramento geologico	6
4. Materiali e metodi	10
5. Risultati	17
6. Indagini sulle associazioni dei campioni.....	30
7. Discussione	41
8. Conclusioni	56
9. Bibliografia e sitografia	59

1. Riassunto

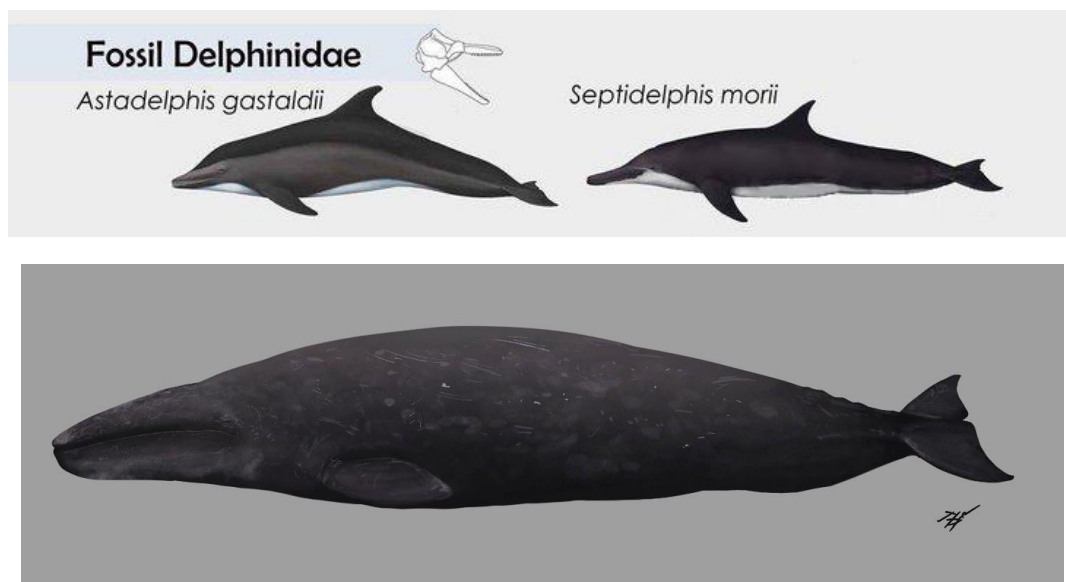
Questo studio mira a fare luce sull'ecologia, l'età e le condizioni paleoambientali dei depositi sedimentari del Neogene in cui sono stati rinvenuti fossili di cetacei nei dintorni di Asti, nella regione del Piemonte (Italia nord-occidentale). Sono stati analizzati 16 campioni di sedimento sciolto, 2 datati al Burdigaliano-Langhiano, 6 datati al Tortoniano, 6 datati allo Zancleano e 2 datati al Piacenziano. I dati identificano i resti come provenienti dal Bacino Terziario Piemontese e del Bacino Padano, permettendo di ricavare diversi parametri paleoecologici e paleoambientali, principalmente concentrandosi sulla paleobatimetria, l'ossigeno disciolto in acqua al fondale e il livello trofico dell'ambiente. Secondo i dati estrapolati, la paleobatimetria nei campioni pliocenici rimane decisamente costante e relativamente bassa (entro i 50 m), mentre per quelli miocenici (malgrado si trovino tutti al di sotto dei 150 m) vi è risultata essere molta più variabilità nelle profondità. Alcune delle batimetrie stimate sono risultate essere in disaccordo con la letteratura, e dunque è probabile che in quegli specifici livelli vi sia stata contaminazione da parte di sedimento trasportato da profondità maggiori tramite eventi gravitativi. La maggior parte dei campioni è risultata essere in condizioni mediamente ossiche e mesotrofiche, con alcuni rari casi che mostrano invece drastiche risalite o crolli di ossigeno, associate rispettivamente a condizioni di marcata oligotrofia o eutrofia. Questo lavoro concretizza una prima ricostruzione paleoambientale e paleoecologica delle condizioni ambientali dei fondali marini nei bacini interessati, limitatamente alle zone di ritrovamento dei cetacei fossili, così da poter meglio contestualizzare il loro ambiente di fossilizzazione.

2. Introduzione

Le successioni sedimentarie mioceniche del Bacino Terziario del Piemonte e quelle plioceniche del Bacino Padano sono caratterizzate dalla presenza di rilevanti faune a grandi mammiferi marini, tanto da essere state oggetto di numerosi studi negli ultimi decenni ed essere attualmente ancora intensamente studiate (e.g., Bisconti et al, 2020-2021-2025; Carnevale et al., 2019; Ormezzano & Lanzetti, 2014; Trenkwalderr et al., 2008).

In questo contesto, i resti fossili di mammiferi marini rinvenuti nei dintorni di Asti e Borgomanero (Piemonte, Italia nord-occidentale) costituiscono una componente di grande valore del patrimonio paleontologico regionale. La loro corretta interpretazione consente infatti di ricostruire importanti aspetti della storia geologica e paleoecologica dell'antico Piemonte, offrendo una preziosa finestra sugli ambienti marini che caratterizzavano l'area durante il Neogene (Bisconti et al., 2020).

Nel corso degli anni, i numerosi reperti di mammiferi marini fossili scoperti nella regione sono stati raccolti e studiati sia da appassionati e collezionisti privati sia da ricercatori universitari, contribuendo alla formazione di un registro paleontologico tra i più ricchi e significativi d'Europa. Attualmente, tale patrimonio comprende centinaia di esemplari, che documentano molteplici aspetti della storia naturale del territorio piemontese (Ormezzano & Lanzetti, 2014).



Ricostruzione artistica di *Astadelphis gastaldii*, *Septidelphis morii* ed *Eschrichtioides gastaldii* (Jaime Bran, 2018 & 2022)

Le collezioni piemontesi hanno fornito la base per numerose pubblicazioni scientifiche, rappresentando un riferimento fondamentale per gli studi sulla paleontologia dei cetacei sviluppatisi

nel corso del XXI secolo. Tra i reperti conservati figurano gli olotipi di diversi odontoceti, quali *Astadelphis gastaldii* e *Septidelphis morii*, e di misticeti, tra cui *Eschrichtioides gastaldii*, *Atlanticetus lavei* e *Marzanoptera tersillae*. A questi si aggiungono numerosi esemplari conservati in collezioni che attendono di essere descritte e approfonditamente investigate (Bisconti et al., 2020).

Nonostante il considerevole interesse scientifico suscitato dai cetacei rinvenuti nei depositi sedimentari piemontesi, le caratteristiche degli ambienti in cui questi organismi vivevano e si sono successivamente fossilizzati rimangono ancora oggetto di discussione e dibattito (Violanti et al., 2013; Ghielmi et al., 2019). In questo contesto, i microfossili associati ai sedimenti che ospitano i reperti rappresentano uno strumento particolarmente efficace per la ricostruzione paleoambientale. L'analisi integrata di tali associazioni microfaunistiche permette infatti di ottenere informazioni fondamentali sull'età dei depositi e sui principali parametri ecologici che caratterizzavano l'ambiente deposizionale (Lázár et al., 2026).

Alla luce di queste considerazioni, il presente lavoro si propone di analizzare in dettaglio le associazioni a foraminiferi presenti nei sedimenti correlati ai diversi resti di cetacei. L'obiettivo è identificare le specie presenti, definirne la distribuzione stratigrafica e ricostruire le condizioni paleoambientali attraverso il confronto con i dati disponibili in letteratura, con particolare attenzione rivolta agli studi riguardanti l'area Padana. Sulla base delle caratteristiche ecologiche delle associazioni individuate, vengono inoltre stimati parametri quali il grado di ossigenazione delle acque, il livello di trofismo e la paleobatimetria degli ambienti deposizionali, nonché ridefinita una datazione cronostatigrafica per i depositi studiati. Tali informazioni consentono di attribuire un contesto paleoecologico ai campioni di sedimento analizzati e, di conseguenza, ai resti fossili di mammiferi marini ad essi associati.

3. Inquadramento geologico

3.1 Inquadramento generale

Durante il Miocene e il Pliocene, nell'intervallo di tempo compreso tra 23.04 e 2.58 Ma B.P., ebbero luogo le fasi terminali dell'orogenesi alpina e nord appenninica e si delinearono gli eventi tettonici ad esse posteriori (Neotettonica).

Nel settore interno dell'Arco Alpino sud-occidentale, nel Piemonte centro-meridionale, l'attività tettonica influenzò significativamente il territorio ed ebbe grandi conseguenze sul Bacino Terziario Piemontese (BTP); un grande bacino sedimentario la cui formazione prende il via tra l'Eocene superiore e l'Oligocene, con la deposizione di sedimenti continentali e di mare poco profondo all'interno di piccoli depocentri isolati e controllati da faglie. Tra questi affioramenti sedimentari spicca la Formazione di Molare, impostatasi sulla catena delle Alpi Liguri e su quella dell'Appennino settentrionale, nell'areale di affioramento nel quale ricade la città di Asti (Maino et al., 2013; Violanti, 2012-2013).

I sedimenti del Bacino Terziario Piemontese poggiano in netta discordanza geometrica sopra un basamento caratterizzato da unità con composizione e pertinenza crostale estremamente eterogenee.



Estensione del Golfo padano (Parco Paleontologico Astigiano, Regione Piemonte)

Le diverse unità formazionali trovate sul territorio contengono un'imponente successione di sedimenti, prevalentemente di origine terrigena, che da vari affioramenti sembra raggiungere lo spessore di circa 6000 metri, ed è riconducibile ad un arco temporale compreso tra l'Eocene superiore e il Pleistocene (Ghielmi et al., 2019). Durante l'Oligocene, l'intera area è stata interessata da un generale e progressivo approfondimento. Questo fenomeno ha portato alla configurazione di un ampio bacino di tipo piggy-back, delimitato a nord dall'Arco del Monferrato e caratterizzato, tra l'Oligocene superiore e il Miocene inferiore, da una diffusa sedimentazione clastica di mare profondo (Laubscher et al., 1996; Piana, 2000). A partire dal Serravalliano, le successioni sedimentarie del BTP sono state profondamente coinvolte dalle dinamiche della tettonica padana, caratterizzata da spinte e deformazioni con vergenza verso nord (Falletti et al., 2017). A partire dal Miocene medio, il sollevamento tettonico del margine meridionale ha imposto un fenomeno di inclinazione a scala regionale, determinando la progressiva migrazione del bacino verso nord, dove il bacino si arresta a ridosso delle prime strutture compressive del Monferrato. L'intero sistema risulta sovrascorso sopra l'avanfossa padana, lungo una grande discontinuità strutturale: il fronte compressivo padano. Questa importante linea di sovrascorrimento si è impostata a partire dal Miocene superiore, guidando il progressivo seppellimento dei domini più esterni e definendo l'attuale assetto geometrico e geologico del sottosuolo padano (Ghielmi et al., 2019).

Storicamente è sempre stato ipotizzato che durante il Messiniano, in un arco temporale compreso tra 7 e 5 milioni di anni fa, una intensa fase collisionale tra la placca africana e quella europea provocò il progressivo isolamento del Mar Mediterraneo dall'Oceano Atlantico. Tuttavia, recenti studi mostrano come la modellizzazione numerica dei bilanci idrici e salini indica che i cicli di deposizione di gessi e marne potrebbero essere derivati sia da variazioni del bilancio idrologico (di circa il 20%) sia dall'oscillazione della restrizione dei canali marini causata da fluttuazioni del livello del mare di circa 10 metri in concomitanza con il sollevamento tettonico e l'erosione dei canali stessi (Krijgsman et al., 2024). Questo suggerisce che è possibile che non vi sia stata per forza una occlusione dello stretto di Gibilterra, ma ad ogni modo questa riduzione di importi idrici, combinata con repentine variazioni climatiche a scala globale, andò ad innescare un regime di fortissima evaporazione (Violanti, 2012).

Il livello delle acque marine subì un drastico abbassamento, determinando l'emersione di vastissime porzioni di fondale. Questo scenario, caratterizzato dal continuo alternarsi di fasi di estremo disseccamento (con la conseguente precipitazione di imponenti strati di sali) e ciclici rifornimenti idrici è conosciuta come "Crisi di salinità del Messiniano". Nelle depressioni che rimasero sommerse si accumularono immensi volumi di evaporiti, costituiti prevalentemente da solfati (come gesso e

anidrite). Di questo evento rimane ad oggi un'estesa e nitida documentazione proprio nel settore astigiano del bacino (Martinis, 1954; Krijgsman et al., 2024; cum bibl.).

Al termine del Messiniano si registrò una spettacolare inversione di tendenza: le acque oceaniche tornarono a invadere l'intera area dell'odierna Pianura Padana, configurando un profondo e vasto golfo marino collegato al bacino adriatico (Pierre & Irace, 2008). La rapidità e l'efficacia di questa trasgressione marina fa ipotizzare che la riapertura delle comunicazioni con l'Atlantico sia avvenuta attraverso un varco persino più ampio e profondo dell'attuale Stretto di Gibilterra. Questo evento sancì il passaggio formale all'epoca pliocenica. I relativi depositi marini affiorano oggi in modo diffuso in tutto il Piemonte centro-meridionale, spingendosi fino ai piedi delle catene alpina e appenninica e insinuandosi persino all'interno delle antiche vallate.

In questo rinnovato contesto geografico, noto come Bacino Padano, solo poche isole emerse interrompevano la continuità dello specchio d'acqua. Il bacino riceveva imponenti volumi di sedimenti detritici dalle Alpi, allora in fase di rapido sollevamento e sottoposte a un'intensa erosione, mentre i contributi terrigeni provenienti dai rilievi del Monferrato e della Collina di Torino, strutture orogeniche di recente formazione, risultavano relativamente più modesti (Trenkwalder et al., 2008). Le ricche associazioni fossili rinvenute in queste successioni testimoniano lo sviluppo di ecosistemi marini e terrestri tipici di un clima subtropicale, caratterizzato da temperature e tassi di umidità sensibilmente superiori rispetto a quelli attuali (Bertini & Martinetto, 2008).

3.2 Unità formazionali presenti nello studio

3.2.1 Pietra da Cantoni

Marne e marne calcaree biancastre con stratificazione mal distinta.

Custodisce una ricca associazione fossile (foraminiferi planctonici, radioli di echinoidi, bivalvi, gasteropodi); rappresenta corpi rocciosi di rilievo paesaggistico nati dall'evoluzione di un sistema deposizionale circalitorale o di scarpata superiore (Bicchi et al., 2006; Ghielmi et al., 2019; cum bibl.).

Litofacies Biocalcarenitica: Sabbie calcaree formate da frammenti di guscio e scheletri di organismi marini.

Litofacies Biocalciruditica: Ghiaie calcaree formate da frammenti di parti scheletriche di organismi.

3.2.2 Marne di Sant'Agata Fossili

Argille e marne argillose grigio-azzurre con intensa bioturbazione.

Spessore di 100-150 metri, con affioramenti rari ed erosi; poggiano su successioni sottostanti segnalando variazioni deposizionali; sono tipiche di ambienti di scarpata e piattaforma esterna con flussi gravitativi e circolazione ristretta che va a precedere la crisi messiniana. (Bicchi et al, 2006).

Litofacies Arenacee: Arenarie silicoclastiche fine-medie.

Corpi clastici risedimentati: Lenti conglomeratiche, sabbie canalizzate.

3.2.3 Argille Azzurre

Argille

Insieme, costituiscono il termine basale della successione pliocenica. I depositi affiorano in un'ampia fascia continua che borda verso sud l'areale dei sedimenti più antichi del bacino. (Dela Pierre, 2003; Bicchi et al, 1999).

Litofacies Marnose: Formate da marne e argille marnoso-siltose di colore grigio-azzurro o grigio-chiaro.

Intercalazioni Siltoso-Sabbiose: Sottili strati o lenti di siltiti e sabbie fini. La presenza di queste intercalazioni altera localmente la permeabilità della roccia. Riduce la plasticità tipica dell'argilla e introduce frazioni sabbiose nei suoli derivati dal loro disfacimento.

3.2.4 Sabbie di Asti (Membro calcarenitico)

Alternanza di orizzonti sabbiosi e livelli siltoso-argillosi, talvolta ricchi di granuli glauconitici.

Mostra stratificazione incrociata ad alta energia nei sedimenti grossolani e stratificazione piano-parallela con fratture e strutture di deformazione sinsedimentaria (slump, fiamme, pieghe da carico) negli intervalli fini (Dela Pierre, 2003; Bicchi et al, 2003).

3.2.4 Sabbie di Asti (Membro Sabbioso)

Sabbie medio-fini omogenee di colore giallo, con forte cementazione carbonatica locale.

Ha una vasta distribuzione spaziale, strutturazione poco evidente (blanda organizzazione piano-parallela e ripples simmetrici tipici di moto ondoso) e si sovrappone alle Argille Azzurre tramite un contatto erosivo netto (Dela Pierre, 2003; Bicchi et al, 2003).

4. Materiali e metodi

I sedimenti qui presi in analisi, sono stati raccolti congiuntamente ai resti fossili di mammiferi marini e, stando a quanto riportato dai raccoglitori, sono riferibili alle unità litostratigrafie qui di seguito dettagliate: Pontestura, Chiusano d'Asti, Capriglio, Cortiglione, Borgomanero, Belangero, San Marzanotto, Rosignano Monferrato, Moletto e Valle Botto (Fig. 1).

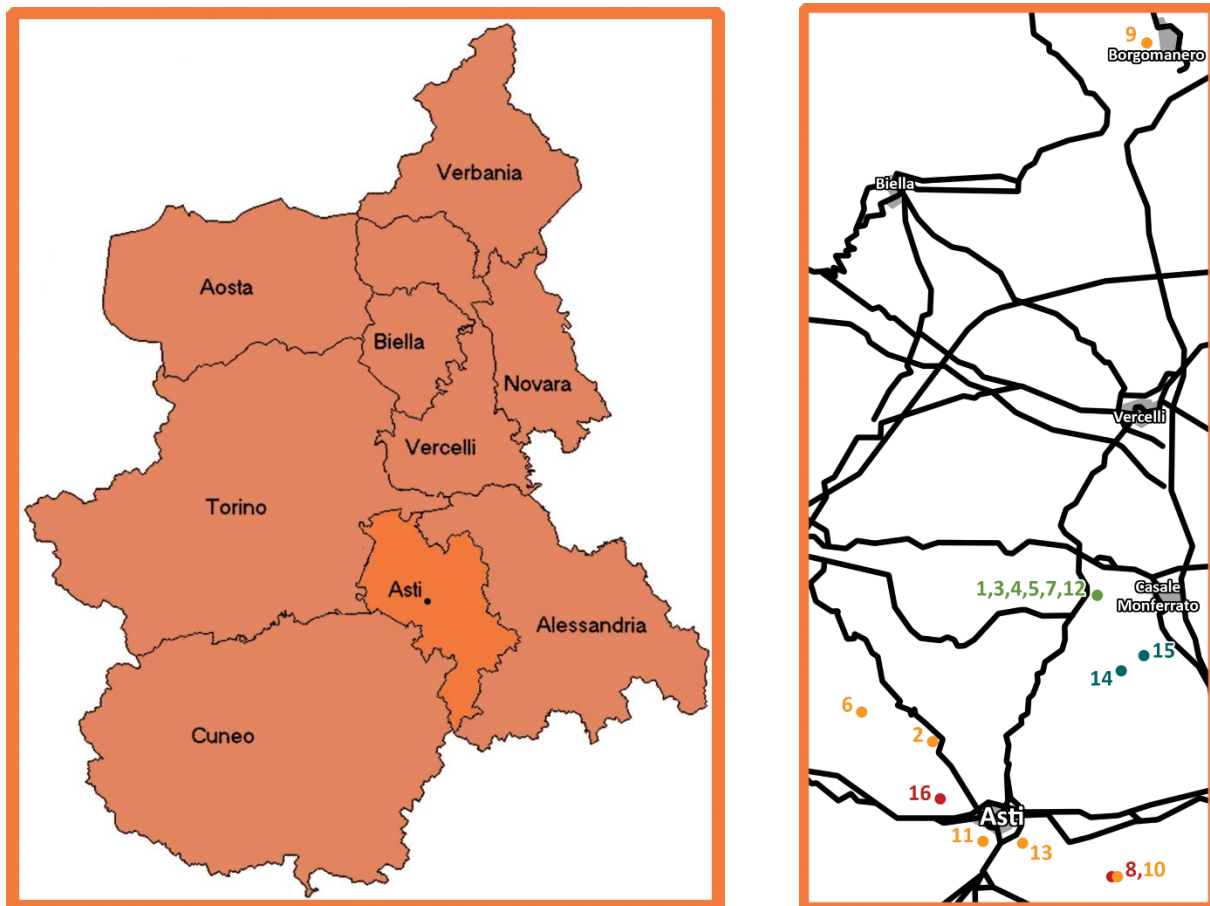


Figura 1: Mappe di Piemonte e Valle d'Aosta, e dei siti di provenienza dei campioni; Campione 1, Pontestura (AL); Campione 2, Chiusano d'Asti (AT); Campione 3, Pontestura (AL); Campione 4, Pontestura (AL); Campione 5, Pontestura (AL); Campione 6, Capriglio (AT); Campione 7, Pontestura (AL); Campione 8, Cortiglione (AT); Campione 9, Borgomanero; Campione 10, Cortiglione (AT); Campione 11, Belangero (AT); Campione 12, Pontestura (AL); Campione 13, S. Marzanotto (AT); Campione 14, Moletto (Ottiglio, AL); Campione 15, Rosignano Monferrato (AL); Campione 16, Valle Botto (AT).

4.1 Raccolta ed elaborazione dei dati

Prima di essere studiati per questo lavoro, i campioni sono stati preliminarmente raccolti e conservati dal Museo Paleontologico Territoriale di Asti (sotto la supervisione del dott. Da Marco), poi lavati e preparati per una tesi triennale (Marotta, 2022), ricerca completata successivamente nella tesi triennali di Glioti, che questo lavoro espande ed aggiorna.

Le informazioni fornite dai campionatori, insieme al materiale da esaminare, sono principalmente riferite alla località nella quale ogni singolo campione è stato raccolto e ad una breve descrizione o tratto caratteristico per distinguerlo dagli altri.

Secondo quanto riportato da Marotta (2022), la preparazione dei campioni ha previsto una procedura standardizzata, lasciando il campione grezzo una notte a riposo immerso in acqua calda per disgregarlo, per poi procedere al lavaggio in acqua corrente, finalizzato alla rimozione della frazione fine argillosa, tramite setacciatura svolta utilizzando due setacci di maglia con apertura di 250 e 63 μm . Inoltre, dopo ogni setacciatura i setacci sono stati passati nel blu di metilene per tingere e rendere facilmente identificabile qualsiasi particella o frazione fossile residua da campioni precedentemente setacciati, che potrebbe andare a contaminare il campione successivo. Infine, il materiale è stato drenato con l'ausilio di un imbuto sospeso, munito di filtro per consentire di scolare l'acqua ma trattenere il sedimento, e poi lasciato a riposare in forno tutta la notte a 70°C per eliminare del tutto l'umidità residua, prima di travasarlo in una serie di contenitori di plastica. Il processo ha avuto il fine di isolare la frazione granulometrica contenente i microfossili (Fig.-2a) per disgregare il sedimento e ottenere i campioni sciolti utilizzati nelle indagini svolte.

Per questo lavoro di tesi è stato fatto il picking dei foraminiferi contenuti in tutti i 16 campioni, tramite l'utilizzo di uno stereomicroscopio GZ808 (Fig.-2b), di un sottile ago metallico usato per raccogliere i gusci da un vassoietto antistatico (Fig.-2c) e posizzionarli in apposite micro-teche (Fig.-2d). In primo luogo, è stato svolto il picking manuale degli organismi, impostando un valore ottimale da raccogliere di ~300 esemplari per campione. In media sono stati raccolti 235 esemplari per campione, talvolta ritrovando però valori sensibilmente minori a quelli auspicati, a conseguenza del fatto che per i campioni C6, C8, C9, C16 e C11, non è stato possibile raccogliere un numero di esemplari pari a 300 o, quantomeno, ragionevolmente vicino a tale valore; ciò è dovuto alla povertà del contenuto in foraminiferi del sedimento trattato. Per i citati campioni, dunque, sono stati prelevati dai sedimenti tutti gli individui disponibili.



Figura 2: a: Campioni sciolti; b: stereomicroscopio GZ808; c: Vaschetta portacampione e aghetto; d: Microteche numerate

I campioni che hanno rilasciato un numero totale di individui inferiore a 300 sono stati comunque analizzati con gli stessi criteri adottati per gli altri, tenendo però conto della loro minore affidabilità statistica; tale aspetto è segnalato mediante un apposito contrassegno in tutta la relativa iconografia.

Alcuni dei taxa sui quali è stato fatto maggior affidamento per le varie indagini sono foraminiferi che presentano caratteristiche particolarmente adatte per essere utilizzati come indicatori di età mentre altri mostrano, invece, caratteristiche che li rendono particolarmente utili per stimare specifici parametri ambientali. Entrambe le tipologie di organismo, chiamati fossili guida nel caso la loro utilità sia biostratigrafica e fossili di facies se invece usati come indicatori paleoambientali, dispongono di caratteri fondamentali che li rendono perfetti per estrapolare informazioni utili, ma idealmente sono accomunate dal presentare taxa facilmente riconoscibili, abbondanti e che rispondono notevolmente al cambiamento delle condizioni di vita. I principali parametri paleoambientali calcolati mediante

l'analisi delle associazioni a foraminiferi comprendono la paleobatimetria (profondità di deposizione e di vita), il grado di ossigenazione del fondale e lo stato trofico dell'ambiente.

Il processo di identificazione dei foraminiferi ha consentito di distinguere morfologicamente i diversi taxa e di determinare il numero di individui appartenenti a ciascuna specie presente nei vari campioni. È stata quindi svolta un'analisi di tipo quantitativo, permettendo di andare ad elaborare i dati numerici raccolti attraverso l'impiego del software di analisi statistica PAST (Hammer et al., 2001). Per l'identificazione delle varie specie e la definizione del loro range biostratigrafico è stato consultato l'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e sono stati visitati alcuni database online e repositories (WoRMS, 2024, mikrotax.org website, Foraminifera.eu Database), oltre alla consultazione di bibliografia specialistica (Carnevale et al. 2019; Hayward et al., 2026; Trenkwalder et al., 2008; Violanti, 2005).

Le specie riconosciute sono state fotografate mediante l'utilizzo di un microscopio elettronico a scansione (SEM) Tescan Vega 3 (Tavola 1-4), per la quale sono stati appositamente preparati supporti conduttivi in alluminio (stub), ricoperti da una pellicola biadesiva sulla quale sono stati incollati diversi esemplari provenienti da ogni tipo di taxa identificato, posizionati in viste differenti per consentire una visione più completa e poter meglio riconoscere le caratteristiche morfologiche fondamentali, e infine, ricoperti da un rivestimento conduttivo dorato per poterli visualizzare correttamente (Fig. 3).

Tra i parametri ambientali ricostruiti c'è il livello di ossigenazione sul fondale, ottenuto tramite la catalogazione dei foraminiferi bentonici trovati, in specie ossiche, subossiche e disossiche. I valori ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo dell'Indice di ossigeno dei foraminiferi bentonici potenzializzato (Enhanced Benthic Foraminifera Oxygen Index: EBFOI) sviluppato da Kranner et al. (2022) e derivato dall'Indice di ossigeno dei foraminiferi bentonici (Benthic Foraminifera Oxygen Index: BFOI) di Kaiho (1994). I valori dell'EBFOI delineano diverse soglie di ossigenazione ambientale: da 100 a 50, ambiente fortemente ossico; da 49 a 0, ambiente debolmente ossico; da -1 a -40, ambiente subossico; da -41 a -50, ambiente disossico; da -51 a 55, ambiente anossico (assenza di ossigeno). Generalmente la quantità di ossigeno disciolto in acqua sul fondale funge anche da indicatore per il livello trofico di un sistema. Più le condizioni vanno verso quelle eutrofiche, più vi sarà materia organica in decomposizione e più l'attività batterica sarà elevata, portando ad una diminuzione del livello di ossigeno disciolto in acqua (Schmiedl et al., 2000; Lázár et al., 2026).



Figura 3: Stub preparati per l'acquisizione delle immagini tramite un microscopio elettronico a scansione (SEM) Tescan Vega 3.

La funzione per convertire i valori di EBFOI in valori reali di Ossigeno Disciolto (Dissolved Oxygen: DO) espresso in mL/L ricavata da Kranter (2022) è:

$$DO \text{ (mL/L)} = 5.28475 * e^{0.00616 * x} - 3.78475$$

Dove x rappresenta il valore di EBFOI ottenuto. La determinazione del livello trofico dell'ambiente di origine dei vari campioni è inversamente proporzionale con il grado di DO al fondale, in quanto è inversamente proporzionale al livello di DO. Dunque, basandosi sui valori ottenuti si può distinguere tra ambiente eutrofico ($DO < 2.0 \text{ mL/L}$), ricco di cibo e povero di ossigeno, oligotrofico ($DO > 3.5 \text{ mL/L}$) ricco di ossigeno ma povero di cibo e ambiente mesotrofico ($2.0 < DO < 3.5 \text{ mL/L}$), con una situazione intermedia tra cibo e ossigeno.

Utilizzando il programma Microsoft Excel© e il software di analisi statistica PAST (Hammer et al., 2001) è stato possibile realizzare diversi tipi di tabelle e grafici illustrativi:

- Tabelle che mostrano la distribuzione qualitativa e quantitativa dei vari taxa all'interno dei campioni (Tabella 1).
- I dati raccolti da studi precedenti (Marotta et al., 2022; Glioti et al., 2024) e quelli resi disponibili dal Museo Paleontologico Territoriale dell'Astigiano, sono stati rivisitati criticamente ed utilizzati per le conclusioni biostratigrafiche. Alle datazioni originariamente

proposte da Marotta (2022) e Glioti (2024) sono stati integrati dati sulla base delle nuove evidenze a disposizione, effettuando piccole revisioni e realizzando una tabella illustrativa per mostrare le età determinate (Tabella 2). Sebbene tale aggiornamento biostratigrafico non sia il fulcro dello studio, è stato svolto per poter meglio confrontare i vari campioni e valutare se i risultati che si avvicinano tra di loro o che presentano valori simili sono correlabili con l'età.

- Per valutare lo sforzo di campionamento, ossia la relazione tra il numero di taxa identificati e la quantità di individui prelevati nel picking, sono state fatte delle curve di rarefazione, che mostrano una fase iniziale di crescita rapida ma poi vanno a rallentare ed assumere un andamento più orizzontale.
- Tra i tipi di indagini svolte per determinare i vari parametri ecologici ci sono le indagini di diversità, che indicano per ogni campione il numero di taxa identificati (Taxa), la stima della ricchezza in specie (Chao-1), l'indice di Shannon-Weaver (S-W) e di Fisher's alpha, la dominanza (D) e la equitabilità (E) che rappresentano rispettivamente la prevalenza di un singolo taxa rispetto agli altri e la prevalenza di un'equa distribuzione numerica tra le popolazioni di vari taxa nell'ecosistema. L'indice di Fisher's alpha stima la diversità basandosi sul numero di specie e la quantità di individui appartenenti ad ognuna di esse contati per campione, risultando particolarmente adatta al confronto tra campioni di diversa dimensione e grado di completezza (Fisher et al., 1943), mentre l'indice di Shannon-Weaver (S-W) è usato per stimare la diversità prendendo in considerazione, in aggiunta, anche l'abbondanza relativa dei vari taxa (Spellerberg & Fedor 2003).
- Le analisi statistiche svolte sull'intero dataset comprendono il clustering gerarchico e la analisi delle componenti principali (Principal Component Analysis: PCA). Le analisi di cluster sono state fatte utilizzando il metodo di raggruppamento gerarchico agglomerato di tipo Unweighted Pair Group Method with Arithmetic Mean (UPGMA), mentre le PCA sono state calcolate con la matrice varianza-covarianza.
- Dopo aver stimato alcuni parametri ambientali, sono state fatte le analisi non-metriche multidimensionali (Non-metric Multi Dimensional Scaling: NMDS), utilizzate per rappresentare graficamente le somiglianze e le differenze tra i vari campioni, in quanto più due punti sono vicini più sono simili, rispettivamente alle variabili ambientali.

- I vari taxa sono inoltre stati suddivisi a seconda della composizione del guscio tra organismi ialini, porcellanacei e agglutinanti per valutarne i rapporti numerici, come è stato fatto anche per gli organismi planctonici e bentonici e per gli infaunali ed epifaunali tra le specie che vivono a contatto con il fondale. È stata calcolata anche la percentuale di foraminiferi planctonici (P) rispetto al totale degli organismi (P+B), escludendo taxa considerati infaunali profondi quali *Bulimina*, *Bolivina*, *Globobulimina*, *Fursenkoina* e *Uvigerina*, che secondo van Hinsbergen et al., (2005), data la loro propensione ad inabitare fondali in condizioni sfavorevoli, sono considerabili come stress-marker (S). Questi taxa sono dunque stati sottratti al calcolo come segue:

$$\%P = 100 * (P / (P+B-S))$$

- Infine, dopo aver stimato i dati necessari, sono state calcolate le stime batimetriche per i 16 campioni di sedimento, confrontando frazione planctonica e bentonica delle varie associazioni, esprimendone l'intervallo di confidenza associato mediante un grafico di tipo point and whisker. Per estrapolare questo dato sono state utilizzate diverse formule, la prima (D1) è illustrata da van Hinsbergen et al., (2005), basata sulla formula:

$$D1(m) = e^{3.58718 + (0.035344 * \%P)}$$

Le altre sono state basate su quelle fatte da De Rijk et al., (2000), che ha stimato due equazioni differenti basandosi sulle caratteristiche del Mediterraneo occidentale (D2) ed orientale (D3), modificate in questo lavoro:

$$D2(m) = e^{[(\%P + 64.1) / 21.1]}$$

$$D3(m) = e^{[(\%P + 81.9) / 24]}$$

Queste equazioni sono state utilizzate per calcolare i range paleobatimetrici per ogni campione, prendendo come risultato finale una media dei totali, in quanto i risultati si sono rivelati essere tutti molto vicini tra di loro, con un errore standard che aumenta all'aumentare della profondità stimata.

5. Risultati

5.1 Biostratigrafia e relazioni con le unità geologiche di provenienza

Basandosi sulle datazioni precedentemente stimate, i nuovi dati qui presentati e le informazioni presenti in bibliografia rispetto alle formazioni dalle quali provengono i vari campioni, è stato possibile stabilirne con sufficiente certezza le posizioni biostratigrafiche (Tabella 1)

	Località	Descrizione originale	Peso secco	Trattenuto	Argilla	Datazione originale	Datazione aggiornata
Campione 1	Pontestura	Livello superiore alla lente conglomeratica, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	21.97	3.83	18.14	Zancleano	Tortoniano
Campione 2	Chiusano d'Asti	Argille azzurre Pliocene inferiore	6.29	2.32	3.97	Piacenziano	Zancleano
Campione 3	Pontestura	Matrice Misticete, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	13.41	4.14	9.27	Zancleano	Tortoniano
Campione 4	Pontestura	Matrice Misticete, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	34.01	11.12	22.89	Zancleano	Tortoniano
Campione 5	Pontestura	Livello inf. contatto con lente conglomeratica, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	14.24	2.91	11.22	Tortoniano	Tortoniano
Campione 6	Capriglio	F. Sabbie di Asti, Strato a <i>Terebratula ampulla</i> , Pliocene	14.63	11.66	2.97	Zancleano	Zancleano
Campione 7	Pontestura	livello a Mesoplodon, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	8.73	1.05	7.68	Tortoniano	Tortoniano
Campione 8	Cortiglione	F. Sabbie di Asti, associazione a molluschi, Pliocene	16.22	12.21	4.01	Piacenziano	Piacenziano
Campione 9	Borgomanero	Associazione a molluschi, Pliocene	14.39	8.99	5.4	Zancleano	Zancleano
Campione 10	Cortiglione	Formazione Sabbie di Asti, Pliocene	12.42	1.22	11.2	Tortoniano	Zancleano
Campione 11	Belangero	Argille Azzurre, ritrovamento di Delfinide, Pliocene Inf.	12.3	1.56	10.74	Tortoniano	Zancleano
Campione 12	Pontestura	livello superiore a contatto con lente conglomeratica, Tortoniano F. Marne di S. Agata Fossili	18.6	5.66	12.94	Tortoniano	Tortoniano
Campione 13	S. Marzanotto	Ritrovamento Misticete "Tersilla", Sabbie di Asti, Pliocene Inf.	11.19	0.17	11.02	Zancleano	Zancleano
Campione 14	Moletto	Complesso Pietra da Cantoni, Burdigaliano, Miocene inferiore, <i>Atlantictetus lavei</i>	21.39	6.05	15.34	Zancleano	Miocene
Campione 15	Rosignano	Pietra da Cantoni, reperto <i>Tursiops miocenius</i> , Miocene inferiore	19.02	9.83	9.19	Tortoniano	Miocene
Campione 16	Valle Botto	Parte bassa delle F. Sabbie di Asti, Pliocene	25.2	12.61	12.59	Tortoniano	Piacenziano

Tabella 1: Dettagli campioni.

Il presente lavoro non ha permesso di raffinare la datazione dei campioni C14 e C15, attribuiti alla formazione della Pietra da Cantoni, in quanto gli organismi rinvenuti non forniscono significative informazioni biostratigrafiche. Considerando l'età suggerita dagli studi consultati, si è scelto di utilizzare l'intervallo Burdigaliano-Langhiano, in quanto è risultato essere quello solitamente associato a questa formazione nella letteratura consultata (Bisconti et al., 2021).

I campioni C1, C3, C4, C5, C7 e C12 sono datati al Tortoniano e attribuiti alla formazione delle Marne di S. Agata Fossili, questa attribuzione è coerente con quanto desumibile dalle datazioni disponibili in letteratura e presso il Museo.

Le analisi condotte con il materiale estratto dal picking hanno indicato come i campioni C2, C6, C9, C10, C11 e C13 siano da attribuire allo Zancleano (Pliocene inferiore). Stando ai dati forniti dal Museo, i campioni C2 e C11 provengono dalla formazione delle Argille Azzurre e i campioni C6, C10 e C13 dalle Sabbie di Asti, mentre la formazione di origine del campione C9 non è stata catalogata.

Basandosi sui dati qui prodotti, i campioni C8 e C16 hanno un'età Piacenziana, compatibile con la descritta provenienza dalla formazione delle Sabbie di Asti.

5.2 Caratteristiche generali delle associazioni a foraminiferi

Il numero complessivo di individui censiti ammonta a 3756, distribuiti in modo fortemente disomogeneo tra i vari campioni. Sono state identificate 77 specie di foraminiferi, di cui 61 specie bentoniche e 16 planctoniche, appartenenti a 52 generi (Tabella 2).

La media del numero di taxa identificati per campione è 23, con una varianza di ~67, in quanto i valori cambiano molto da un campione all'altro, anche in virtù delle differenti quantità di organismi ritrovati tra i campioni. Il minor numero di taxa è stato individuato nel campione C8, che presenta soltanto 5 taxa, mentre quelli con i valori più alti sono i campioni C3 e C7, che presentano entrambi ben 34 taxa differenti.

Tra i risultati ottenuti dall'analisi, ve ne sono alcuni derivati da indagini svolte su campioni dove il conteggio non ha raggiunto la soglia prefissata di 300 individui e che sono quindi stati contrassegnati da quadrati invece che da punti, per essere distinti come potenzialmente inesatti, data la scarsa abbondanza di organismi rinvenuti.

La relazione tra i valori pesati, fra la frazione contenente i foraminiferi e il sedimento sciolto della classe delle sabbie trattenuto in setacciatura, e la frazione fine fangosa, è in grado di mettere in mostra diverse caratteristiche fisiche dei vari ambienti dalla quale provengono i campioni, dando una forte base di partenza per determinare l'energia al fondo, la batimetria, l'ossigenazione e la presenza o assenza di trasporto (Tabella 1).

La frazione bioclastica è rappresentata da una serie di associazioni a foraminiferi, per le quali è stata fatta un'analisi ecologica basata sulle caratteristiche morfologiche e stili di vita (planctonico, bentonico infaunale ed epifaunale) delle specie riconosciute, così da potere interpretare i principali parametri paleoambientali.

	Taxa	N° Campione																Totale
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Bentonicì	<i>Ammonia inflata</i> (Seguenza, 1862) †	0	19	0	0	0	6	0	0	10	34	14	0	3	0	0	9	95
	<i>Amphicoryna scalaris</i> (Batsch, 1791)	0	4	1	0	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	<i>Amphicoryna</i> sp.	4	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	11
	<i>Amphicoryna sublineata</i> (Brady, 1884)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
	<i>Anomalina flintii</i> (Cushman, 1931)	8	0	1	13	2	0	15	0	2	46	0	6	1	2	0	0	96
	<i>Biasterigerina planorbis</i> (d'Orbigny, 1846)	0	2	0	0	0	10	0	0	5	0	0	0	0	0	3	0	20
	<i>Bolivina antiqua</i> d'Orbigny, 1846 †	0	37	0	0	5	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
	<i>Bolivina arta</i> MacFadyen, 1930	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	74
	<i>Bolivina dilatata</i> Reuss, 1850	0	8	0	0	0	3	2	0	3	0	13	0	51	0	2	0	82
	<i>Bolivina punctata</i> d'Orbigny, 1839	15	5	13	36	8	3	23	0	5	7	0	4	30	8	14	0	171
	<i>Bolivina reticulata</i> Hantken, 1875	8	0	0	9	6	0	5	0	0	7	0	10	0	3	0	4	52
	<i>Bolivina</i> sp.	0	4	0	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	<i>Bulimina aculeata</i> d'Orbigny, 1826	4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	12	0	14	2	1	2	38
	<i>Bulimina</i> sp.	0	0	0	1	4	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	<i>Cassidulina laevigata</i> d'Orbigny, 1826	0	25	0	0	0	0	0	2	1	32	0	0	104	0	0	3	167
	<i>Caucasina lappa</i> (Cushman & Parker, 1937)	0	41	16	0	0	0	0	0	5	16	0	0	28	0	0	0	106
	<i>Cibicidoides robertsonianus</i> (Brady, 1881)	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
	<i>Cibicidoides pseudoungerianus</i> (Cushman, 1922)	24	37	23	23	30	0	30	0	0	10	7	10	0	12	20	1	227
	<i>Coryphostoma</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	1	7
	<i>Elphidium crispum</i> (Linnaeus, 1758)	1	0	0	0	0	3	0	0	9	3	0	0	0	0	0	3	19
	<i>Elphidium</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
	<i>Favulina squamosa</i> (Montagu, 1803)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3
	<i>Fursenkoina complanata</i> (Egger, 1893)	4	15	2	3	2	0	0	0	0	1	39	1	9	1	0	0	77
	<i>Geminiella gibbera</i> (Buchner, 1940)	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
	<i>Globobulimina</i> sp.	0	1	3	7	0	2	0	0	3	0	0	4	0	8	5	0	33
	<i>Hansenisca soldanii</i> (d'Orbigny, 1826)	5	0	7	2	4	0	7	1	0	1	0	0	0	3	9	0	39
	<i>Hanzawaia boueana</i> (d'Orbigny, 1846)	0	5	7	6	6	24	6	0	9	0	0	0	0	0	9	4	76
	<i>Hoeglundina elegans</i> (d'Orbigny, 1826)	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	<i>Karrerella</i> sp.	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0	3	4	0	16
	<i>Laevidentalina</i> sp.	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Laevidentalina leguminiformis</i> (Batsch, 1791)	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8
	<i>Lagena striata</i> (d'Orbigny, 1839)	1	1	4	0	0	0	4	0	0	4	0	0	1	0	0	0	15
	<i>Lenticulina curvisepta</i> (Seguenza, 1880)	10	4	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	50
	<i>Lenticulina rotulata</i> (Lamarck, 1804)	0	0	5	0	12	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	26
	<i>Lenticulina</i> sp.	0	0	1	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	9
	<i>Lenticulina vortex</i> (Fichtel & Moll, 1798)	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
	<i>Lobatula lobatula</i> (Walker & Jacob, 1798)	21	0	0	0	0	32	4	0	0	5	0	10	0	2	0	2	76
	<i>Marginulinopsis costata</i> (Batsch, 1791)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Martinottiella communis</i> (d'Orbigny, 1846)	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
	<i>Melonis padanus</i> (Perconig, 1954)	19	0	3	6	10	4	9	0	5	9	0	6	0	4	5	2	82
	<i>Melonis pompilioides</i> (Fichtel & Moll, 1798)	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	7
	<i>Nodosaria</i> sp.	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	4	1	9
	<i>Nonion boueanum</i> (d'Orbigny, 1846)	5	0	0	0	0	5	0	4	6	66	8	0	67	0	0	15	176
	<i>Nonion commune</i> (d'Orbigny, 1846)	0	46	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54
	<i>Oridorsalis stellatus</i> (Silvestri, 1898) †	7	0	0	5	6	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	24
	<i>Oolina</i> sp.	0	10	4	9	0	0	0	0	3	0	0	4	0	1	2	0	33
	<i>Pullenia bulloides</i> (d'Orbigny, 1846)	15	7	1	7	9	0	9	0	2	0	3	3	0	2	5	0	63
	<i>Pyrgo depressa</i> (d'Orbigny, 1826)	3	0	0	0	0	2	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	8
	<i>Quinqueloculina seminulum</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	1	0	0	0	6
	<i>Rectuvigerina</i> sp.	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	<i>Rotalinoides gaimardi</i> (d'Orbigny in Fomasini, 1906)	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	7	9
	<i>Siphonina reticulata</i> (Czjžek, 1848)	11	0	25	12	6	0	23	0	0	0	0	9	0	5	8	0	99
	<i>Sphaeroidina bulloides</i> d'Orbigny in Deshayes, 1832	4	0	0	0	2	0	6	0	1	0	0	2	0	0	0	0	15
	<i>Spirosigmollina tenuis</i> (Czjžek, 1848)	3	0	2	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10
	<i>Stilostomella</i> sp.	0	0	0	2	7	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	12
	<i>Uvigerina longistriata</i> Perconig, 1955 †	9	0	2	10	5	0	18	0	0	0	0	10	0	6	7	0	67
	<i>Uvigerina peregrina</i> Cushman, 1923	4	0	19	10	5	0	12	0	0	2	0	0	0	0	0	0	52
	<i>Uvigerina pygmaea</i> d'Orbigny, 1826	0	0	4	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0	8
	<i>Uvigerina</i> sp.	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
	<i>Valvulinera bradyana</i> (Fomasini, 1900)	0	0	0	0	0	4	0	0	0	8	0	4	0	0	0	0	16
Planctonicì	<i>Fohsella linguaensis</i> (Bolli, 1957) †	0	0	8	4	0	0	2	0	0	0	0	7	0	0	0	0	21
	<i>Globigerina bulloides</i> d'Orbigny, 1826	42	5	19	28	26	0	40	1	5	9	1	57	1	112	44	1	391
	<i>Globigerina falconensis</i> Blow, 1959	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	16	0	0	20
	<i>Globigerinella obesa</i> (Bolli, 1957) †	10	0	0	0	43	0	15	0	0	0	0	7	0	0	0	0	75
	<i>Globigerinella siphonifera</i> (d'Orbigny, 1839)	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	44
	<i>Globigerinita uvula</i> (Ehrenberg, 1861)	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	<i>Globigerinoides obliquus</i> Bolli, 1957 †	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	47	0	63
	<i>Globoturborotalita apertura</i> (Cushman, 1918) †	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	12
	<i>Neoglobobuadrina acostaensis</i> (Blow, 1959) †	13	2	0	0	9	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	51
	<i>Neoglobobuadrina incompta</i> (Cifelli, 1961)	0	0	22	0	31	2	7	0	0	0	0	0	0	28	38	0	128
	<i>Orbulina suturalis</i> Brönnimann, 1951 †	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
	<i>Orbulina universa</i> d'Orbigny, 1839	8	4	12	2	10	0	14	0	0	0	4	3	0	10	0	0	67
	<i>Paragloborotalita continuosa</i> (Blow, 1959) †	12	0	20	26	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	93
	<i>Trilobatus trilobus</i> (Reuss, 1850)	16	1	15	13	9	0	4	0	0	0	0	30	0	40	37	0	165
	<i>Trilobatus</i> sp.	0	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
	<i>Turborotalita quinqueloba</i> (Natland, 1938)	0	0	0	16	19	2	14	0	0	4	0	0	0	21	0	0	76
	Indeterminato	4	4	7	2	4	4	2		3	8	6	4		9	6	3	66
	Totale	305	296	296	299	303	120	324	18	98	290	191	293	331	330	315	83	3892

Tabella 2: Specie bentoniche e planctoniche e loro presenza e quantità nei vari campioni.

5.3 Composizione dei gusci

La composizione dei gusci dei taxa trovati è risultata essere quasi interamente ialina, con i foraminiferi di questa tipologia che risultano dominare le associazioni, rappresentandone in media il 98.87%, a completare si ha 0.72% di forme a guscio porcellanaceo e 0.41% a guscio agglutinato. La percentuale delle ultime due tipologie è talmente ridotta che è stato ritenuto ridondante creare un diagramma ternario per mostrare le loro relazioni numeriche, in quanto, anche accorpate, nel campione con più alta percentuale di forme non ialine, il campione C1, esse non superano il 3.33% degli individui presenti.

5.4 Rapporto Plankton/Benthos e Infaunali/Epifaunali

Il grafico di tipo stacked chart mostra la variazione percentuale nel rapporto tra foraminiferi bentonici (in blu) e planctonici (in verde) nei 16 campioni analizzati (Fig. 4-A).

L'analisi evidenzia una marcata eterogeneità quantitativa tra i campioni, permettendo di distinguere diversi pattern di dominanza faunistica associabili alle differenti condizioni paleobatimetriche e paleoambientali. Si osserva una netta prevalenza della frazione bentonica nella maggior parte dei campioni, con valori particolarmente elevati nei campioni pliocenici C2, C6, C8, C9, C10, C11, C13 e C16, che presentano in media il ~95%, raggiungendo poco meno del 100% nel campione C13. Al contrario, nei campioni miocenici C5, C12, C15 e, in modo estremo, C14, si rileva una netta prevalenza della frazione planctonica che prende il sopravvento diventando la forma dominante, rappresentando in media il ~64% dell'associazione, raggiungendo il ~78% nel campione C14. I restanti campioni tortoniani, C1, C3, C4 e C7, mostrano invece situazioni intermedie, con percentuali di foraminiferi bentonici che presentano in media il ~64%.

Il secondo grafico di tipo stacked chart illustra la distribuzione percentuale dei foraminiferi bentonici nei vari campioni, distinguendo i taxa infaunali, che vivono infossati nel sedimento (in blu), da quelli epifaunali, che vivono all'interfaccia acqua-sedimento (in verde) (Fig 4-B). La proporzione tra queste forme è strettamente legata ai fattori ecologici al fondo, come la disponibilità di materia organica e il tasso di ossigenazione delle acque interstiziali. Nei campioni tortoniani C1, C3, C4, C5, C7, C12 e in quelli burdigaliani-langhiani C14, C15, insieme ai campioni pliocenici C8, C9 e C10, vi è una coesistenza relativamente bilanciata tra le due componenti, con i foraminiferi infaunali che oscillano in media intorno al ~47%. Nei campioni C2, C11 e C13, provenienti dalle successioni dello Zancleano si può notare un netto incremento della frazione infaunale, con il campione C11 che ne esprime il picco massimo mostrando un valore pari a ~86%, mentre i campioni C2 e C13, seppure avendo una

abbondanza di forme infaunali minore, ne contengono comunque una percentuale più alta del resto, pari in media al ~66%.

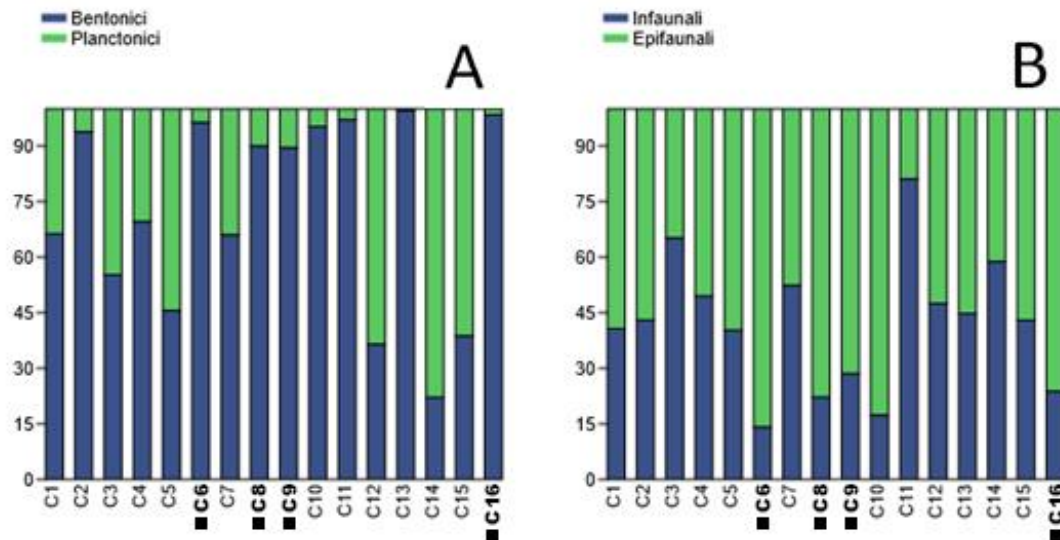


Figura 4: A) percentuale tra foraminiferi bentonici e planctonici. B) percentuale tra forme infaunali ed epifaunali. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati e dall'etichetta in grassetto.

All'estremo opposto, alcuni campioni che provengono dalla formazione delle Sabbie di Asti mostrano una netta prevalenza della componente epifaunale. Il campione C6 registra il valore minimo di infaunali, il ~21%, con invece una netta dominanza degli epifaunali che raggiunge ~79%, mentre il campione C16 mostra una minore ma comunque chiara prevalenza epifaunale, pari al ~63%.

5.5 Curve di rarefazione

Le curve di rarefazione mostrano, nella maggior parte dei casi, una fase iniziale di crescita rapida seguita da un progressivo asintoto orizzontale, indicativo di un campionamento esaustivo. A ciò fanno eccezione i due campioni piacentini (C8 e C16), la cui scarsità numerica di individui rinvenuti preclude una rappresentazione statisticamente robusta delle loro paleocomunità (Fig. 5).

L'andamento delle curve evidenzia inoltre una marcata zonazione stratigrafica, in quanto i tassi di incremento e i valori massimi di ricchezza in taxa risultano superiori nei campioni di età tortoniana (C1, C3, C4, C5, C7 e C12), seguiti in ordine decrescente dai campioni burdigaliani-langhiani (C14 e C15) e successivamente da quelli zancleani (C2, C6, C9, C10, C11 e C13), con i campioni

piacenziani (C8 e C16) non direttamente confrontabili con gli altri a causa del ridotto numero di individui raccolti.

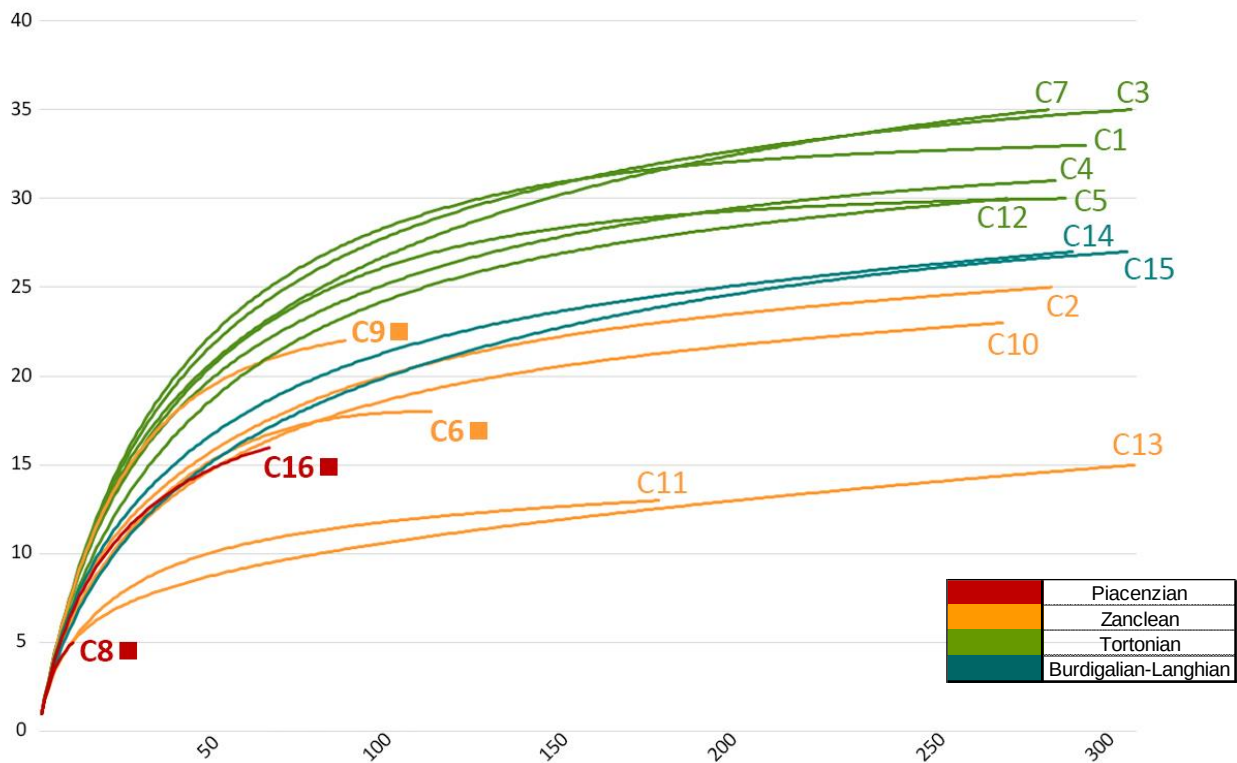


Figura 5: Curve di rarefazione dei vari campioni con indice richness (S). I colori sono associati all'età. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati e dall'etichetta in grassetto.

5.6 Indici di diversità:

Al fine di facilitare il confronto tra i diversi campioni e di evidenziarne le eventuali differenze, sono stati calcolati e rappresentati graficamente diversi indici di diversità (Fig. 6). Dall'analisi dei risultati emerge come, indipendentemente dall'indice considerato, sia presente una netta separazione tra i campioni provenienti dai sedimenti datati al Pliocene e quelli datati al Miocene.

In particolare, i campioni attribuiti al Miocene mostrano valori maggiormente omogenei tra loro, mentre quelli pliocenici evidenziano una variabilità più elevata.

Gli otto campioni attribuiti al Miocene provengono da soli tre siti, con la componente tortoniana, rappresentata dai campioni C1, C3, C4, C5, C7 e C12, proveniente da un unico sito. Al contrario, gli

otto campioni pliocenici sono distribuiti complessivamente su sette differenti siti di campionamento, con i soli campioni C8 e C10 provenienti dalla medesima località.

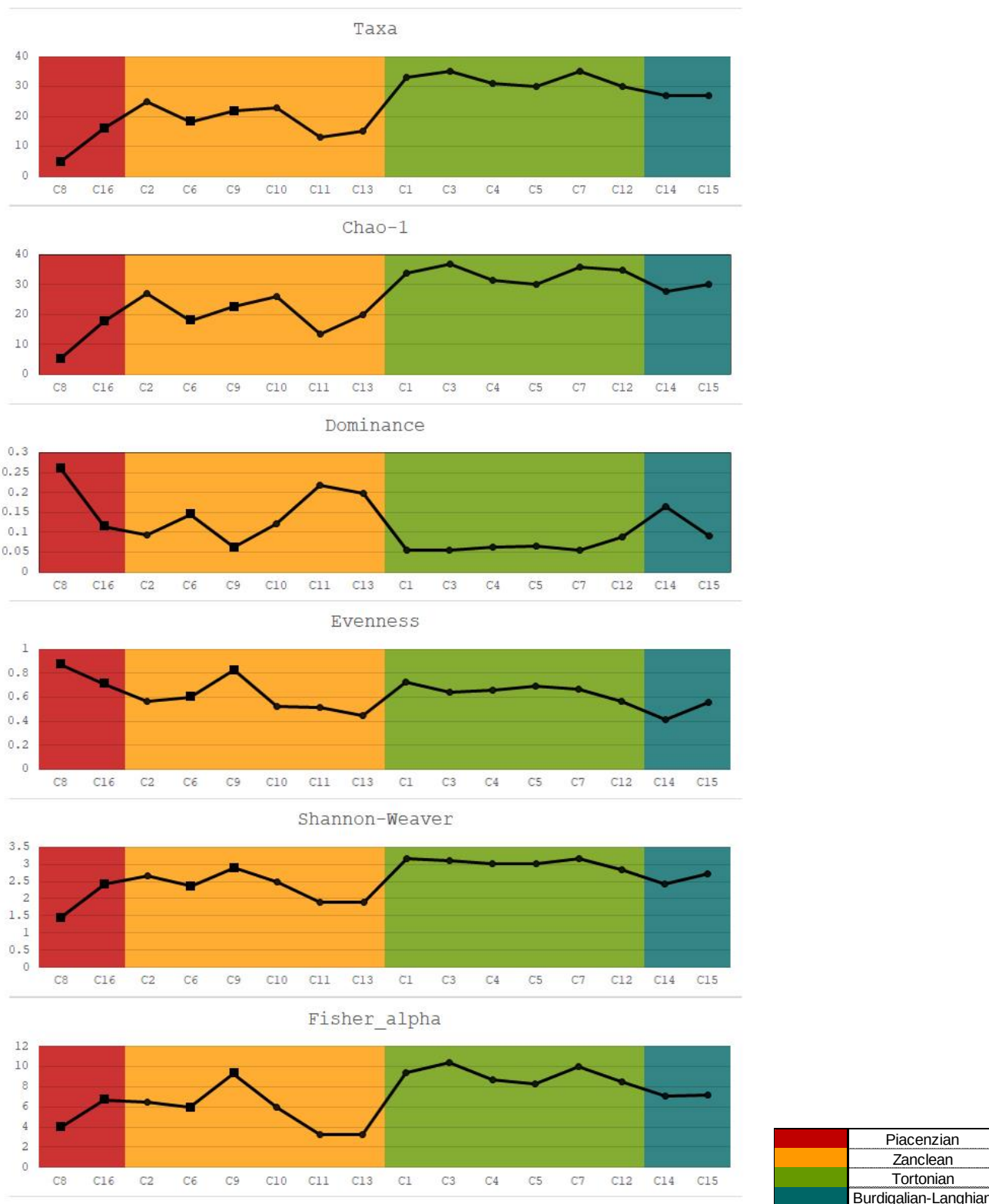


Figura 6: Indici di diversità dei campioni ordinati per età. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

5.6.1 Chao-1 e Taxa:

Tra gli indici analizzati, l'indice di Chao-1, utilizzato per stimare la ricchezza tassonomica attesa in funzione dell'abbondanza degli individui campionati, mostra generalmente una buona concordanza con il numero di taxa effettivamente identificati. Le discrepanze più marcate si osservano nei campioni C12 e C13, nei quali la differenza tra la ricchezza stimata e quella osservata raggiunge valori prossimi a 5 unità tassonomiche, con rispettivamente 15 e 30 taxa effettivamente trovati nei due campioni. La differenza esistente tra i valori assunti dall'indice di Chao-1 rispetto a quelli ritrovati in Taxa non ha mostrato ingenti variazioni tra i campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300, e quelli campionati raggiungendo il numero di individui prestabilito.

5.6.2 Dominanza ed Equitabilità:

I campioni miocenici mostrano una minore dominanza e una maggiore equitabilità rispetto agli altri intervalli cronologici, evidenziando al contempo una maggiore omogeneità tra i valori. Fa eccezione il campione C14, che presenta un netto incremento della dominanza e risulta il più fortemente caratterizzato dalla presenza di organismi planctonici. Nel complesso, i valori di dominanza risultano bassi o trascurabili, indicando che, anche nei campioni maggiormente dominati, solo poche specie mostrano abbondanze relativamente elevate senza tuttavia determinare una significativa riduzione della rappresentatività delle altre componenti della comunità. Analogamente, i valori di equitabilità si mantengono generalmente da moderati ad elevati, scendendo raramente al di sotto di 0.5; tale condizione si verifica principalmente nei campioni C13 e C14, che rappresentano rispettivamente il campione con la maggiore incidenza di taxa bentonici e quello con la maggiore incidenza di taxa planctonici.

5.6.3 Shannon-Weaver e Fisher's alpha

Entrambi gli indici restituiscono valori riconducibili a livelli medio-alti di biodiversità comunemente osservati negli ecosistemi naturali (De Rijk et al., 2000; Minhat et al., 2021), dove l'indice di Shannon-Weaver varia approssimativamente tra 1.5 e 3.5, mentre il Fisher's alpha assume valori compresi tra circa 5.5 e 10.

5.7 Analisi delle Componenti Principali (PCA)

L'analisi delle componenti principali (PCA) applicata alle associazioni faunistiche ha evidenziato che gli autovalori (eigenvalue) relativi alle prime due componenti principali (PC1 e PC2) superano la soglia critica del modello broken-stick, confermando l'idoneità del loro utilizzo per le successive interpretazioni ecologiche e biostratigrafiche (Fig. 7). La prima e la seconda componente principale spiegano, rispettivamente, $\sim 36\%$ e $\sim 17\%$ della varianza totale del dataset, esprimendo cumulativamente il 53.442% della variabilità complessiva. Utilizzando la matrice "variance-covariance", i campioni si frazionano perfettamente da un lato e dall'altro dell'asse della componente 2, venendo suddivisi lungo l'asse della componente 1, con i campioni pliocenici caratterizzati da valori negativi mentre quelli datati al Miocene da valori positivi. Osservando la densità dei punti rappresentativi dei campioni, sempre utilizzando la matrice "variance-covariance", si nota che i campioni del Miocene risultano più ravvicinati (e quindi più simili) tra di loro, specialmente per quanto riguarda l'asse della componente 2.

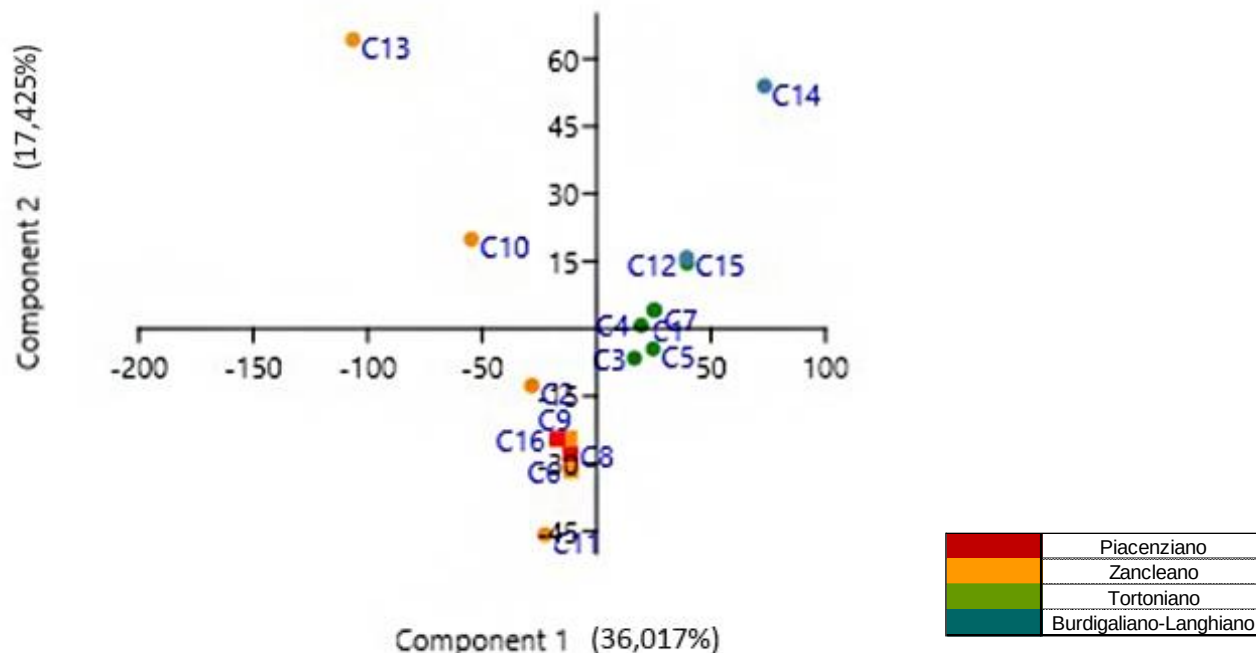


Figura 7: Analisi delle componenti principali (PCA) usando i componenti principali più significativi secondo una matrice di varianza-covarianza. I colori sono una rappresentazione dell'età e seguono quelli usati per gli indici di diversità. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

5.8 Analisi di Cluster

L'analisi di cluster gerarchica effettuata sul dataset a foraminiferi ha evidenziato una netta strutturazione dei 16 campioni analizzati, distribuiti in raggruppamenti ben definiti all'interno del dendrogramma (Fig. 8).

La separazione principale (macro-cluster) riflette una chiara distinzione cronologica, discriminando i campioni attribuiti al Miocene da quelli di età pliocenica. Concentrandosi sul macro-cluster sinistro, composto dai campioni del Miocene, si osserva che mostra i massimi livelli di similarità tra i campioni tortoniani provenienti dalle Marne di S. Agata Fossili, ai quali anche il campione C15 (proveniente dalla Pietra da Cantoni) sembra essere affine, mentre il campione C14, anch'esso presumibilmente prelevato nella Pietra da Cantoni, si discosta sia dal gruppo datato al Tortoniano sia dal campione C15. Il macro-cluster destro invece mostra una inaspettata separazione dei campioni C10 e C13 dal resto dei campioni datati allo Zancleano e, a una risoluzione maggiore, si osserva come i cinque campioni C6, C8, C9, C16 e, in misura minore, C11, nella quale durante il campionamento non è stato possibile raggiungere la soglia minima prefissata di individui, convergano nello stesso cluster di ordine inferiore.

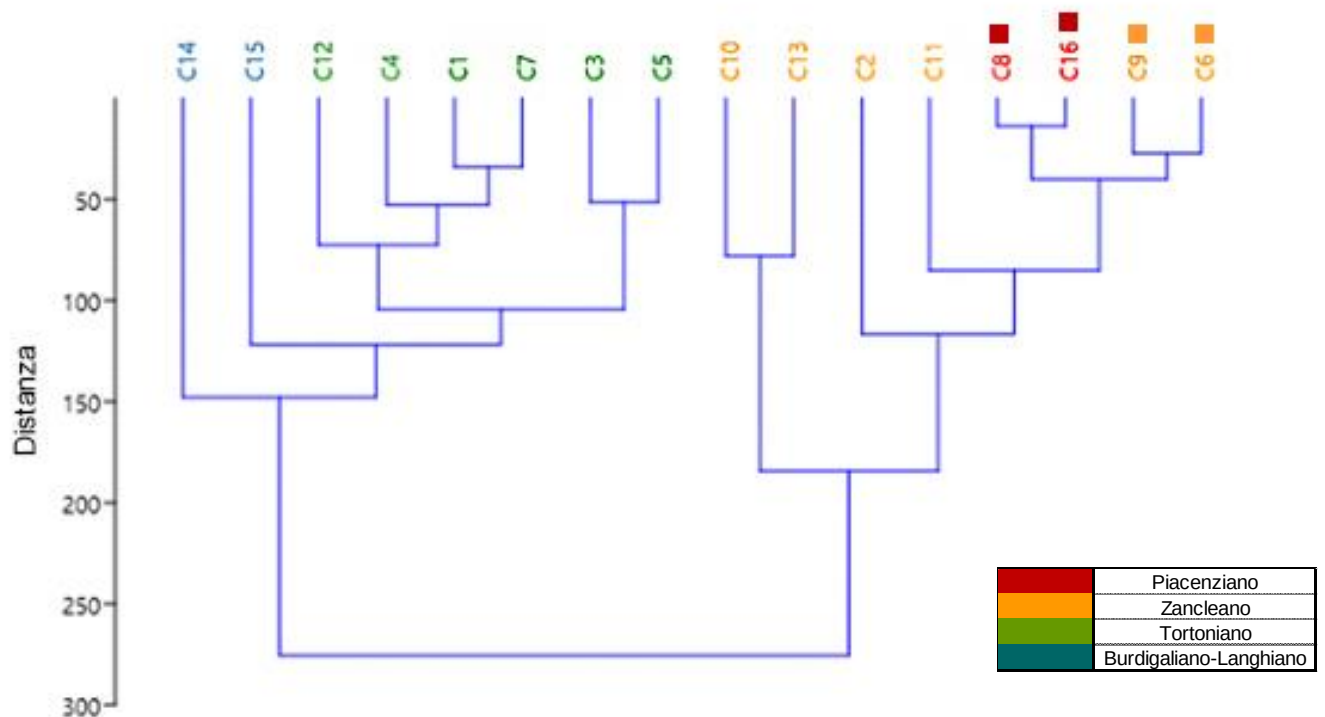


Figura 8: Dendrogramma dei vari campioni associati in cluster secondo l'analisi di clustering gerarchico, plottati usando il metodo di Ward. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

5.9 Paleobatimetria

I campioni si dividono chiaramente in tre gruppi principali, il primo gruppo (composto dai campioni pliocenici, zancleani e piacentini insieme) mostra le profondità minori e meno variabili dell'intero set di dati, costantemente limitate a batimetrie che vanno circa da ~30 a ~50 m, il secondo gruppo (composto dai campioni tortoniani) mostra una maggiore variazione tra le profondità, andando da ~130 a ~480 m, mentre l'ultimo gruppo (composto dai campioni burdigaliani-langhiani) ha il range più profondo tra tutti, compreso tra ~400 e ~900 m (Fig. 9). Alcuni dei valori di profondità estrapolati dai dati sono successivamente stati confutati a causa di interazioni con flussi gravitativi e rimaneggiamenti di faune.

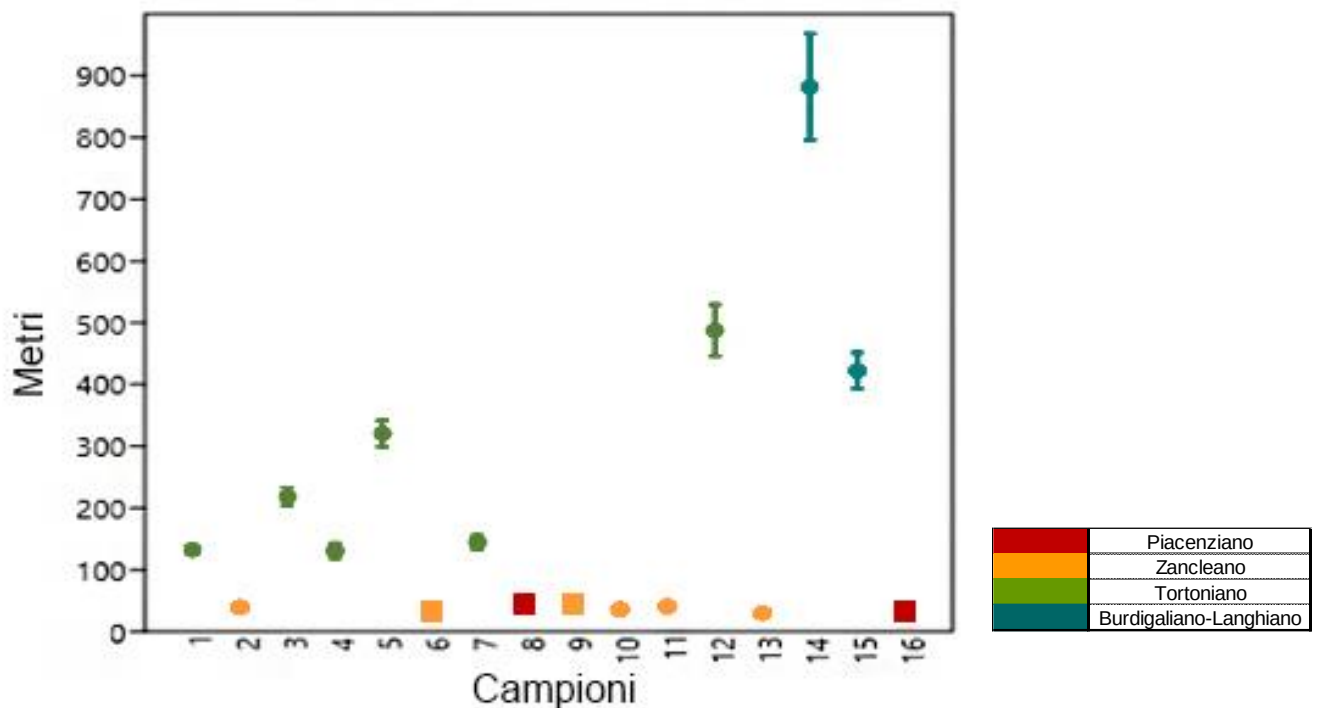


Figura 9: Paleobatimetria dei campioni, calcolata usando il rapporto tra taxa planctonici e bentonici. I colori sono associati alle età. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

5.10 EBFOI e trofismo

I valori dell'indice EBFOI mostrano una marcata eterogeneità tra i 16 campioni analizzati e i valori ricavati per i vari campioni si distribuiscono in tre raggruppamenti principali. La maggior parte dei campioni (C1, C2, C3, C4, C5, C7, C8, C9, C10, C12, C15 e C16) è caratterizzata da valori stabili e prossimi a ~40 mentre il secondo gruppo è definito dalle drastiche fluttuazioni negative del regime

ossico registrate nei campioni C11, C13 e C14, che portano a valori nettamente più bassi di quest'ultimo, in media pari a ~6. Il terzo raggruppamento è rappresentato esclusivamente dal campione C6, il quale si distingue come il campione a maggiore ossigenazione dell'intera successione, con un valore di picco pari a ~75, anche se la sua natura incompleta dal punto di vista del numero di individui recuperati nel picking impone cautela nella valutazione di questi risultati.

5.11 Analisi Scalare non Metrica Multi-Dimensionale (NMDS)

Nell'analisi scalare non metrica multi-dimensionale (NMDS) i campioni più simili tra di loro saranno più densamente raggruppati nel piano bidimensionale, poiché l'indagine evidenzia una chiara separazione e un raggruppamento dei campioni in base alle relazioni con specifici fattori ambientali quali paleobatimetria, Indice di ossigeno dei foraminiferi bentonici potenzializzato (EBFOI), percentuale di materiale trattenuto dopo la setacciatura rispetto al peso secco del campione non setacciato e percentuale di infaunali rispetto al totale degli individui bentonici nel campione (Fig. 10).

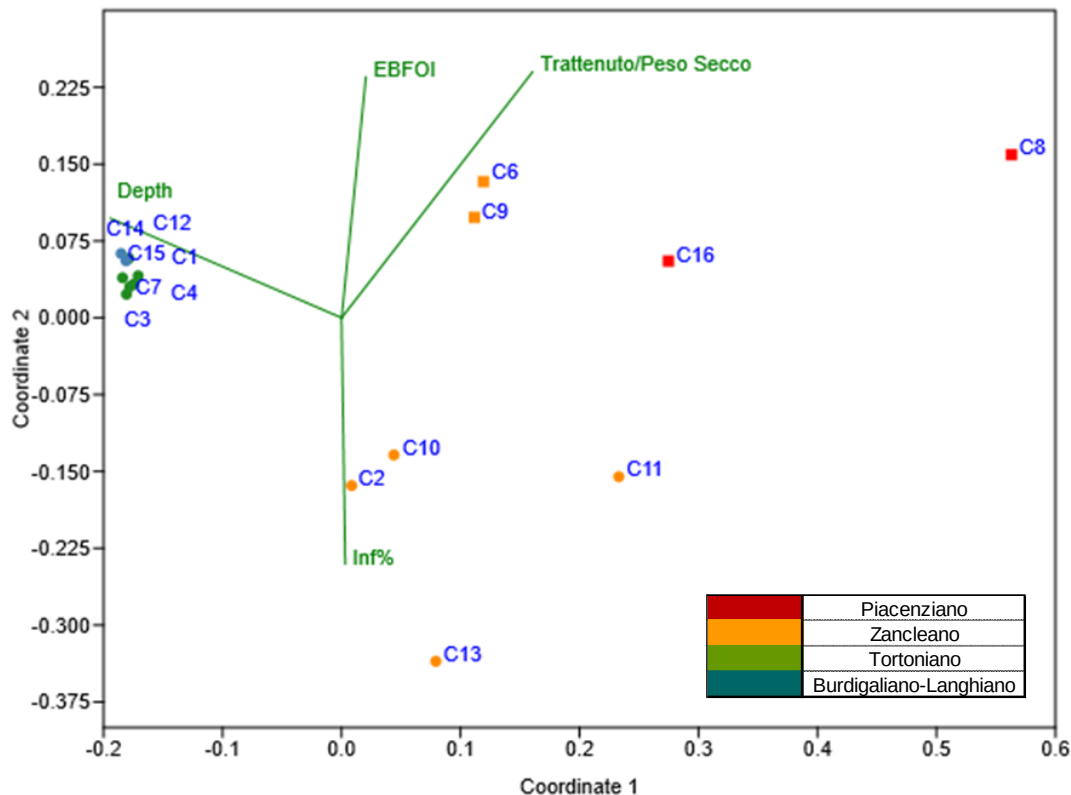


Figura 10: Grafico che mostra analisi non-metriche multidimensionali (NMDS), i rami illustrano l'aumentare di specifiche caratteristiche ambientali, i puntini rappresentano la posizione dei campioni rispetto alle caratteristiche misurate, i campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

Si osserva una netta polarizzazione dei dati lungo l'asse della coordinata 1, da un lato della quale (quello delle coordinate negative) si identifica un gruppo estremamente coeso e denso di punti, che include i campioni datati al Miocene C1, C3, C4, C5, C7, C12, C14 e C15, dove la vicinanza dei dati indica un'elevata somiglianza tra le loro caratteristiche ambientali. I campioni pliocenici appaiono distribuiti in modo più disperso lungo l'asse della coordinata 1, con, in particolare, i campioni piacentini a sforzo di campionamento incompleto C8 e C16, che si collocano nella parte superiore del grafico (dal lato delle coordinate positive), con il campione C8 in particolare che mostra il valore massimo assunto lungo l'asse della coordinata 1 (tra 0.5 e 0.6). I campioni zancleani hanno tutti una posizione relativamente centrale rispetto all'asse della coordinata 1, mentre si distinguono due gruppi distinti considerando anche l'asse della coordinata 2. I gruppi sono formati rispettivamente dai campioni C2, C10, C11 e C13 nella parte inferiore del grafico (quindi caratterizzati da valori negativi della coordinata 2), e dai campioni C6 e C9 nella parte superiore (perciò con valori positivi della coordinata 2).

6. Indagini sulle associazioni dei campioni

6.1 C1: Pontestura

Il campione presenta una delle associazioni più ricche e diversificate tra tutte quelle osservate, con un totale di almeno 32 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza dei taxa *Paragloborotalia continuosa* e *Anomalina flintii*, il campione viene datato al Tortoniano. I dati pervenuti dal campionario sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei e agglutinanti rispetto a quelli con guscio ialino, il rapporto tra bentonici e planctonici dei 304 individui raccolti è quasi perfettamente il 2:1, ~66% per i primi e ~34% per i secondi, con rispettivamente 199 e 101 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 4 indeterminati), di cui 81 infaunali e 118 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è dominata da nessuna specie, ma quella più numerosa è costituita dal taxon planctonico *Globigerina bulloides*, con abbondanze relativamente elevate anche di *Cibicidoides pseudoungerianus* e *Lobatula lobatula*. La frazione litica è presente ma non in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 132 m (± 29 m), un valore EBFOI di 45.21 e un livello di DO, pari a 3.2 mL/L. L'impiego di *Anomalina flintii* per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data la quasi totale assenza di fossili guida diagnostici, in quanto il range di *P. continuosa* si estende per tutto il Miocene e parte del Pliocene, l'analisi ha unicamente confermato che l'analisi biostratigrafica indica un intervallo temporale compatibile con quanto indicato dal campionario

6.2 C2: Chiusano d'Asti

Il campione presenta una associazione mediamente diversificata, con un totale di almeno 24 taxa identificati nel sedimento. Vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. I dati pervenuti dal campionario sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Argille azzurre. Osservando il campione non vi è apparentemente traccia di organismi porcellanacei e agglutinanti e tutti i foraminiferi sembrano appartenere a forme con guscio ialino, le percentuali di bentonici e planctonici nei 294 individui raccolti sono pari al ~94% per i primi e al ~6% per i secondi, con rispettivamente 272 e 18 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 4 indeterminati), di cui 117 infaunali e 155 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da una singola specie, ma piuttosto da un gruppo composto

da *Bolivina antiqua*, *Caucasina lappa*, *Cibicidoides pseudoungerianus* e, soprattutto, *Nonion commune*, che sono presenti in quantità maggiori delle altre specie; il campione è caratterizzato, inoltre, da una marcata povertà di forme planctoniche. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. Dalle indagini effettuate mediante l'utilizzo di apposite equazioni e del rapporto plancton/benthos, sembra essere caratterizzato da una paleobatimetria di circa 39 m (± 8 m), un valore EBFOI di 23.01 e un livello di DO, pari a 2.3 mL/L. Tuttavia, la formazione delle Argille Azzurre è storicamente stata associata a batimetrie molto più profonde ed è quindi fortemente in disaccordo con i dati ricavati dalle osservazioni, estrapolati per la scarsità di forme planctoniche rispetto a quelle bentoniche.

6.3 C3: Pontestura

Il campione presenta una associazione estremamente diversificata tra tutte quelle osservate, con un totale di almeno 34 taxa identificati, il numero più alto di taxa individuati in tutti i campioni, assieme al campione 7. Data la presenza dei taxa *Paragloborotalia continuosa*, *Anomalina flintii* e *Fohsella linguaensis*, il campione viene datato al Tortoniano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici nei 293 individui raccolti sono pari al ~55% per i primi e ~45% per i secondi, con rispettivamente 158 e 128 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 7 indeterminati), di cui 103 infaunali e 55 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da alcuna specie, ma quella più numerosa è costituita dal taxon planctonico *Globigerinella siphonifera*, e secondariamente da quello bentonico *Siphonina reticulata*. La frazione litica è presente ma non in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 218 m (± 50 m), un valore EBFOI di 43.71 e un livello di DO, pari a 3.13 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.4 C4: Pontestura

Il campione presenta una associazione ben diversificata, con un totale di almeno 30 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza dei taxa *Paragloborotalia continuosa*, *Anomalina flintii* e *Fohsella linguaensis*, il campione viene datato al Tortoniano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei e agglutinanti rispetto a quelli con guscio ialino, le percentuali di bentonici e planctonici nei 295 individui raccolti sono pari al ~70% per i primi e ~30% per i secondi, con rispettivamente 204 e 89 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 2 indeterminati), di cui 101 infaunali e 55 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da una singola specie, ma piuttosto da un gruppo composto da *Bolivina punctata*, *Lenticulina curvisepta*, *Globigerina bulloides* e *Paragloborotalia continuosa*, che sono presenti in quantità maggiori delle altre specie. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 131 m (± 42 m), un valore EBFOI di 26.71 e un livello di DO, pari a 2.45 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.5 C5: Pontestura

Il campione presenta una associazione ben diversificata, con un totale di almeno 29 taxa identificati nel sedimento. Vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Anomalina flintii*, che in base all'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale del Tortoniano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili. Osservando il campione non vi è apparentemente traccia di organismi porcellanacei e agglutinanti, e tutti i foraminiferi sembrano appartenere a forme con guscio ialino le percentuali di bentonici e planctonici nei 298 individui raccolti sono pari al ~46% per i primi e ~54% per i secondi, con rispettivamente 134 e 160 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 4 indeterminati), di cui 54 infaunali e 80 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da una singola specie, ma piuttosto da un gruppo composto da *Cibicidoides pseudoungerianus*, *Globigerinella obesa* e *Neogloboquadrina incopta*, che sono

presenti in quantità maggiori delle altre specie. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 321 m (± 75 m), un valore EBFOI di 43.18 e un livello di DO, pari a 3.11 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.6 C6: Capriglio

Il campione presenta una associazione relativamente diversificata, con un totale di almeno 17 taxa identificati nel sedimento. Come in altri campioni, vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. I dati pervenuti dal campionario sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Sabbie di Asti. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici nei 114 individui raccolti sono pari al ~96% per i primi e al ~4% per i secondi, con rispettivamente 106 e 4 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 4 indeterminati), di cui 15 infaunali e 91 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi è dominata da due specie leggermente più numerose delle altre, i taxa bentonici *Lobatula lobatula*, e, in minor quantità *Hanzawaia boueana*, con una spiccata povertà in forme planctoniche. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 34 m (± 8 m), un valore EBFOI di 75.32 e un livello di DO, pari a 4.62 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.7 C7: Pontestura

Il campione presenta una associazione estremamente diversificata tra tutte quelle osservate, con un totale di almeno 34 taxa identificati nel sedimento, il numero più alto individuato in tutti i campioni,

assieme al campione 3. Data la presenza dei taxa *Anomalina flintii*, *Orbulina suturalis* e *Fohsella linguaensis* il campione viene datato al Tortoniano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di gusci agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici nei 317 individui raccolti sono pari al ~66% per i primi e ~34% per i secondi, con rispettivamente 208 e 107 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 2 indeterminati), di cui 109 infaunali e 99 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da alcuna specie, ma quella più numerosa è il taxon planctonico *Globigerina bulloides*, e secondariamente dal bentonico *Cibicidoides pseudoungerianus*. La frazione litica è presente ma non in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 145 m ($\pm$ 41 m), un valore EBFOI di 48.12 (il più alto per il Tortoniano) e un livello di DO, pari a 3.32 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.8 C8: Cortiglione

Il campione presenta una associazione apparentemente poco sviluppata e diversificata, con solamente 5 taxa rinvenuti durante le analisi, che oltre a rappresentare il numero più basso di specie riscontrato tra tutti i campioni, mostra anche una densità estremamente bassa, con una frazione bioclastica molto povera rispetto alla litica, composta principalmente da sabbia fine. Come in altri campioni, vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Rotalinoides gaimardi*, che in base all'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale del Piacenziano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Sabbie di Asti. Osservando il campione non vi è apparentemente traccia di organismi porcellanacei e agglutinanti, ma di soli ialini, e alcune delle poche specie riconosciute sono rappresentate da un singolo individuo, nello specifico nei 10 individui raccolti è stato trovato il 90% di bentonici e il 10% di planctonici, con 9 e 1 foraminiferi appartenenti alle due categorie, di cui 2 infaunali e 7 epifaunali. I planctonici sono rappresentati solamente da un singolo esemplare di *Globigerina bulloides* e la specie dominante, *Nonion boueanum*, rimane

comunque piuttosto rara all'interno del campione. La frazione litica è presente in quantità estremamente superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 44 m (± 8 m), un valore EBFOI di 36.36 e un livello di DO, pari a 2.83 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.9 C9: Borgomanero

Il campione presenta una associazione ben diversificata, con un totale di almeno 21 taxa identificati nel sedimento. Vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'atlante dei foraminiferi padani Agip (1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. Non vi sono informazioni riguardo all'unità formazione di provenienza del campione. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici negli 89 individui raccolti sono pari al ~90% per i primi e ~10% per i secondi, con rispettivamente 77 e 9 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 3 indeterminati), di cui 22 infaunali e 55 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi, non è particolarmente abbondante nel campione, e non sembra essere fortemente dominata da alcuna specie tra quelle presenti. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 46 m (± 10 m), un valore EBFOI di 40 e un livello di DO, pari a 2.98 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.10 C10: Cortiglione

Il campione presenta una associazione relativamente diversificata, con un totale di almeno 22 taxa identificati nel sedimento. Come in campioni precedenti, vista l'assenza di forme planctoniche idonee

per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'atlante dei foraminiferi padani Agip (1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. I dati pervenuti dal campionario sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Sabbie di Asti. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici nei 280 individui raccolti sono pari al ~95% per i primi e ~5% per i secondi, con rispettivamente 259 e 13 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 8 indeterminati), di cui 45 infaunali e 214 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi è dominata da alcune specie più numerose delle altre, con il taxon più numeroso rappresentato da *Nonion boueanum* e, secondariamente, da *Anomalina flintii*, entrambe forme bentoniche, con il campione che mostra una marcata povertà di forme planctoniche. Anche se non abbondanti come le due specie prima citate, *Ammonia inflata* e *Cassidulina laevigata* sono presenti in quantità maggiori della media. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 36 m ($\pm$ 9 m), un valore EBFOI di 46.93 e un livello di DO, pari a 3.27 mL/L. Come esplicito per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.11 C11: Belangero

Il campione presenta una associazione scarsamente diversificata, con un totale di almeno 12 taxa identificati nel sedimento. Come in campioni precedenti, vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'Atlante dei foraminiferi padani (Agip, 1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. I dati pervenuti dal campionario sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Argille azzurre. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, le percentuali di bentonici e planctonici nei 180 individui raccolti sono pari al ~97% per i primi e ~3% per i secondi, con rispettivamente 169 e 5 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 6 indeterminati), di cui 137 infaunali e 32 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi

è fortemente dominata da una specie molto più numerosa delle altre, *Bolivina arta* e, secondariamente, anche se con decisamente minor abbondanza, da *Fursenkoina complanata*, entrambi questi taxa bentonici sono presenti in quantità decisamente maggiori al resto delle specie, con una marcata povertà di forme planctoniche, sia in quantità che diversità. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 41 m (± 16 m), un valore EBFOI di 6.12 e un livello di DO, pari a 1.7 mL/L. Tuttavia, come già visto nel campione C2, la formazione delle Argille Azzurre è storicamente stata associata a batimetrie molto più profonde ed è quindi fortemente in disaccordo con i dati ricavati dalle osservazioni, estrapolati per la scarsità di forme planctoniche rispetto a quelle bentoniche. In aggiunta, come spiegato per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.12 C12: Pontestura

Il campione presenta una associazione ben diversificata, con un totale di almeno 29 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza dei taxa *Anomalina flintii*, *Paragloborotalia continuosa* e *Fohsella linguaensis* il campione viene datato al Tortoniano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Marne di S. Agata Fossili, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi agglutinanti rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa porcellanacei, le percentuali di bentonici e planctonici nei 281 individui raccolti sono pari al ~36% per i primi e ~64% per i secondi, con rispettivamente 101 e 176 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 4 indeterminati), di cui 48 infaunali e 53 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da nessuna specie in particolare, ma quella più numerosa è costituita dal taxon planctonico *Globigerina bulloides* e, secondariamente, da *Paragloborotalia continuosa* e *Trilobatus trilobus*. La frazione litica è presente ma non in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 488 m (± 152 m), un valore EBFOI di 41.6 e un livello di DO, pari a 3.04 mL/L. Come spiegato per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.13 C13: S. Marzanotto

Il campione presenta una associazione scarsamente diversificata, con un totale di almeno 15 taxa identificati nel sedimento. Come in campioni precedenti, vista l'assenza di forme planctoniche idonee per datare correttamente il deposito, l'unico taxon con una valenza stratigrafica (seppure regionale), è *Ammonia inflata*, che in base all'atlante dei foraminiferi padani Agip (1982) e alla letteratura relativa alla formazione di provenienza, è riconducibile all'intervallo temporale dello Zancleano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Sabbie di Asti. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa agglutinanti, il rapporto tra bentonici e planctonici nei 318 individui raccolti è 317 a 1, con, per l'appunto, un singolo organismo planctonico rinvenuto in tutto il campionamento (più 4 indeterminati) e, infine, 142 esemplari infaunali e 175 epifaunali, identificati tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi è fortemente dominata da una specie molto più numerosa delle altre, *Cassidulina laevigata* e, secondariamente, anche se con decisamente minor abbondanza, da *Nonion boueanum* e *Bolivina dilatata*. Questi taxa bentonici sono presenti in quantità decisamente maggiori al resto delle specie, con una marcata povertà di forme planctoniche, sia in quantità che diversità. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 30 m (± 8 m), un valore EBFOI di 1.04 e un livello di DO, pari a 1.53 mL/L. Come esplicitato per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

6.14 C14: Moletto

Il campione presenta una associazione relativamente diversificata, con un totale di almeno 26 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza dei taxa *Globigerinoides obliquus*, e utilizzando la letteratura, il campione viene datato al Burdigaliano-Langhiano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella della Pietra da Cantoni, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi porcellanacei e agglutinanti rispetto a quelli con guscio ialino, le percentuali di bentonici e planctonici nei 316 individui raccolti sono pari al ~22% per i primi e al ~78% per i secondi, con rispettivamente 68 e 239 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 9 indeterminati), di cui 40 infaunali e 28 epifaunali,

tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi è dominata da una specie molto più numerosa delle altre, *Globigerina bulloides* e, secondariamente, anche se con decisamente minor abbondanza, da *Trilobatus trilobus*. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 882 m (± 339 m), un valore EBFOI di 10.63 e un livello di DO, pari a 1.86 mL/L.

6.15 C15: Rosignano

Il campione presenta una associazione ben diversificata, con un totale di almeno 26 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza del taxon *Globigerinoides obliquus*, e utilizzando la letteratura il campione viene datato al Burdigaliano-Langhiano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia la Pietra da Cantoni, che è quindi in accordo con la datazione qui indicata. Vi è un numero nettamente inferiore di organismi agglutinanti rispetto a quelli con guscio ialino, oltre che a una totale apparente assenza di taxa porcellanacei, le percentuali di bentonici e planctonici nei 300 individui raccolti sono pari al ~39% per i primi e ~61% per i secondi, con rispettivamente 114 e 180 foraminiferi appartenenti alle due categorie (più 6 indeterminati), di cui 49 infaunali e 65 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi non è fortemente dominata da nessuna specie in particolare, con la componente più numerosa costituita dal taxon planctonico *Globigerinoides obliquus*, e secondariamente da *Globigerina bulloides*, mostrando una generale minoranza di individui bentonici. La frazione litica è presente ma non in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 422 m (± 107 m), un valore EBFOI di 38.67 e un livello di DO, pari a 2.92 mL/L.

6.16 C16: Valle Botto

Il campione presenta una associazione relativamente diversificata, con un totale di almeno 17 taxa identificati nel sedimento. Data la presenza del taxon *Rotalinoides gaimardi*, il campione viene datato al Piacenziano. I dati pervenuti dal campionatore sul terreno indicano che la formazione geologica sia quella delle Sabbie di Asti. Osservando il campione non vi è apparentemente traccia di organismi porcellanacei e agglutinanti, e tutti i foraminiferi sembrano appartenere a forme con guscio ialino, il rapporto tra bentonici e planctonici nei 64 individui raccolti è 63 a 1, con, per l'appunto, un singolo organismo planctonico rinvenuto in tutto il campionamento (più 3 indeterminati), di cui 15 infaunali e 48 epifaunali, tra gli organismi che vivono a contatto con il fondale. La fauna a foraminiferi, non è particolarmente abbondante nel campione, e non sembra essere pesantemente dominata da nessuna

specie in particolare tra quelle presenti, con *Nonion boueanum* che rappresenta il taxon più numeroso tra quelli rinvenuti. La frazione litica è presente in quantità superiore a quella dei bioclasti. È caratterizzato da una paleobatimetria di circa 31 m ($\pm$ 8 m), un valore EBFOI di 45.16 e un livello di DO, pari a 3.19 mL/L. Come esplicitato per i campioni precedenti, l'impiego di un taxon bentonico per l'interpretazione biostratigrafica è stato limitato alla verifica di plausibilità cronologica. Data l'assenza di fossili guida diagnostici, l'analisi ha unicamente confermato che l'età dell'unità formazionale desunta dalla letteratura scientifica fosse coerente con l'intervallo di distribuzione della specie identificata.

7. Discussione

7.1 Biostratigrafia

Talvolta, taxa bentonici come *Ammonia inflata*, *Anomalina flintii* e *Rotalinoides gaimardi* sono indicati come i foraminiferi utilizzati per stabilire l'età del campione. Questa scelta è stata presa a causa della mancanza o scarsità (in molti campioni) di organismi planctonici, generalmente più utili per svolgere indagini biostratigrafiche e fungere da fossili guida. Per assicurarsi che i campioni analizzati ricevessero una datazione il più corretta possibile è stato fatto affidamento soprattutto sulla bibliografia disponibile, consultando articoli relativi alle unità litostratigrafiche dalle quali i campioni interessati provengono, utilizzando i citati taxa bentonici come conferma. Malgrado le specie in questione non siano generalmente adatte a stimare le età al rango di piano, risultano comunque essere particolarmente abbondanti in determinati e relativamente ristretti intervalli di tempo, potendo così dare la conferma delle datazioni desunte dalla letteratura.

7.2 Parametri ambientali:

Le analisi paleobatimetriche e quelle improntate sullo stimare l'ossigeno disciolto in acqua e il trofismo, hanno consentito di calcolare alcuni dei parametri paleoambientali presenti nei tratti di fondale indagati del segmento più occidentale del Bacino Padano durante il Pliocene e di due intervalli temporali separati (uno Burdigaliano-Langhiano e l'altro Tortonian) del Bacino del Monferrato, considerato una parte del Bacino Terziario Piemontese (Tabella 3).

Campione	Età	Paleobatimetria (m)	EBFOI	DO (ml/l)	Stato del Campionamento	Livello di Trofismo
C1	Tortoniano	132.42	45.21	3.2	Completo	Mesotrofico (Condizioni di transizione verso l'oligotrofia)
C2	Zancleano	39.02	23.01	2.3	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C3	Tortoniano	218.43	43.71	3.13	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C4	Tortoniano	130.61	26.71	2.45	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C5	Tortoniano	320.64	43.18	3.11	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C6	Zancleano	34.19	75.32	4.62	Incompleto	Oligotrofico (Picco massimo)
C7	Tortoniano	144.52	48.12	3.32	Completo	Mesotrofico-Oligotrofico (Valore prossimo alla soglia oligotrofica)
C8	Piacenziano	43.66	36.36	2.83	Incompleto	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C9	Zancleano	45.93	40	2.98	Incompleto	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C10	Zancleano	35.74	46.93	3.27	Completo	Mesotrofico (Condizioni di transizione verso l'oligotrofia)
C11	Zancleano	40.52	6.12	1.7	parzialmente Incompleto	Eutrofico (Marcata riduzione di ossigeno)
C12	Tortoniano	487.79	41.6	3.04	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C13	Zancleano	29.58	1.04	1.53	Completo	Eutrofico (Dato robusto. Crisi anossica/disossica di fondo)
C14	Burdigaliano-Langhiano	881.85	10.63	1.86	Completo	Eutrofico (Dato robusto. Evento locale di forte input organico)
C15	Burdigaliano-Langhiano	422.20	38.67	2.92	Completo	Mesotrofico (Flusso organico moderato)
C16	Piacenziano	31.11	45.16	3.19	Incompleto	Mesotrofico (Condizioni di transizione verso l'oligotrofia)

Tabella 3: Età, Sabbia%, paleobatimetria, EBFOI, DO, stato del campionamento e livello trofico dei campioni.

La natura della distribuzione dei foraminiferi bentonici e la loro utilità come indicatori paleobatimetrici e marker zonali per specifiche condizioni è stata sfruttata per ricavare i vari parametri (Schönfeld et al., 2023; Schmiedl et al. 2000). È tuttavia importante considerare, che le paleobatimetrie ottenute utilizzando come base le equazioni di van Hinsbergen et al., (2005) e De Rijk et al., (2000) hanno mostrato una tendenza a sovrastimare le profondità elevate e sottostimare quelle più basse, rispetto a metodi tradizionali di confronto tra rapporto P/B. Il confronto tra i dati quantitativi di paleoprofondità evidenzia un trend di abbassamento della paleobatimetria. Tale dinamica non è riconducibile ad un singolo ciclo trasgressivo o regressivo poiché i bacini nei quali sono stati depositati i sedimenti dai quali provengono i campioni hanno una storia stratigrafica nettamente distinta. Tuttavia, una ricostruzione paleoambientale basata unicamente sui dati ricavati dai campioni è possibile se i bacini sono considerati singolarmente e distinti tra di loro, con il Bacino Padano occidentale pliocenico, il Bacino Terziario Piemontese nel Tortoniano e lo stesso bacino ma nel Burdigaliano-Langhiano (Fig. 11).

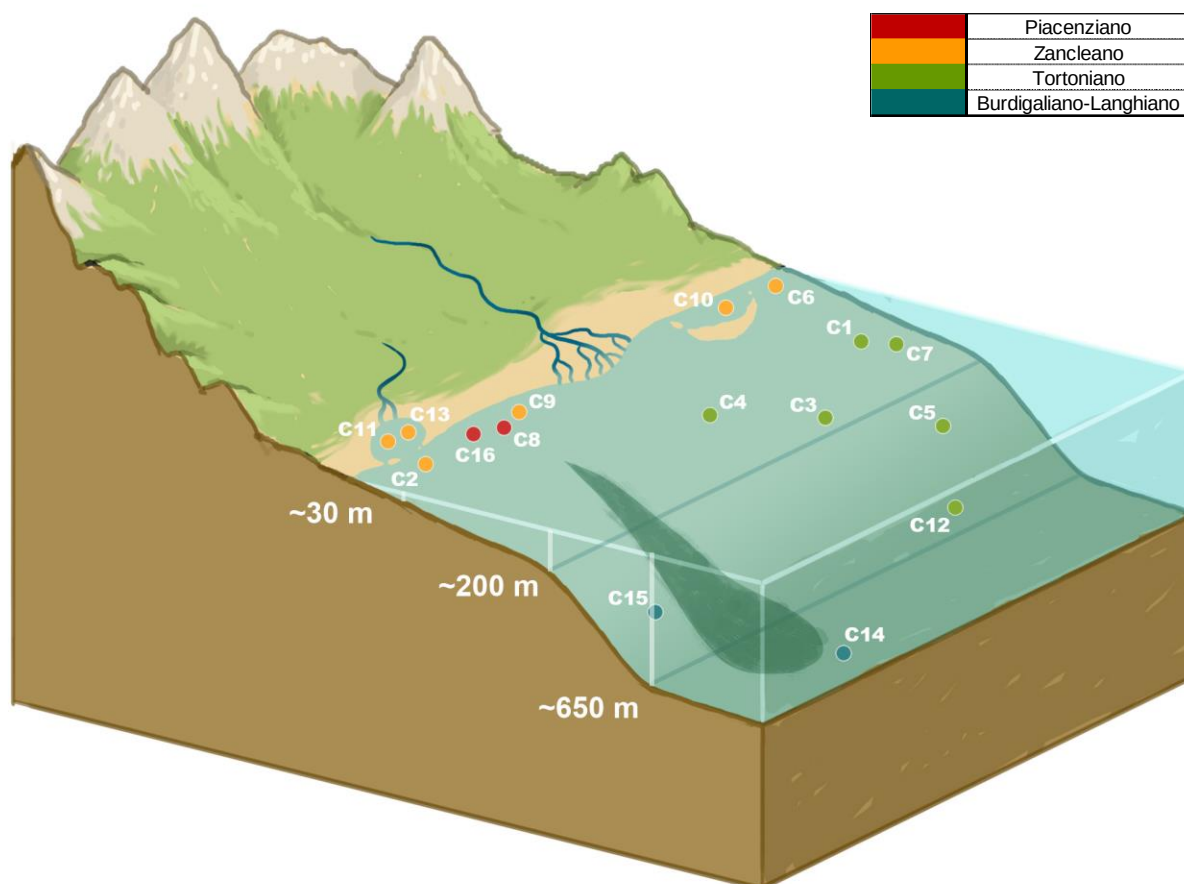


Figura 11: Schema 3D della disposizione dei potenziali ambienti marini riconducibili ai vari campioni mediante le analisi svolte. Lo schema non è in scala.

Allo stesso modo i risultati ottenuti tramite l'applicazione dell'Indice di ossigeno dei foraminiferi bentonici potenzializzato (EBFOI) indicano significative variazioni nello stato di ossigenazione del fondale nel corso del Miocene e del Pliocene (Fig. 12).

Durante il Tortoniano, l'EBFOI si mantiene su valori intermedi, delineando un ambiente dal fondale che non registra variazioni drastiche nei valori indagati, relativamente ossigenato e privo di stress anossici primari. Questo scenario muta drasticamente nel corso dello Zancleano, dove si registrano le oscillazioni più marcate dell'intero dataset, con livelli di ossigenazione che variano da condizioni prossime al subossico (C11 e C13) a picchi altamente ossici (C6). L'applicazione del modello TROX (Jorissen et al., 1995) ai valori di ossigeno disciolto (DO) ottenuti dall'EBFOI ha permesso di mappare le variazioni nel livello di trofismo tra i campioni, ricordando che non sono fasi avvenute nello stesso contesto bacinale, ma rappresentano condizioni legate ad età e bacini deposizionali differenti. L'analisi quantitativa mette in luce tre distinte fasi trofiche, caratterizzate da un regime nettamente eutrofico ($DO < 2.0$ mL/L; nei campioni C11, C13 e C14), con un solo campione che presenta condizioni veramente oligotrofiche ($DO > 3.5$ mL/L; nel campione C6) mentre i restanti

mostrano una situazione intermedia mesotrofica ($2.0 < DO < 3.5$ mL/L; nei campioni C1, C2, C3, C4, C5, C8, C9, C10, C12, C15, C16 e in parte C7, che presenta però condizioni prossime all'oligotrofia).

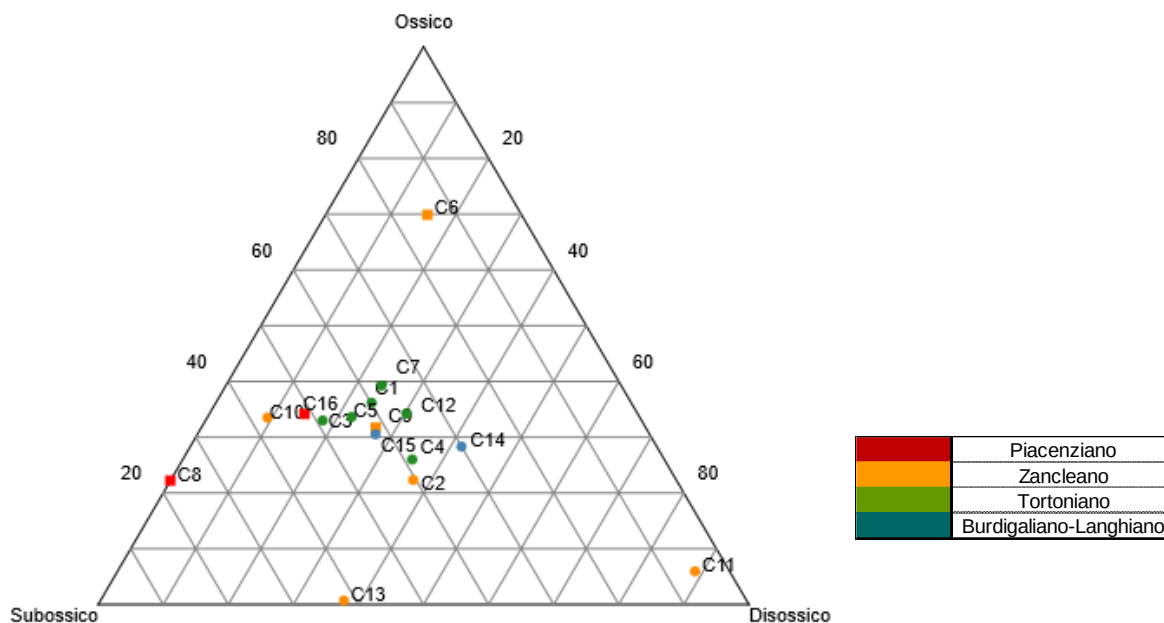


Figura 12: Diagramma ternario basato su dati di abbondanza relativa dei vari tipi di foraminiferi usati come indice per il livello di ossigenazione dell'acqua. I campioni costituiti da un numero di esemplari di molto inferiore a 300 sono contrassegnati da quadrati.

I dati analitici sulla percentuale di sabbia supportano l'ipotesi di dinamiche sedimentarie guidate da eventi gravitativi e processi di selezione idrodinamica, permettendo di formulare alcune ipotesi riguardo alle discrepanze riscontrate tra i dati estrapolati e quelli presenti in letteratura. La possibilità che alcuni dei sedimenti analizzati nei campioni fossero in qualche modo stati rimaneggiati, insieme all'ossigenazione, può anche andare a influenzare il potenziale di fossilizzazione, e dunque spiegare la quasi totale assenza di forme agglutinanti e porcellanacee. I campioni C14 e C15 potrebbero essere stati interessati da processi gravitativi e rimescolamento di materiale grossolano proveniente da ambienti prossimali, data la presenza di forme comunemente ritrovate nella fascia circalitorale e alti tassi di trofismo. Questi eventi di rideposizione sono comuni per ambienti profondi e spesso anossici, e indica la potenziale presenza di una foce o un canyon sottomarino a monte del deposito. Ambienti con bassi livelli di ossigeno disciolto portano alla proliferazione selettiva di specifiche specie

bentoniche ialine e, spesso, in queste stesse condizioni, la disponibilità di particelle sabbiose o i parametri di vita necessari ai foraminiferi agglutinanti vengono a mancare, oltre che alla spiccata vulnerabilità di quest'ultimi alla disgregazione meccanica e alla corrosione chimica, alterando drasticamente l'ecosistema a favore dei soli organismi ialini (Minhat et al., 2021; Murray et al. 2003). Al contrario, eventi di instabilità sedimentaria trasportano frazioni granulometriche maggiori (e i microrganismi in essa contenuti) dalla piattaforma interna fino alla scarpata e al bacino profondo, distruggendo e polverizzando durante il tragitto i gusci porcellanacei (talvolta più fragili) e i gusci agglutinanti (che tendono a disarticolarsi quando il cemento organico o minerale cede sotto stress meccanico), modificandone i rapporti tra organismi con differenti tipi di guscio (Minto'o et al., 2015).

Dal punto di vista metodologico, i dati evidenziano che i segnali di stress ambientale (condizioni subossiche/eutrofiche) nei campioni completi C13 e C14 sono solidi e tracciano reali cambiamenti dei parametri ambientali. Al contrario, i momenti di apparente bassa produttività, rispettivamente attribuiti al campione C6 (fortemente oligotrofico) e il campione C16 (in prossimità della transizione mesotrofico-oligotrofico) coincidono sistematicamente con campionamenti incompleti, suggerendo la presenza di un potenziale errore legato alla scarsità di dati. Per l'interpretazione dei dati è stato fondamentale valutare con cautela l'affidabilità dei campioni C6, C8, C9 e C16 (e in parte C11), che presentano abbondanza ridotta di resti fossili, non consentendo di raccogliere il numero di organismi prefissato ed andando a formare un dataset meno robusto. Di conseguenza, per quanto riguarda la produttività, l'eccezionale picco del campione C6 e l'apparente calo del campione C11 vanno interpretati con estrema cautela, in quanto la scarsa preservazione delle associazioni di foraminiferi bentonici potrebbe mostrare dati non attendibili.

I campioni in generale mostrano tra le varie associazioni di foraminiferi una frazione di forme agglutinanti e porcellanacei estremamente ridotta rispetto a quella ialina.

7.3 Associazioni Mioceniche: Parametri ambientali

I campioni miocenici mostrano, nel complesso, la maggiore influenza della frazione planctonica, indice di contesti deposizionali più profondi e aperti verso il largo.

7.3.1 Burdigaliano-Langhiano (Pietra da Cantoni, C14 e C15)

Questo intervallo è caratterizzato dall'acme di foraminiferi planctonici dell'intero dataset, che raggiunge circa l'80% in C14 e circa il 60% in C15. Tale evidenza suggerisce un ambiente pelagico o

emipelagico distale, tipico di contesti di dominio batiale come scarpata e piano batiale (Van der Zwaan et al., 1999). Una fase di bassa ossigenazione appare nel campione C14, che registra un valore di DO pari a 1.86 mL/L, documentando un picco di eutrofizzazione sul fondale, con un elevato consumo di ossigeno legato all'accumulo di materia organica.

Il ritrovamento di questo severo e robusto minimo di ossigenazione e stagnazione è comunemente ritrovato in acque di transizione profonde, caratterizzate da un'elevata presenza di sedimenti fini, dove la frazione sabbiosa è completamente assente e il deposito sul fondale è costituito esclusivamente da particelle sottili e resti di organismi. In questo tipo di ambiente i limi e le argille sedimentati ostacolano la circolazione dell'ossigeno nel substrato, determinandone l'immediata anossia una volta raggiunta una batimetria superiore a 300 metri di profondità. Al contrario, la presenza di sabbia va potenzialmente ad incrementare la porosità del sedimento, favorendone l'ossigenazione, come si può osservare confrontando i campioni C14 e C15, nella quale il primo, più profondo e fangoso, mostra livelli nettamente inferiori di DO rispetto al secondo, più superficiale e sabbioso. Il livello di eutrofia e la componente sabbiosa misurata (elevata per sedimenti depositati a 422 m e 882 m) potrebbero inoltre essere correlati a periodici eventi di correnti gravitative, in grado di trasportare materia organica proveniente da sedimenti terrigeni o produzione primaria intensa avvenuta presso la zona litorale, talvolta raccogliendo e portando a batimetrie minori microfauna endemica ad ambienti di piattaforma (Bicchi et al., 2006; Minto'o et al., 2015). Nel campione C15 si osserva come il fondale torna rapidamente a un regime mesotrofico a flusso organico moderato, presentando però, malgrado la profondità, più della metà di frazione sabbiosa rispetto a fango, indicando un chiaro input, anche in questo caso potenzialmente proveniente da periodici eventi gravitativi. L'unità di formazione dalla quale provengono i campioni, la Pietra da Cantoni di Rosignano e Moletto, è stata storicamente associata ad ambienti di piattaforma carbonatica o scarpata superiore, che si discostano da quello estrapolato dalle indagini svolte, specialmente per quanto riguarda il campione C14 (Bicchi et al., 1997, 1999, 2006). Malgrado ciò, membri come quello di Colma mostrano associazioni con notevolmente più forme adattate ad ambienti profondi e con un notevole incremento nella componente planctonica dei taxa (Murray, 1991; Bicchi et al., 2006), suggerendo un ambiente da circolatoriale a batiale. La parte sommitale della formazione è caratterizzata dalla presenza di *Orbulina universa*, presente nel campione C14 ma non C15, combinato con il contatto che la formazione talvolta presenta con le Marne di Mincengo (anche se questo contatto non sembra essere presente a Rosignano) o le Marne di S. Agata Fossili, potrebbe indicare contaminazione di materiale originato a profondità maggiori, potenzialmente causandone una errata interpretazione come proveniente ad una batimetria più profonda di quanto lo sia realmente.

7.3.2 Tortoniano (Marne di S. Agata Fossili, C1, C3, C4, C5, C7 e C12):

I campioni mostrano una moderata variabilità ma mantengono un significativo input planctonico (compreso tra il 30% e il 65%, con picchi in C5 e C12). Secondo le equazioni utilizzate queste percentuali denotano batimetrie associate ad ambiente di piattaforma e scarpata, con le analisi di ossigeno disciolto che mostrano la persistenza di una connessione idrodinamica stabile con masse d'acqua aperte e ben ossigenate e lo stabilizzarsi di un regime pelagico o neritico durante i rispettivi intervalli di deposizione (van Hinsbergen et al., 2005), con minori fluttuazioni dei valori di ossigenazione del fondale.

I campioni risalenti a questo piano mostrano una relativa stabilità dei valori di EBFOI, oscillando intorno al valore medio di 41.42, testimoniando come durante il Tortoniano la parte di bacino dalla quale provengono i sedimenti presentasse condizioni di ossigenazione da moderate a buone (ambienti mediamente ossici), senza mostrare severe crisi anossiche. Da quanto interpretato dai dati raccolti il bacino dalla quale provengono i campioni presenta una profondità estremamente variabile per essere parte della stessa formazione, che mostra una variazione della batimetria di circa 350 m dal fondale più profondo a quello meno profondo, ma risulta essere costantemente ben ossigenato, mantenendo un regime mesotrofico e DO sempre sopra i 3.0 mL/L, eccetto per il campione C4 (DO = 2.45 mL/L). Questa apparente alta variabilità tra i dati rilevata per la batimetria, potrebbe essere spiegata tramite il trasporto da parte di correnti gravitative di materiale superficiale verso condizioni di più alta profondità (fenomeno documentato in questa formazione). Il sedimento andrebbe così a creare depositi arricchiti di foraminiferi bentonici e forme adattate alla vita in acque basse, e allo stesso tempo “diluirebbe” gli indici di maggiore profondità come i foraminiferi planctonici, facendo apparire alcuni dei campioni di sedimento analizzati più interessati da questo fenomeno come provenienti da minori profondità. Considerando ciò, nei campioni che presentano segni di risedimentazione si potrebbero associare le batimetrie ritrovate non con le effettive profondità del deposito, ma piuttosto con quelle dalla quale deriva il materiale alloctono (anche se bisogna considerare che il mescolamento dei due tipi di sedimento e gli effetti stessi del trasporto potrebbero comunque non rappresentare perfettamente neppure l'ambiente di origine, ma più un valore intermedio).

I campioni C3, C4 e C12 hanno circa la stessa percentuale di frazione sabbiosa ma sembrano presentare paleobatimetrie e valori di DO piuttosto diversi. I primi due sono entrambi apparentemente riconducibili ad ambienti di piattaforma esterna, mesotrofici e con flusso organico moderato, anche se l'ambiente del campione C3 risulta essere apparentemente più profondo e ricco di ossigeno, potenzialmente distinto dal campione C4 per l'influenza da parte di fenomeni gravitativi, ipotesi supportata dalla apparente minore profondità e maggiore quantità di sabbia presente, la percentuale

più alta di tutti i campioni tortoniani. Il campione C12 ha un valore di DO molto simile a quello di C3, provenendo da condizioni mesotrofiche e relativamente ben ossigenate, ma è invece riconducibile ad una paleobatimetria molto più profonda, attribuibile a un ambiente di scarpata. Probabilmente tutti questi campioni provengono da simili batimetrie e le diverse associazioni sono semplicemente state intaccate in vari modi dal trasporto da parte di correnti gravitative, falsando i dati sia aggiungendo materiale più prossimale sia esportando materiale e trasportandolo a maggiori profondità. I campioni C1 e C7 sono comparabili tra di loro, in quanto entrambi mostrano prettamente lo stesso ambiente di piattaforma esterna, intorno al limite con la scarpata, con un alto valore di DO, trofismo al limite dell'oligotrofico e povero di frazione sabbiosa, dunque caratterizzato principalmente da sedimentazione pelagica, senza grandi input derivati da trasporto (Murray, 1991; Bicchi et al., 2006). Il campione C5 presenta condizioni molto simili, ma con più frazione sabbiosa e livelli di DO lievemente minori, eppure risulta provenire da un fondale originariamente profondo il doppio di quello interpretato per i campioni C1 e C7, potenzialmente avendo subito almeno in parte gli effetti di correnti gravitative o trasporto.

La differenza tra le paleobatimetrie interpretate nello studio è sicuramente in parte dovuta al campionamento di differenti sezioni della formazione, che verticalmente mostra cambiamenti più o meno marcati nelle caratteristiche tessiturali e nelle associazioni a foraminiferi. I vari campioni sono stati raccolti a diversi livelli l'uno dall'altro (talvolta a contatto con la lente conglomeratica a denti di squalo di Pontestura), mostrando quindi l'evoluzione del bacino, modellato tramite i cambiamenti eustatici del livello medio mare, le variazioni dovute al sollevamento tettonico della catena alpina e l'apporto sedimentario dovuto allo stesso fenomeno (Violanti, 2012). Tutto ciò ha certamente agito da innesco per una serie di eventi gravitativi che hanno causato risedimentazione di depositi di acque più basse a batimetrie maggiori.

L'esatta successione dei campioni nella formazione non è conosciuta, in quanto le note fornite dai campionatori indicano solo parzialmente l'ordine con il quale è stata effettuata la raccolta, con i campioni C5, C12 e C1 (legati alla lente conglomeratica a denti di squalo di Pontestura), prelevati in quest'ordine dal basso verso l'alto, mentre il campione C7 (correlato ad un livello a *Mesoplodon*) è stato raccolto più in alto rispetto ai campioni C3 e C4. Data la mancanza di dati sulla successione dei campioni, è impossibile ricostruire eventuali cicli trasgressivi o regressivi che spieghino le forti differenze nella batimetria interpretata, che inoltre rappresenta in parte un artefatto della contaminazione da parte di trasporto di materiale più prossimale a profondità maggiori (Lázár et al., 2026).

7.4 Associazioni Plioceniche: Parametri ambientali

A partire dal Pliocene inferiore si osserva una drastica e omogenea transizione faunistica, contrassegnata dal quasi totale collasso della componente planctonica a favore di quella bentonica.

7.4.1 Zancleano (Sabbie di Asti, Argille azzurre e provenienza sconosciuta C2, C6, C9, C10, C11 e C13)

A seguito del ripristino delle condizioni marine normali successivamente alla crisi di salinità del Messiniano, il Bacino Padano occidentale pliocenico mostra un drastico e repentino calo della batimetria rispetto ai livelli eustatici miocenici, apparentemente diventando molto superficiale e stabilizzandosi al di sopra dei 50 metri nello Zancleano. Indipendentemente dalle formazioni (sia nelle peliti delle Argille Azzurre sia nei corpi grossolani delle Sabbie di Asti), la frazione bentonica domina stabilmente con valori mediamente pari a ~95%. Questo segnale indica una netta contrazione batimetrica con un ambiente neritico di piattaforma interna e comporta un forte controllo da parte di fattori costieri e di fondo.

Questo intervallo è caratterizzato dalle massime fluttuazioni di EBFOI dell'intero set di dati, in quanto vi si può ritrovare sia il valore più alto (mostrato dal campione C6 = 75.32, che rispecchia un ambiente altamente ossico) sia il minimo assoluto (mostrato dal campione C13, con DO = 1.04 mL/L, che rispecchia condizioni ossiche al limite del subossico). Tale instabilità suggerisce una fase di forte dinamismo oceanografico nel Pliocene inferiore, con repentine transizioni tra ottima ossigenazione e stagnazione delle acque di fondo, potenzialmente riconducibili all'apporto di materiale terrigeno dal continente, a causa di eventi gravitativi come correnti di torbida e innalzamento del fondale causato dalla tettonica (Dela Pierre et al., 2003). Poiché C11 è parzialmente incompleto, la sua affidabilità è ridotta; tuttavia, il crollo a valori minimi nei campioni C13 (DO = 1.04 mL/L) e C11 (DO = 6.12 mL/L) avviene nello stesso piano geologico, quindi la convergenza con il dato del campione C13, che è stato campionato fino al raggiungimento dei ~300 individui prefissati da raccogliere, supporta l'ipotesi di un reale evento di deossigenazione sul fondale marino durante il Pliocene inferiore, escludendo che si tratti solo di un errore di campionamento (Gastardello et al., 2024; Violanti, 2011). Tra i campioni pliocenici, un regime di tipo eutrofico è osservabile nel campione completo C13 (DO = 1.53 mL/L) e nel campione incompleto C11 (DO = 1.70 mL/L). Al contrario, l'estremo picco oligotrofico è registrato nel campione C6 (4.58 mL/L) ma questa anomalia, va interpretata con cautela, in quanto rispetto alla maggior parte del resto dei campioni, per il campione C6 non è stata raggiunta la soglia dei ~300 individui prefissati da campionare, perciò i risultati e le interpretazioni

sui suoi dati potrebbero riflettere un artefatto originato da un bias di campionamento piuttosto che una reale crisi di nutrienti nel Pliocene inferiore. I campioni C10, C11 e C13 sono accomunati dalla piccolissima parte di componente sabbiosa che li costituisce, in quanto la apparente bassa profondità accomuna non solo questi tre ma in generale tutti i campioni datati al Pliocene tra quelli studiati, ma gli ultimi due rappresentano un ambiente prossimo al subossico e fortemente eutrofico, mentre il campione C10 sembra avere il trofismo opposto ed è identificabile come appartenente ad un ambiente al limite di transizione con l'oligotrofia. Il campione C10 sembra quindi provenire da un ambiente prossimale nel quale vi è la possibilità di restare ben ossigenato, con allo stesso tempo una forte assenza sia di idrodinamismo sia di fonti di nutrimento. Il campione C10 proviene dalla formazione delle Sabbie di Asti, e perciò potrebbe rappresentare un contesto di costa protetta, potenzialmente riparata dall'azione ondosa da scogli o banchi di sedimento che non permettono il facile accesso di organismi planctonici, data la loro scarsità nel campione, ma non ci sono abbastanza dati per poterlo dire con certezza. Per quanto riguarda i campioni C13 e C11, essi mostrano le crisi di ossigeno più severe, con i campioni che presentano condizioni di idrodinamismo essenzialmente assente ma allo stesso tempo indicano una marcata eutrofia. Il campione C13 potrebbe essere legato ad ambienti costieri riparati ma pesantemente influenzati da grande disponibilità di nutrimento, potenzialmente proveniente da corsi d'acqua limitrofi, dimostrando che nel Pliocene inferiore la vicinanza alla costa (e anche di delta) o una scarsa circolazione locale hanno favorito il ristagno e l'eutrofizzazione delle acque protette (De Rijk et al., 2000; Jorissen et al., 1995). Il campione C11 invece, proviene dalla formazione delle Argille Azzurre, in letteratura generalmente associata ad ambienti molto più profondi di quelli individuati dai dati; perciò, anche in questo caso la risposta più attendibile a questa discrepanza tra dataset è ritrovata nella presenza di trasporto tramite correnti gravitative di ingenti quantità di materiale da fondali costieri infralitorali-circalitorali ad ambienti batiali. La grande quantità di argilla è un ulteriore potenziale prova della profondità reale del deposito. I campioni C6 e C9 rappresentano gli ambienti che hanno formato i depositi più grossolani dello Zancleano, accomunati dalla elevata percentuale di sabbia, che indica un idrodinamismo che impatta sulle condizioni del fondale, andando però a rappresentare ambienti piuttosto diversi per quanto riguarda il trofismo, con le condizioni oligotrofiche del campione C6 che vanno a distaccarsi da quelle più mesotrofiche del campione C9, del quale non si conosce la formazione di provenienza. Il campione C2, malgrado mantenga un livello batimetrico paragonabile a quello degli altri campioni pliocenici, è invece caratterizzato da una percentuale di frazione sabbiosa minore, potenzialmente rappresentando un ambiente più protetto nel quale vi è un tasso di sedimentazione e un idrodinamismo decisamente minore, supportato dai valori più bassi di DO (anche se in condizioni meno estreme dei campioni C11 e C13). Anche in questo caso, come per il campione C11, la provenienza del sedimento

dalla formazione delle Argille azzurre, assieme agli altri parametri ambientali individuati nell'indagine, rinforza l'ipotesi che la batimetria estrapolata dai dati sia in realtà compromessa da apporti di materiale risedimentato, proveniente da profondità infralitorali-circolitorali. Quindi, come per il campione C11, la vera profondità dei depositi è in realtà potenzialmente molto maggiore (fino al batiale). L'origine dei sedimenti trasportati potrebbe quindi essere potenzialmente affine a batimetrie simili a quella della formazione delle Sabbie di Asti, dalla quale provengono il resto dei campioni zancleani.

7.4.2 Piacenziano (Sabbie di Asti, C8 e C16):

L'andamento ereditato dallo Zancleano sembra procedere nel Pliocene superiore, nel quale la quasi totale assenza di plancton (5.78%) pare indicare il consolidamento di un ambiente a batimetria ridotta, coerente con i sistemi da infralitorali a circolitorali tipici della Formazione delle Sabbie di Asti. I due campioni mostrano valori stabili di EBFOI, suggerisce un ritorno a condizioni di moderata e costante ventilazione delle acque di fondo stabilmente e mediamente ossiche. Tuttavia, bisogna ricordare che malgrado questi valori siano comparabili con quelli già riscontrati, in entrambi i campioni datati al piacenziano non è stato possibile raccogliere la totalità degli individui prefissata, e dunque vista la scarsa quantità di esemplari, i risultati sulla quale è basata l'interpretazione potrebbero presentare un bias di campionamento. Il campione C8, data la sua elevata quantità di percentuale sabbiosa nella sua frazione litica, sembra rappresentare un ambiente prossimale con elevato idrodinamismo, con flusso organico moderato, potenzialmente parzialmente incrementato dall'azione di materia organica proveniente da terra (Violanti, 2012). Il campione C16 presenta a sua volta caratteristiche che lo riconducono ad ambienti prossimali, ma i valori nettamente maggiori di DO e la percentuale minore, ma comunque rilevante, di sabbia rinvenuti, indicano condizioni ugualmente idrodinamiche ma lontane dall'azione di foci di corsi d'acqua, e che anzi si avvicinano di più all'oligotrofia (De Rijk et al., 2000).

7.5 Diversità

L'analisi quantitativa e qualitativa del dataset micropaleontologico, basato sul conteggio delle associazioni a foraminiferi distribuiti tra i 16 campioni, evidenzia nette fluttuazioni nell'abbondanza e nella struttura delle comunità biotiche. La maggior parte delle associazioni presenti nei vari campioni sono risultate essere sufficientemente diversificate da poter rappresentare con un

ragionevole limite di errore le caratteristiche ambientali degli antichi fondali marini dai quali provengono.

Il dataset che comprende le tipologie e il numero di foraminiferi ottenuto dall'analisi quantitativa può essere suddiviso in tre principali gruppi in base all'abbondanza totale. Il gruppo a più alta densità, composto dai campioni C1, C2, C3, C4, C5, C7, C10, 12, C13, C14 e C15 mostra la stabilità statistica più robusta, con un numero di individui standardizzato vicino o superiore alle 300 unità (picco massimo nel Campione C13 con 318 individui). Questa condizione soddisfa i requisiti prefissati per condurre le analisi paleoecologiche ottenendo risultati statisticamente significativi. I campioni C6 e C11 presentano un decremento dell'abbondanza, con rispettivamente 114 e 180 individui campionati, indice potenziale di un tasso di sedimentazione più accelerato o di un deterioramento delle condizioni al fondale. Infine, i campioni C8, C9 e C16 mostrano un volume ancora più ridotto di organismi, con il campione C8 che mostra un crollo drastico e critico della fauna, con soli 10 individui totali, il più povero tra tutti, mentre i campioni C9 e C16 presentano una diversità piuttosto bassa, con rispettivamente 84 e 64 individui.

La frazione planctonica mostra percentuali costanti nella maggior parte dei campioni completi, con specie del genere *Globigerina*, e taxa con morfologie affini che risultano ben rappresentati nei campioni datati al Miocene (provenienti sia dalla Pietra da Cantoni sia dalle Marne di S. Agata Fossili) quali C1, C3, C4, C5, C7, C12, C14 e C15 (Fig. 4-a). Nella frazione bentonica, taxa adattati a specifiche condizioni di vita, utili per determinare le caratteristiche paleoambientali, condividono le associazioni con specie più euriche, come *Melonis padanus*, *Pullenia bulloides* e *Siphonina reticulata*, che sono presenti nella maggior parte (se non nella totalità) dei campioni (Minto'o et al., 2015).

I grafici realizzati hanno mostrato la marcata differenza tra le caratteristiche dei campioni datati al Miocene (provenienti sia dalla Pietra da Cantoni sia dalle Marne di S. Agata Fossili) e quelli ricondotti invece al Pliocene. Specificatamente per quanto riguarda indici di diversità si può notare un cambio repentino dai dati più stabili del Miocene a quelli più variabili del Pliocene. Gli indici di diversità di Taxa e Chao-1 mostrano in generale un buon fit, confermando che il campionamento è stato compiuto al meglio per la quasi totalità dei campioni.

I campioni datati al Miocene e quelli pliocenici presentano caratteristiche collettive per le quali si distinguono gli uni dagli altri. Queste caratteristiche sono state osservate mediante la correlazione dei vari grafici e figure realizzate durante lo studio. Infatti, nelle curve di rarefazione (Fig. 5), negli indici di diversità (Fig. 6), nella PCA (Fig. 7), nel NMDS (Fig. 10) e nel diagramma ternario mirato a visualizzare l'ossigenazione dell'acqua al fondale (Fig. 11), si può notare che i dati rappresentanti i

campioni tortoniani risultano avere bassa variabilità e restare sempre molto vicini tra di loro, rispettivamente ai valori che assumono. Al contrario i dati riguardanti i campioni pliocenici, risultano essere invece molto più sparsi nei loro valori. Essendo i campioni tortoniani tutti provenienti dalla stessa formazione (Marne di S. Agata Fossili) questo risultato non ha destato troppa sorpresa, tuttavia, concentrandosi invece sul rapporto tra forme planctoniche e bentoniche (Fig. 4) e di conseguenza sulle interpretazioni graficate riguardo alla paleobatimetria dei campioni basandosi esclusivamente sui dati ricavati dallo studio (Fig. 9), si osserva il caso opposto, con i campioni pliocenici che mostrano valori estremamente più vicini fra di loro. Tuttavia, in quanto non si conosce l'ordine nel quale i campioni sono stati raccolti e quindi come si posizionano nella scala stratigrafica, non è possibile stimare la frequenza dei cambiamenti eustatici né ricostruire la loro sequenza cronologica.

7.6 Associazioni Mioceniche: Diversità

7.6.1 Burdigaliano-Langhiano (Pietra da Cantoni, C14 e C15):

Questi due campioni evidenziano una ricchezza specifica medio-alta (Taxa ~24), un indice di Shannon stabile (~2.5) e, in particolare per il campione C14, i valori moderati e stabili di Shannon (2.5–2.8) e Fisher's alpha (7), associati al minimo assoluto di Equitabilità della (~0.4), riflettono la natura calcarenitica e marnoso-calcareo della formazione (Violanti, 2008). La potenziale interpretazione dell'azione di eventi gravitativi come fattori che hanno plasmato gli ambienti relativamente profondi indicati dai campioni C14 e C15 è rafforzata dalla presenza di diversi esemplari di organismi indici di facies prettamente ossiche come *Cibicidoides pseudoungerianus*.

7.6.2 Tortoniano (Marne di S. Agata Fossili, C1, C3, C4, C5, C7 e C12):

Sembra rappresentare il climax ecologico dell'intera frazione temporale osservata, nella quale si registrano i massimi assoluti di ricchezza reale e attesa (Taxa ~31.33, Chao-1 ~35), i valori più elevati di biodiversità strutturale (Shannon >3.0, Fisher's alpha 8–10) e una Dominance quasi azzerata (<0.05). Il picco in C3 (>10) dell'indice Fisher's alpha indica un elevato rapporto tra numero di specie e numero di individui, tipico di ambienti marini aperti stabili (es. piattaforma continentale esterna o scarpata superiore). L'ecosistema è altamente diversificato, i foraminiferi sono distribuiti in modo efficiente tra molti taxa e non vi sono specie singole che dominano le altre. Le Marne di S. Agata Fossili testimoniano un regime di diffusa sedimentazione più lenta e caratteristica di contesti di

piattaforma esterna o scarpata superiore, caratterizzati da acque ben ossigenate, lontane da azione di foci ma con importanti flussi clastici grossolani.

Queste osservazioni si distaccano dalle caratteristiche sedimentologiche e paleoecologiche generalmente associate a questa formazione nella letteratura e sono potenzialmente riconducibili a fenomeni di trasporto, che hanno portato materiale di ambienti più prossimali a maggiori profondità, rendendo le associazioni ritrovate all'interno dei campioni (e quindi anche le batimetrie stimate) altamente variabili, in virtù dell'impatto che il materiale trasportato ha provocato nel campione. Si tratta di paleocomunità diversificate, dove la frazione planctonica composta da taxa come *Globigerina*, *Globigerinoides*, *Orbulina*, *Trilobatus* e *Fohsella* coesiste con un bentos eterogeneo. La stabilità dei parametri chimico-fisici (buona ossigenazione al fondo e input trofico costante) sembra aver consentito la saturazione di tutte le nicchie ecologiche sia per i taxa bentonici come *Pullenia*, *Oridorsalis* e *Melonis* sia per l'abbondante frazione planctonica. Anche in questo caso la presenza di *Cibicidoides pseudoungerianus*, un taxon comunemente associato ad acque più basse, è dovuta a fasi di trasporto.

7.7 Associazioni Plioceniche: Diversità

Queste associazioni documentano l'inizio del Pliocene inferiore. La forte oscillazione degli indici di diversità dell'epoca trova una perfetta corrispondenza nella variazione delle formazioni geologiche, a differenza dei campioni miocenici, provenienti in gran parte dagli stessi affioramenti e dalle stesse formazioni.

7.7.1 Zancleano (Sabbie di Asti, Argille azzurre e indeterminato, C2, C6, C9, C10, C11 e C13):

Il recupero locale degli indici di diversità in C2 (Shannon ~2.6, Fisher's alpha ~6.5) e il minimo ritrovato in C11 riflettono la sedimentazione in ambienti neritici, con le oscillazioni che indicano variazioni nell'ossigenazione o nel tasso di sedimentazione argillosa (Ghielmi et al., 2019). Il campione C9 si distingue come un'oasi di relativa stabilità all'interno dello Zancleano, mostrando un picco locale di Shannon-Weaver (~2.8), Fisher's alpha (~9.5) e Equitabilità (~0.8), a fronte di una Dominance che crolla al minimo (~0.05). Per i due campioni C11 e C13, associati ad ambienti eutrofici prossimali caratterizzati da bassa profondità e ossigeno, gli indici Taxa, Chao-1, Shannon e Fisher's alpha flettono vistosamente verso il basso, mentre la Dominance si impenna (~0.22). Il campione C10 presenta parametri peculiari per le Sabbie di Asti e andrebbe indagato più a fondo.

7.7.2 Piacenziano (Sabbie di Asti, C8 e C16):

Questi campioni sembrano rappresentare l'evento di regressione finale e il progressivo riempimento del Bacino Padano occidentale pliocenico (Damarco, 2010). Vista la bassa densità di organismi presenti nel sedimento e confrontandola con i valori riportati negli indici di diversità si può presumere un collasso della ricchezza (Taxa minimi), Dominance ai massimi assoluti (~ 0.27 in C8) ed Equitabilità paradossalmente elevata per via dell'estrema povertà faunistica. Secondo tali dati, speculando sull'abbondanza estremamente ridotta di alcuni campioni (come C8), la quasi totale assenza di organismi potrebbe essere l'effetto diretto di dinamiche o fluttuazioni a scala locale. Durante il Piacenziano, la progradazione dei sistemi deltaici e costieri delle Sabbie di Asti sarebbe dunque andata a confinare l'antico golfo in contesti infralitorali, dove le batimetrie e ed il rateo di sedimentazione restringono la fauna a pochissime specie. Ciò sembra aver essenzialmente azzerato la componente planctonica e gran parte del benthos specializzato, lasciando un'associazione residuale dominata esclusivamente da taxa bentonici subossici. Malgrado il campione C8 sia il più povero di tutto il dataset dal punto di vista della diversità, le interpretazioni eseguite ne tengono conto ed interpretano questa perdita locale di abbondanza come risposta a variazioni ambientali locali.

7.8 Rimaneggiamento delle faune

I campioni con abbondante frazione planctonica indicano fasi di massima trasgressione marina di tipo Highstand, mentre la contrazione della componente planctonica a favore di taxa bentonici e opportunisti come *Ammonia* o *Elphidium* documenta fasi di regressione o forti input terrigeni (a meno che la presenza di questi taxa sia dovuta al rimaneggiamento o trasporto, problema già precedentemente discusso). Inoltre, la presenza localizzata di generi bentonici, che sono fortemente tolleranti allo stress anossico, quali *Bolivina*, *Bulimina*, *Globobulimina*, *Fursenkoina* e *Uvigerina* in specifici campioni, contrapposta a intervalli barren o semi-barren (come il Campione C8), suggerisce l'instaurarsi di episodi di stagnazione delle masse d'acqua profonde. Nello specifico la scarsità di taxa del Campione C8 potrebbe documentare un picco di condizioni subossiche o anossiche al fondo non registrato dalla fauna del campione, poiché letale per il benthos e associata a una scarsa preservazione tafonomica dovuta a potenziale dissoluzione chimica dei gusci calcarei sotto l'interfaccia acqua-sedimento (Minhat et al., 2021; Murray et al. 2003).

8. Conclusioni

L'analisi micropaleontologica di alcune località dei bacini piemontesi tra Miocene e Pliocene superiore (campioni C1-C16) rivela condizioni paleoambientali strettamente legate a batimetria, ossigenazione (DO) e trofismo, mostrando una sistematica dominanza di foraminiferi bentonici ialini. Il Burdigaliano-Langhiano (Moletto/Rosignano) evidenzia un gradiente batiale profondo fino a 882 m con condizioni subossiche. Nel Tortoniano si va incontro ad un'elevata variabilità tra ambienti circolatori e batiali delle Marne di S. Agata di Pontestura. Le associazioni dello Zancleano segnalano un drastico innalzamento dei fondali (30–46 m), caratterizzato da una frammentazione ambientale con picchi di eutrofizzazione e stress ipossico in siti confinati come S. Marzanotto (C13), dove la dissoluzione selettiva e le condizioni ecologiche sfavoriscono i porcellanacei a vantaggio di taxa ialini opportunisti. Il Pliocene superiore (Piacenziano) conclude il ciclo deposizionale delle Sabbie di Asti, evidenziando le fasi finali del trend regressivo attraverso una marcata crisi biologica da instabilità del substrato (Cortiglione) e una fase di temporanea stabilità a debole energia con buona ossigenazione (Valle Botto). L'alto idrodinamismo e la sedimentazione sabbiosa hanno inibito le forme agglutinanti, favorendo foraminiferi ialini mobili e confermando il passaggio da stress da confinamento zancleano a stress da riempimento silicoclastico nel Piacenziano (Murray, 2003; Schmiedl et al., 2000).

I foraminiferi recuperati dai sedimenti sono stati trovati in associazione con diversi reperti di cetacei nelle varie unità formazionali, alcuni direttamente (sono stati prelevati direttamente dal sedimento attorno ai reperti, come in C13 e C15) oppure indirettamente (sono stati campionati in formazioni e luoghi in cui sono stati trovati reperti di cetacei). Il sedimento campionato direttamente è associato a due reperti estremamente importanti quello di *Atlantocetus lavezzi* (Bisconti et al., 2021) e *Marzanoptera tersilliae* (Bisconti et al., 2021). Altri cetacei che hanno potuto essere meglio inquadrati nel loro ambiente di fossilizzazione in questo lavoro sono *Tursiops miocenus* a Rosignano (C15) e un delfinide indeterminato a Belangero (C11).

È importante sottolineare che le interpretazioni paleoambientali fatte in questo lavoro non sono da considerarsi come valide per la totalità delle unità formazionali trattate, ma soltanto per gli specifici affioramenti presenti nei luoghi interessati dallo studio. Si tratta di dati derivati da pochi siti di campionamento, spesso concentrati in un'unica area geografica, che non coprono la grande estensione delle unità geologiche di riferimento; però le precise quantificazioni qui ottenute possono costituire un primo dato per procedere ad una piena caratterizzazione paleoambientale delle varie unità geologiche, radicata in un approccio rigorosamente quantitativo. In aggiunta bisogna anche chiarire che le età riportate per alcuni dei campioni (specialmente quelli Pliocenici) sono state principalmente ricavate dalla letteratura (pur sempre considerando i taxa presenti), in quanto non sono state trovate

forme idonee a fungere da fossili guida (Bicchi et al., 1999; Ghielmi et al., 2019; Violanti, 2012; Pierre & Irace, 2008).

Le caratteristiche paleoambientali dedotte dai dati acquisiti mostrano, quindi, quelle che sarebbero state le condizioni ambientali al fondo in cui le ossa dei cetacei sono state depositate e fossilizzate.

Dalla Formazione della Pietra da Cantoni a Moletto (campione C14), sono state estratte ossa di *Atlanticetus lavei*. La scoperta di questo mysticete ha rappresentato una pietra miliare nello studio dell'evoluzione dei cetacei nella pianura padana, in quanto rappresenta il più antico mai scoperto nel bacino (Bisconti et al., 2021). Basandoci sui dati raccolti, è stato possibile determinare che l'ambiente in cui l'animale si è depositato era di tipo batiale, come evidenziato da un forte segnale di pelagizzazione, con la componente planctonica dell'associazione a foraminiferi contenuta nel campione di sedimento che rappresentava il 77,85% del totale (dominata da *Globigerina bulloides* e *Trilobatus trilobus*). Questo ambiente aveva una profondità di circa 882 ± 339 m (la profondità massima registrata tra i campioni analizzati) e rifletteva condizioni subossiche (DO: 1,86 mL/L; EBFOI: 10,63), indicative di un bacino profondo con condizioni eutrofiche delle acque al fondale, livelli di ossigeno impoveriti e un'abbondanza di materia organica in decomposizione.

Nella formazione della Pietra da Cantoni a Rosignano Monferrato (campione C15), sono stati rinvenuti resti di *Tursiops miocen*. Nel sito (che registra un fondale situato ad una profondità di circa 422 ± 107 m), si osserva un aumento delle condizioni di ossigenazione, insieme ad un elevato apporto litico sabbioso (51.68%) e la persistente dominanza planctonica (61.22%, dominata da *Globigerinoides obliquus*), il campione C15 mostra valori ossici stabili (DO: 2.92 mL/L; EBFOI: 38.67) e un'eccellente biodiversità bentonica (26 taxa), segno di una migliore circolazione delle acque intermedie mioceniche in questo settore.

Dalla formazione delle Sabbie di Asti a S. Marzanotto (campione C13), sono stati prelevati reperti di *Marzanoptera tersilliae*, il cui esemplare è stato denominato "Tersilla". I dati analizzati testimoniano una frazione sabbiosa quasi azzerata (1.52%, indice di totale isolamento idrodinamico) e la minima profondità registrata nel dataset (30 m), con un DO di solo 1.53 mL/L e il minimo assoluto di EBFOI (1.04). Questo ambiente ha quasi azzerato il plancton (1 solo individuo su 318) determinando la dominanza monopolistica del bentonico tollerante *Cassidulina laevigata*.

Dalla formazione delle Argille Azzurre a Belangero (campione C11), è stata prelevata parte di un delfinide indeterminato, che con DO= 1.7 mL/L ed EBFOI= 6.12, indica che la carcassa si è depositata in condizioni nettamente eutrofiche e con marcata riduzione di ossigeno.

In conclusione, i dati integrati indicano che mentre nel Burdigaliano-Langhiano e nel Tortoniano i deficit di ossigeno erano controllati principalmente dalla profondità dei depositi e dalla dinamica delle correnti intermedie (e quindi disponibilità di cibo), la successiva crisi d'ossigeno zancleana è stata guidata da complessi fattori geomorfologici di confinamento costiero ed isolamento dei bacini, culminando poi nel Piacenziano in un generale stress da riempimento sedimentario silicoclastico e regressione marina. Le variazioni nell'architettura delle paleocomunità a foraminiferi esaminate non sembrano rispondere dunque a dinamiche locali o tafonomiche casuali, ma registrano in modo potenzialmente sensibile i cicli eustatici, paleoclimatici e geodinamici che hanno guidato l'evoluzione del Bacino Terziario Piemontese e del Bacino Padano occidentale pliocenico.

9. Bibliografia e sitografia

- Agip (1982). Foraminiferi padani (Terziario e Quaternario). Seconda Edizione. 56 Pl. Agip S.p.A., Milano.
- Bertini A. & Martinetto E. (2008). Messinian to Zanclean vegetation and climate of Northern and Central Italy. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 47, 105-121.
- Bicchi E., Dela Pierre F., Ferrero E., Maia F., Negri A., Pirini Radrizzani C., Tonon M. & Valleri G. (1999). Evolution of carbonate platforms in Eastern Monferrato (NW Italy). *European Palaeontological Association Workshop, Lisboa*: 15-20.
- Bicchi E., Maia F., Ferrero E., Pirini Radrizzani C. & Valleri G. (1997). Carbonate platforms in the Lower-Middle Miocene succession of the Eastern Monferrato area: the biostratigraphic record. *Interim Colloquium Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy, Catania, Abstract volume*: 31.
- Bicchi E., Pierre, F. D., Ferrero, E., Maia, F., Negri, A., Radrizzani, C. P., Radrizzani, S., & Valleri, G. (2006). Evolution of the Miocene carbonate shelf of Monferrato (North-western Italy). *Bollettino-Società Paleontologica Italiana*, 45(2/3), 171.
- Biella, G., Polino, R., Franco, R. D., Rossi, P. M., Clari, P., Corsi, A., & Gelati, R. (1997). The crustal structure of the western Po plain: reconstruction from integrated geological and seismic data. *Terra Nova*, 9(1), 28-31.
- Bisconti M., Damarco P., Repetto G., Pavia M. & Carnevale G. (2020). Il Patrimonio Paleocetologico Piemontese: Storia e Prospettive. *Parva Naturalia*, 15, 15-58.
- Bisconti M., Damarco, P., Mao, S., Pavia, M., & Carnevale, G. (2021). The earliest baleen whale from the Mediterranean: large-scale implications of an early Miocene thalassotherian mysticete from Piedmont, Italy. *Papers in Palaeontology*, 7(2), 1147-1166.
- Bisconti M., Damarco, P., Pavia, M., Sorce, B., & Carnevale, G. (2021). *Marzanoptera tersillae*, a new balaenopterid genus and species from the Pliocene of Piedmont, north-west Italy. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 192(4), 1253-1292.
- Bisconti M., Daniello, R., Damarco, P., Tartarelli, G., Pavia, M., & Carnevale, G. (2021). High encephalization in a fossil rorqual illuminates baleen whale brain evolution. *Brain Behavior and Evolution*, 96(2), 78-90.

- Bisconti, M., Daniello, R., Stecca, R., & Carnevale, G. (2025). A new Pliocene sperm whale from Vigliano d'Asti, Piedmont, northwest Italy. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 131, 139-175.
- Bisconti, M., Repetto, G., Lozar, F., Bicchi, E., Daniello, R., Damarco, P., Marengo, L., Bella, T., Macagno, M., Tosetto, V., & Tartarelli, G. (2025). A new fossil from the Late Miocene of Piedmont (north-western Italy) sheds light on the evolution of the Cetotheriidae (Mammalia: Cetacea: Mysticeti). *Journal of Systematic Palaeontology*, 23(1), 2540310.
- Bran, J. (2018 & 2022). Ricostruzione artistica di *Astadelphis gastaldii*, *Septidelphis morii* ed *Eschrichtioides gastaldii*. inedito
- Carnevale G., Gennari R., Lozar F., Natalicchio M., Pellegrino L., & Dela Pierre F. (2003). Living in a deep desiccated Mediterranean Sea: An overview of the Italian fossil record of the Messinian salinity crisis. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 58, 109-140.
- Castellarin, A., Selli, L., Picotti, V., & Cantelli, L. (1998). La tettonica delle Dolomiti nel quadro delle Alpi Meridionali Orientali. *Mem. Soc. Geol. It*, 53, 133-143.
- De Rijk, S., Jorissen, F. J., Rohling, E. J., & Troelstra, S. R. (2000). Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera. *Marine Micropaleontology*, 40(3), 151-166.
- Dela Pierre, F., Piana, F., Fioraso, G., Boano, P., Bicchi, E., Forno, M. G., Violanti, D., Clari, P., Polino, R., Balestro, G., Clari P., & D'Altri A. (2003). Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000. Foglio 157 "Trino".
- Elter, P., & Pertusati, P. C. (1973). Considerazioni sul limite Alpi-Appennino e sull sue relazioni con l'arco delle Alpi occidentali. *Mem. Soc. Geol. It*, 12, 0004, 359-375
- Falletti, P., Monegato, G., Fioraso, G., Barale, L., Piana, F., D'Atri, A. R., L. Barale, P. Falletti, G. Monegato, M. Morelli, S. Tallone & G. B. Vigna. (2017). Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps–Apennines interference zone). *Journal of maps*, 13(2), 395-405
- Gastaldello, M. E., Agnini, C., Westerhold, T., Drury, A. J., & Alegret, L. (2024). A benthic foraminifera perspective of the late miocene-early pliocene biogenic bloom at ODP Site 1085 (Southeast Atlantic Ocean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 638, 112040.

Ghielmi, M., Rogledi, S., Vigna, B., & Violanti, D. (2019). La successione messiniana e plio-pleistocenica del Bacino di Savigliano (settore occidentale del Bacino Terziario Piemontese-Italia). *Geologia Insubrica*, 13(1), 3-141.

Glioti G. (2024). Identificazione dei foraminiferi presenti nei sedimenti neogenici dell'Astigiano per la datazione dei cetacei rinvenuti. Tesi di Laurea, Università di Genova, inedita.

Gross, O. (2001). Foraminifera. *Collection Patrimoines Naturels*.

Hayward, B. W., Tendal, O. S., Carter, R., Grenfell, H. R., Morgans, H. E. G., Scott, G. H., ... & Gordon, D. P. (2012). Phylum Foraminifera. *Foraminifera and Xenophyophores. New Zealand Inventory of biodiversity*, 2, 242-287.

Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., & Widmark, J. G. (1995). A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Marine micropaleontology*, 26(1-4), 3-15.

Knowledge Base (2026). Alpha Diversity. Accessed at <https://kb.ezbiocloud.net/home/science-blogs/analyze/alpha-diversity> in 2026

Krijgsman, W., Rohling, E. J., Palcu, D. V., Raad, F., Amarathunga, U., Flecker, R., Florindo, F., Roberts, A.P., Sierro, F.J. & Aloisi, G. (2024). Causes and consequences of the Messinian salinity crisis. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(5), 335-350.

Laubscher, H. (1996). Shallow and deep rotations in the Miocene Alps. *Tectonics*, 15(5), 1022-1035.

Lázár, B., Zonneveld, K., & Silye, L. (2026). Quaternary benthic foraminiferal assemblages offshore Cape Blanc, NW Africa: spatial distribution and (paleo) ecological significance. *Micropaleontology*, 72(1), 77–96.

Maino, M., Decarlis, A., Felletti, F., & Seno, S. (2013). Tectono-sedimentary evolution of the Tertiary Piedmont Basin (NW Italy) within the Oligo–Miocene central Mediterranean geodynamics. *Tectonics*, 32(3), 593-619.

Marotta A. (2022). Identificazione dei foraminiferi presenti nei sedimenti neogenici dell'Astigiano per la datazione dei cetacei fossili rinvenuti. Tesi di Laurea, Università di Genova, inedita.

Martinis B. (1954). Ricerche stratigrafiche e micropaleontologiche sul Pliocene piemontese. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 60 (2/3), 45-114/125-194.

mikrotax.org website. pforams@mikrotax website. Accessed at <https://foraminifera.eu/> in 2026

- Minhat, F. I., Ghandhi, S. M., Ahzan, N. S. M., Haq, N. A., Manaf, O. A. R. A., Sabohi, S. M., ... & Abdullah, M. M. (2021). The occurrence and distribution of benthic foraminifera in tropical waters along the Strait of Malacca. *Frontiers in Marine Science*, 8, 647531.
- Minto'o, C. A., Bassetti, M. A., Morigi, C., Ducassou, E., Toucanne, S., Jouet, G., & Mulder, T. (2015). Levantine intermediate water hydrodynamic and bottom water ventilation in the northern Tyrrhenian Sea over the past 56,000 years: New insights from benthic foraminifera and ostracods. *Quaternary International*, 357, 295-313.
- Murray J.W. (1991). *Ecology and Palaeoecology of Benthic Foraminifera*. 397 pp. Longman Scientific & Technical, New York
- Murray, J. W., Alve, E. and Cundy, A. 2003. The origin of modern agglutinated foraminiferal assemblages: evidence from a stratified fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 58 (3): 677–697
- Ormezzano D. & Lanzetti A. (2014). I cetacei fossili del Museo Regionale di Scienze Naturali di Torino. *Museologia Scientifica Memorie*, 13, 18-24.
- Piana, F. (2000). Structural setting of western Monferrato (Alps-Apennines junction zone, NW Italy). *Tectonics*, 19(5), 943-960.
- Piana, F., & Polino, R. (1995). Tertiary structural relationships between Alps and Apennines: the critical Torino Hill and Monferrato area. Northwestern Italy. *Terra Nova*, 7(2), 138-143.
- Piana, F., Fioraso, G., Irace, A., Mosca, P., D'atri, A., Barale, L., Falletti, P., Monegato, G., Morelli, M., Tallone, S. & Vigna, G. B. (2017). Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps–Apennines interference zone). *Journal of Maps*, 13(2), 395-405.
- PIERRE, F. D., & IRACE, A. (2008). The Miocene/Pliocene boundary and the early pliocene micropalaeontological record: new data from the Tertiary Piedmont Basin (Moncucco quarry, Torino Hill, Northwestern Italy). *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 47, 2.
- Schmiedl, G., De Bovée, F., Buscail, R., Charrière, B., Hemleben, C., Medernach, L., & Picon, P. (2000). Trophic control of benthic foraminiferal abundance and microhabitat in the bathyal Gulf of Lions, western Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, 40(3), 167-188.
- Schönfeld, J., Glock, N., Polovodova Asteman, I., Roy, A. S., Warren, M., Weissenbach, J., & Wukovits, J. (2023). Benthic foraminiferal patchiness–revisited. *Journal of Micropalaeontology*, 42(2), 171-192.

Spellerberg, I. F., & Fedor, P. J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon–Wiener’ Index. *Global ecology and biogeography*, 12(3), 177-179.

The Foraminifera.eu Database. Accessed at <http://www.foraminifera.eu> in 2026

Trenkwalder S., Violanti D., d’Atri A., Lozar F., Dela Pierre F. & Irace A. (2008). The Miocene/Pliocene boundary and the Early Pliocene micropalaeontological record: new data from the Tertiary Piedmont Basin (Moncucco quarry, Torino Hill, Northwestern Italy). *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 47 (2), 87-103.

Van Hinsbergen, D. J. J., Kouwenhoven, T. J., & Van der Zwaan, G. J. (2005). Paleobathymetry in the backstripping procedure: Correction for oxygenation effects on depth estimates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 221(3-4), 245-265.

Violanti D. (2005). Pliocene foraminifera of Piedmont (north-western Italy): a synthesis of recent studies. *Annali dell’Università di Ferrara, Mus. Sci. Nat. volume special, Sezione di Museologia Scientifica e Naturalistica*, 75-88.

Violanti D. (2012). Pliocene Mediterranean foraminiferal biostratigraphy: a synthesis and application to the paleoenvironmental evolution of Northwestern Italy. In: *Stratigraphic analysis of layered deposits* (Ö. Elitok ed.), 123-160. InTech, Rijeka.

Violanti, D. (2011). Micropalaeontological evidences of high productivity episodes in the Zanclean of Piedmont (Early Pliocene, Northwestern Italy). *Evidenze micropaleontologiche di episodi di alta produttività nello zancleano (pliocene inferiore) dell’Italia nord-occidentale*. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 50 (2), 111-133.

WoRMS Editorial Board (2024). World Register of Marine Species. Accessed at <https://www.marinespecies.org> in 2026

Ringraziamenti

Voglio ringraziare calorosamente la mia famiglia; i miei relatori e professori Antonino Briguglio e Michele Piazza; e infine i dottorandi Luca Arena e Carla Altieri, che mi hanno aiutato e dato consigli preziosi quando ne avevo bisogno, e che mi hanno supportato, e soprattutto, sopportato durante questo lungo percorso.

Grazie mille.