ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

Studio di serie temporali dell'ecosistema marino in una stazione costiera dell'Emilia Romagna

Tesi di laurea in **Oceanografia e meteorologia**

Relatore
Prof.ssa Nadia Pinardi

Presentata da
Barbara Liverani

Correlatori
Dott. Luca Polimene
Dott. Marco Zavatarelli
Dott. Giuseppe Montanari

(III sessione)

Anno Accademico 2004/2005

Indice

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE 5

1.1 IL MAR ADRIATICO 5
1.2 CARATTERISTICHE IDRODINAMICHE 9
1.2.1 Il Nord Adriatico *11*
1.3 CARATTERISTICHE BIOCHIMICHE 14
1.3.1 Produzione primaria e Clorofilla-a *20*
1.4 INTERNATIONAL LONG TERM ECOLOGICAL RESEARCH (ILTER) NETWORK 23
1.5 OBIETTIVI DELLA TESI 26

CAPITOLO 2 - SERIE TEMPORALI A DISPOSIZIONE 27

1.2 CAMPIONAMENTI 27
2.2 ANALISI PRELIMINARE DEI DATI 30

CAPITOLO 3 – METODOLOGIE DI ANALISI 34

3.1 CONTROLLO DI QUALITÀ DEI DATI 34
3.2 DESCRIZIONE DELLE VARIABILI PRINCIPALI 41
3.2.1 Temperatura *41*
3.2.2 Salinità *42*
3.2.3 Ammonio *43*
3.2.4 Nitrato *45*
3.2.5 Ortofosfati *46*
3.2.6 Fosforo totale *47*
3.2.7 Clorofilla-a *48*
3.3 CORRELAZIONI 50
3.4 ANALISI DI FOURIER 54

CAPITOLO 4 – DISCUSSIONE DEI RISULTATI 57

4.1 DISCUSSIONE DELLE SERIE TEMPORALI 57
4.2 ANALISI SPETTRALE 65

CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI 69

BIBLIOGRAFIA 70

Capitolo 1 – Introduzione

1.1 Il Mar Adriatico

Le principali caratteristiche del Mar Adriatico sono la forma stretta e allungata in direzione Nord-Ovest Sud-Est, la moderata profondità e la presenza di numerosi fiumi che determinano un apporto d'acqua dolce stimabile con una portata media annua pari a 5700 m^3/s.

Il Mar Adriatico può essere suddiviso in tre sotto-bacini caratterizzati da differente morfologia, regime trofico e strutture idrodinamiche: l'Adriatico settentrionale, l'Adriatico centrale e quello meridionale.

La regione a Nord–Ovest è caratterizzata da una lunga piattaforma continentale, (35m di profondità, in media). Il fondale scende gradualmente lungo la piattaforma con un'inclinazione inferiore ad un grado, fino ad arrivare al ciglio della scarpata continentale, identificabile con l'isobata dei 120 m all'altezza di Pescara, la quale delimita il Bacino Settentrionale. Il cambio di pendenza sulla scarpata determina un aumento più repentino della profondità fino a raggiungere i 270 m nella Sacca di Pomo. Il confine tra il Bacino Centrale e quello meridionale, che raggiunge i 1200 m di profondità massima per poi risalire nuovamente avvicinandosi allo Stretto d'Otranto (780m), è situato all'altezza del Gargano.

Essendo situato alle medie latitudini, il Mare Adriatico è soggetto ad un'elevata variabilità stagionale e a variazioni meteorologiche a scala sinottica. Il regime dei venti è caratterizzato, in inverno, da eventi di Bora e Scirocco. La Bora è un vento che spira

da Nord-Est portando con sé aria fredda e secca d'origine continentale, mentre lo Scirocco spira in direzione Sud-Ovest, lungo l'asse principale del bacino apportando aria calda e umida. In estate i venti sono deboli e prevalentemente in direzione Nord-Ovest, con brezze marine giornaliere prevalenti nelle aree costiere. Il forzante ventoso condiziona particolarmente la circolazione all'interno del bacino.

Altro ruolo molto importante come forzante della temperatura, è quello rivestito dal flusso di calore all'interfaccia aria-mare (Qtot). Si esprime come somma di diversi fattori:

$$Qtot=Qs-Qb-Qh-Qe$$

Qtot è il flusso netto di calore all'interfaccia aria-mare, Qs è il flusso di calore dovuto alla radiazione solare incidente a corta lunghezza d'onda, Qb è il flusso di calore emesso dalla superficie a lunga lunghezza d'onda, Qh è il flusso di calore sensibile (conduzione, convezione secca), Qe è il calore latente d'evaporazione. Il flusso di calore medio in Adriatico è caratterizzato da un trasferimento netto di calore dal mare all'atmosfera pari a circa 20 W/m^2 l'anno, bilancio in linea con quello dell'intero Mar Mediterraneo.

Altro aspetto importante a carattere generale è il bilancio idrico, considerato come forzante della salinità. Esso è dato dalla somma di precipitazioni (P), apporti fluviali (R) ed evaporazione (E):

$$W = E - P - R$$

Tale bilancio in Adriatico è negativo ovvero corrisponde ad un guadagno netto di acqua su scala annuale dovuto agli ingenti apporti fluviali. Tale bilancio positivo differisce nettamente da quello del Mediterraneo, che risulta essere in perdita. Per questo l'Adriatico è definito come un bacino di diluizione.

Un altro importante fattore che caratterizza le proprietà fisico-chimiche delle masse d'acqua dell'Adriatico è lo scambio di acque ad Otranto. Le acque del Mediterraneo che entrano dallo Stretto d'Otranto ne accrescono la salinità, mentre l'ingente apporto fluviale e le precipitazioni, soprattutto a Nord, favoriscono la diluizione delle acque marine in particolare vicino a costa. I massimi di salinità si riscontrano al centro del bacino. In inverno e primavera gli apporti fluviali sono più abbondanti a causa delle frequenti precipitazioni e allo scioglimento delle nevi sulle pendici montane. Il flusso d'acque dolci in inverno rimane maggiormente confinato vicino a costa, promuovendo, a causa della sua bassa temperatura, il rimescolamento verticale della colonna d'acqua. Nelle stagioni più calde, invece, il pennacchio delle acque fluviali (plume) si spinge fortemente al largo rimanendo confinato nello strato superficiale. Questo comporta in generale, massimi di salinità in superficie nella stagione invernale alimentati anche dall'elevato tasso d'evaporazione all'interno del bacino.

Le particolari condizioni climatiche provocano una marcata variazione stagionale di temperatura, stimabile attorno ai 18 ^{0}C alla superficie a Sud, e fino ai 25 ^{0}C nelle regioni più settentrionali. Nelle zone costiere, in cui la variabilità è più elevata, le temperature massime si raggiungono mediamente nel mese d'agosto, mentre le minime si riscontrano in febbraio.

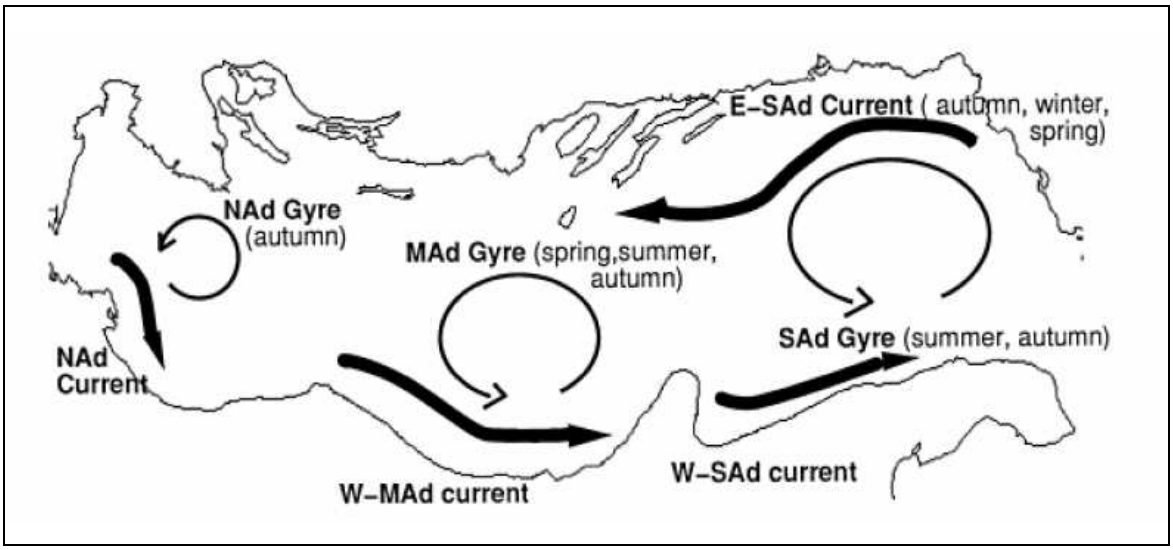


Fig. 1.1 - Schema della circolazione baroclina alla superficie tratta da Artegiani et al. (1997).

1.2 Caratteristiche idrodinamiche

La circolazione nel Mar Adriatico è prevalentemente termoalina. I forzanti dalla circolazione termoalina sono il flusso di calore e il flusso d'acqua all'interfaccia aria-mare, che agendo sulla distribuzione spaziale di temperatura e salinità alla superficie, determinano la distribuzione di densità, vero motore di tutta la circolazione.

L'Adriatico è soggetto ad ingenti perdite di calore durante i mesi invernali dovuti a frequenti fenomeni di Bora soprattutto nella regione settentrionale. L'aria fredda e secca proveniente dal continente causa un abbassamento della temperatura superficiale ed un incremento dell'evaporazione. Questi due fattori contribuiscono all'aumento della densità in superficie che rende instabile la colonna d'acqua innescando un rimescolamento verticale. Condizioni climatiche di questo tipo, sommate all'andamento ciclonico della circolazione generale danno origine a fenomeni convettivi e dunque alla formazione d'acque profonde.

Al centro del bacino settentrionale si origina una massa d'acqua profonda, chiamata Acqua Profonda del Nord Adriatico (Nord Adriatic Deep Water, NAdDW), che è la massa d'acqua più densa che si forma all'interno di tutto il Mediterraneo. La NAdDW si muove verso Sud lungo le isobate della costa occidentale rimanendo confinata vicino al fondo, dividendosi in due, una parte entra nella Fossa di Pomo, l'altra prosegue verso il bacino meridionale. Qui si forma l' Acqua Profonda dell'Adriatico (Adriatic Deep Water, ADW) che poi fuoriesce dallo Stretto di Otranto durante l'estate. Questa corrente profonda contribuisce alla circolazione di tipo antiestuarino.

L'accumulo d'acque dolci d'origine fluviale e il riscaldamento, determinano la formazione della Corrente Occidentale dell'Adriatico (Western Adriatic Current, WAC).

La WAC si muove lungo la costa occidentale in direzione Sud fino allo Stretto d'Otranto rimanendo confinata sulla piattaforma continentale a basse profondità, ed è principalmente caratterizzata da acque relativamente fredde e poco salate.

Per compensare l'uscita di queste due masse d'acqua lungo il bordo Ovest del bacino, si ha dalla parte opposta l'ingresso di una corrente d'acqua più salata dal Mar Ionio, chiamata Corrente Orientale dell'Adriatico (Eastern Adriatic Current, EAC). Essa si sviluppa lungo la costa orientale in direzione Nord ed è composta da due masse d'acqua, una che si muove in superficie chiamata Acqua Superficiale dello Ionio (Ionian Surface Water, ISW) e una che fluisce a profondità intermedia (circa 200 m), chiamata Acqua Levantina Intermedia (Levantine Intermediate Water, LIW).

Questa duplice circolazione termoalina è suscettibile alle variazioni climatiche su scala sia stagionale che interannuale e ad essa si vanno a sommare perturbazioni dovute al regime medio dei venti.

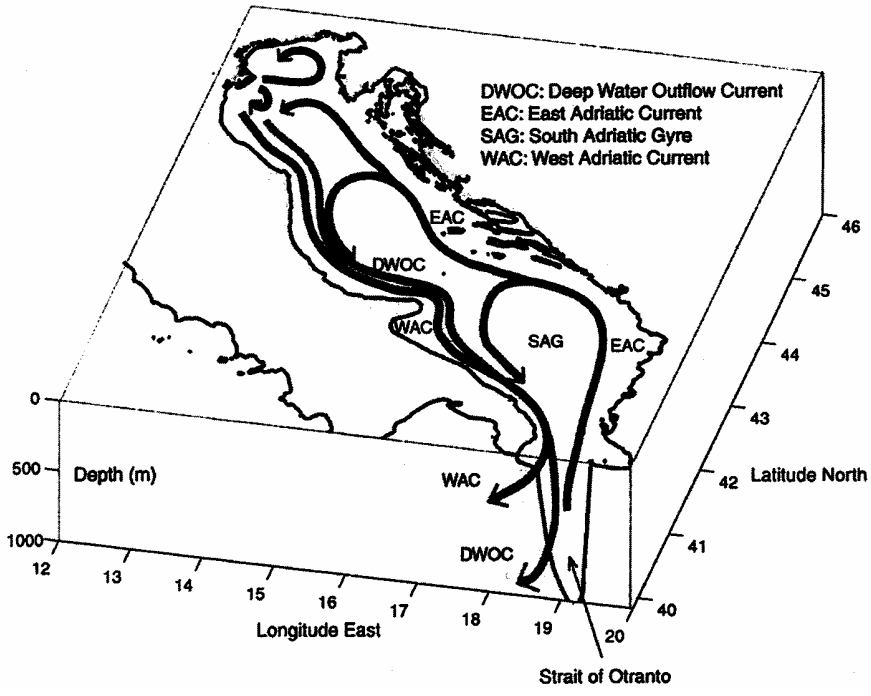


Fig. 1.2 - Schema della circolazione termoalina e delle correnti principali in Adriatico tratto da Cushma-Roisin et al., 2000.

1.2.1 Il Nord Adriatico

Il Nord Adriatico è delimitato ad Ovest dalla penisola italiana e ad Est dai Balcani ed il suo confine meridionale è rappresentato dall'isobata dei 120m situata a 43º 20' N di latitudine circa.

La costa a Nord-Ovest è una costa bassa e sabbiosa, caratteristica di una piana alluvionale, mentre la costa ad Est è una costa alta, rocciosa e frastagliata, in cui sono presenti molte isole, insenature, baie e grotte.

L'intero bacino settentrionale giace su una piattaforma continentale per cui la profondità aumenta in maniera molto graduale (0.5-1 m/km) e diventa massima al

confine con il bacino centrale che coincide con il ciglio della scarpata continentale. La profondità media è pari a 35 m circa.

L'Alto Adriatico è sottoposto ad intensi flussi di calore e di acqua (evaporazione e precipitazione) e ad un ingente apporto d'acque dolci. Il fiume Po, infatti, che caratterizza fortemente l'ecosistema di questa regione, contribuisce per il 28% all'apporto fluviale dell'intero Adriatico.

In inverno si ha omogeneità verticale di temperatura e salinità all'interno della colonna d'acqua, e la temperatura minima in superficie si aggira attorno agli 8 gradi centigradi. L'apporto da parte del Po di acque generalmente più fredde di qualche grado, condiziona tutta la temperatura superficiale.

In estate la colonna d'acqua è fortemente stratificata e presenta un termoclino situato a 10-15 m di profondità circa. Le temperature massime si rilevano lungo la costa italiana.

La salinità varia da zero, alla bocca del fiume, fino a valori massimi attorno ai 38.5 psu, dovuti all'arrivo di masse d'acqua più salate che, provenienti da Sud, risalgono lungo la costa orientale guidati dalla circolazione generale che abbiamo descritto come ciclonica.

La presenza del Po influenza i valori di salinità anche a grandi distanze dalla sua foce. In determinate condizioni meteo-climatiche, che si verificano soprattutto in estate, l'acqua dolce rimane confinata entro il pennacchio torbido d'origine fluviale, che scorre in superficie.

L'apporto di nutrienti da parte dei fiumi (in particolare dal Po) è ingente a causa della pressione antropica esercitata sia sulla costa, sia in tutta la valle padana.

Contribuiscono in maniera consistente al carico trofico dei fiumi l'attività industriale e l'attività agricola molto intensa in tutta la valle padana.

I nutrienti, una volta in mare, vengono avvettati in tutto il Nord Adriatico. La presenza di nutrienti, favorisce la crescita del fitoplancton originando in alcune zone costiere del Nord Adriatico, condizioni mesotrofiche ed eutrofiche molto diverse dalle condizioni di oligotrofia presenti in tutto il resto dell'Adriatico.

L'acqua, scaricata dal Po, in maggior quantità durante l'inverno, fluisce tendenzialmente in direzione meridionale, seguendo la circolazione generale dell'intero bacino, formando uno strato costiero (Western Coastal Layer, WCL) con caratteristiche che si distinguono nettamente dalle acque provenienti ad esempio dal centro del bacino. Il WCL è associato alla WAC che trasporta con sé, come abbiamo visto, lungo tutta la costa italiana, acque poco salate e ricche di nutrienti. Inoltre in estate l'acqua fluviale, tende a restare confinata in uno strato superficiale, spesso qualche metro, che si autosostiene, scivolando sugli strati sottostanti, fino a grandi distanze dalla foce distribuendosi in quasi tutto il bacino settentrionale.

Quando si presentano contemporaneamente omogeneità nella colonna d'acqua, deboli condizioni di vento e basse portate del Po avremo un WCL ampio e confinato sotto costa mentre, quando si verificano stratificazione della colonna d'acqua, abbondanti portate del fiume ed eventi di bora o scirocco avremo un WCL meno ampio e meno confinato sotto costa.

1.3 Caratteristiche biochimiche

Gli apporti di sostanze nutritive, quali azoto, fosforo e silicio, si distinguono in carichi trofici esterni e carichi trofici interni. I carichi esterni provengono da fonti localizzate, a cui appartengono gli scarichi fluviali e civili e da fonti diffuse, a cui appartengono le acque di dilavamento di suolo incolto, coltivato e di aree urbanizzate. Per carico interno s'intende invece il quantitativo di nutrienti che viene ceduto dai sedimenti attraverso diversi processi all'interfaccia acqua-sedimento come ad esempio la diffusione molecolare tra acque interstiziali e colonna d'acqua, il mescolamento turbolento per opera di correnti, la risospensione ad opera delle correnti, maree e moto ondoso, la bioturbazione e l'assimilazione ad opera di organismi bentonici o di rimineralizzazione attraverso la degradazione batterica della sostanza organica.

Le caratteristiche biochimiche dell'Adriatico sono delineate da alcuni fattori principali:

- l'apporto di sostanze organiche, inorganiche e nutritive da parte principalmente del Bacino Padano Adriatico;
- la forma semi-chiusa del bacino che limita gli scambi con il resto del Mediterraneo;
- la forte pressione antropica esercitata sulle aree costiere;
- le dinamiche degli ecosistemi presenti.

La meteo-climatologia risulta essere un elemento fondamentale nell'evoluzione dello stato trofico dell'Adriatico, visto che è determinante come forzante del ciclo idrologico dei fiumi che sfociano nell'Adriatico. Il Po ed i suoi affluenti raccolgono all'interno del bacino imbrifero per diluizione e dilavamento una grande quantità di sostanze,

organiche ed inorganiche, presenti in varie forme chimiche, che vengono trasportate e trasformate lungo il loro percorso verso il mare.

La quantità di tali sostanze è fortemente influenzata, oltre che dal regime delle piogge, anche dalla grande pressione antropica esercitata in tutto il bacino. Questa area, infatti, oltre ad essere densamente popolata, ed inoltre è sede di numerose attività agricole, industriali e commerciali che con i loro reflui incrementano notevolmente il carico trofico. Inoltre, lo sfruttamento intensivo del territorio (urbanizzazione, disboscamento) e del suolo agricolo hanno aumentato il processo di lisciviazione attraverso il terreno di queste sostanze che giungono al mare anche dal sottosuolo attraverso le falde acquifere.

Nel bacino idrografico del fiume Po vengono generati e poi sversati a mare circa 1.7 10^5 tonnellate l'anno d'azoto che derivano per il 56% dal suolo coltivato, il 18% dal comparto civile, il 14% dall'industria, l'8% dalla zootecnia ed il 4% dai suoli incolti; il carico di fosforo liberato ammonta a 1.1 10^4 tonnellate l'anno.

Si può estendere quanto detto per il bacino imbrifero del Po, a tutta la zona costiera circostante l'Adriatico, in particolare quella italiana, densamente popolata, ricca d'attività commerciali e turistiche.

Il limitato scambio d'acque che avviene attraverso lo Stretto di Otranto, causa un aumento del tempo si residenza dei nutrienti all'interno del Bacino. Si è stimato che il completo ricambio d'acqua avvenga in un periodo che va dai tre ai dieci anni (Mosetti, 1983), non facilitando l'ingresso di acque oligotrofiche dal Mar Mediterraneo e dunque contribuendo all'acutizzarsi dei fenomeni di eutrofizzazione.

Il fiume Po si può considerare, quindi, il motore principale della dinamica dei nutrienti in Adriatico e si può quindi assumere che la variazione a scala stagionale delle

concentrazioni nelle acque superficiali nel bacino settentrionale e lungo la costa occidentale rifletta i cambiamenti che avvengono nel carico fluviale. I nutrienti disciolti presenti nella plume fluviale sono dispersi subito all'uscita delle bocche in direzione sia orizzontale sia verticale in base alle caratteristiche fisiche ed energetiche dei due sistemi fiume-mare. Questa dispersione avviene per diffusione turbolenta sul fronte salino (interfaccia acqua fluviale dolce-acqua marina salata).

Nel bacino settentrionale i profili dei nutrienti sono generalmente caratterizzati da concentrazioni superficiali più elevate che decrescono verticalmente sino circa metà della colonna d'acqua, dove la tendenza si inverte ad opera dei processi di rimineralizzazione. L'influenza del Po negli strati superficiali è evidente anche per la correlazione inversa che esiste tra concentrazione dei nutrienti e salinità e per il gradiente negativo osservabile allontanandosi dalla foce.

Nei mesi più caldi il riscaldamento superficiale e l'apporto d'acque dolci implica una marcata stratificazione e la creazione di un picnoclino che limita gli scambi all'interno della colonna d'acqua. A parte i nitrati, gli altri nutrienti mostrano la loro maggior concentrazione sul fondo in seguito alla rimineralizzazione della materia organica. I silicati mostrano questa tendenza anche in altre stagioni evidenziando come le dinamiche verticali che li coinvolgono si manifestino principalmente all'interfaccia acqua-sedimento. Il fosforo è meno presente rispetto al silicio nello strato bentonico. In autunno il raffreddamento superficiale determina la rottura del picnoclino e il rimescolamento verticale, rendendo nuovamente disponibili i nutrienti all'interno della zona eufotica.

Zavatarelli et al.(1997) ha studiato le proprietà geo-biochimiche dell'Adriatico su base stagionale in termini di climatologie. Lo studio di dati storici e l'utilizzo della tecnica

dell’analisi oggettiva hanno portato all’elaborazione di mappe stagionali alla superficie di parametri quali nitrati, fosfati, silicati, clorofilla-a che sono rappresentati nelle figure sottostanti. Le massime portate fluviali e i massimi carichi trofici si riscontrano in primavera e autunno (le stagioni a cui si fa riferimento nelle climatologie dei parametri biochimici, sono quelle definite dal calendario).

La distribuzione dei nitrati alla superficie (fig. 3.1a) in inverno mostra gradiente con concentrazione decrescente da Ovest ad Est e la distribuzione delle isolinee segue lo schema di circolazione con un’intensificazione lungo la costa occidentale. Questo ci permette di affermare che i nitrati vengono principalmente avvettati dalla circolazione baroclina generale (circolazione termoalina e formazione di acque profonde).

I fosfati invece (fig. 1.3b) mostrano una differente distribuzione superficiale, dato che non è visibile alcuno schema di circolazione specifico che li riguardi all’interno del bacino e la loro concentrazione diminuisce allontanandosi sia dalla plume fluviale sia dalla costa occidentale. Questo potrebbe essere un indizio di fosforo limitazione nei processi di produzione primaria.

La distribuzione dei silicati (fig. 1.3c) è di difficile interpretazione; essi diminuiscono in prossimità del delta poi il loro andamento in superficie riflette quello dei nitrati. La silice di origine fluviale prodotta in maggior parte del weathering delle rocce viene rimossa totalmente dalla colonna d’acqua, in prossimità del delta fluviale, da parte di diatomee e radiolari di cui va a costituire lo scheletro ma anche in seguito alla formazione di forti complessi con elementi come Calcio e Magnesio.

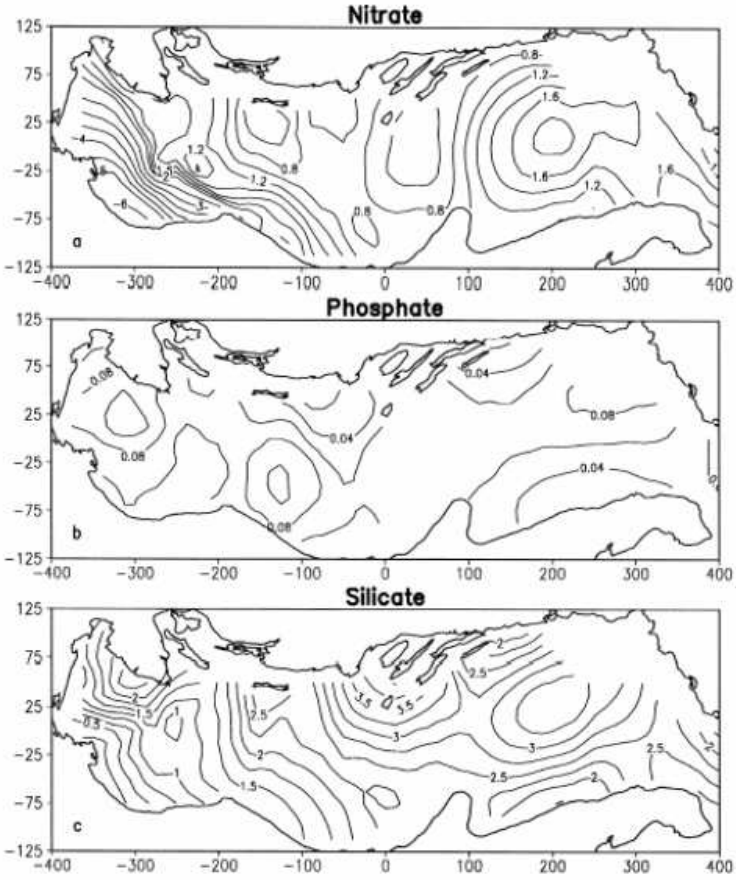


Fig. 1.3 - Mappe di concentrazione dei nutrienti alla superficie in INVERNO, tratte da Zavatarelli et al. (1997). In (a) compaiono i nitrati, in (b) i fosfati, in (c) i silicati.

La presenza di nitrati, ortofosfati e silicati disciolti nello strato superficiale stimola la produzione primaria ad opera del fitoplancton, limitandone allo stesso tempo l'accrescimento. L'assimilazione all'interno del fitoplancton ne diminuisce la concentrazione in superficie; dopo di che i nutrienti possono proseguire il loro percorso all'interno della catena alimentare erbivora o accumularsi negli strati sottosuperficiali in forma di detrito. Qui possono essere rimineralizzati per opera di batteri (catena del detrito) o accumulati nei sedimenti. Fenomeni di stratificazione inibiscono processi di rimescolamento della colonna d'acqua quindi la risalita dei nutrienti in superficie una

volta trasportati sul fondo, favorendo la catena microbica poiché gli essudati escreti dal fitoplancton e dallo zooplancton rimangono maggiormente confinati tra i vari strati e possono essere utilizzati dai batteri eterotrofi. La frazione detritica (materiale particellato biogenico) viene decomposta attraverso l'attività respiratoria di batteri, funghi e protozoi o attraverso processi di denitrificazione in acque carenti di ossigeno disciolto, i quali portano alla chiusura del ciclo rendendo nuovamente disponibili in frazione solubile le sostanze nutritive. La rigenerazione dei nutrienti da parte dei batteri è elevata nel periodo primavera-estate e determina un consumo notevole di ossigeno disciolto in prossimità del fondo.

L'Adriatico viene dunque suddiviso in tre diverse aree trofiche come si vede anche in figura 1.4:

- la costa Nord-Ovest del bacino settentrionale, tra cui la costa Emiliano-Romagnola, soggetta a ricorrenti fioriture microalgali che la classificano come zona eutrofica;
- la parte più interna del bacino settentrionale che presenta condizioni alterne di mesotrofia e oligotrofia;
- Il bacino centrale e quello meridionale che sono principalmente oligotrofici.

Ovviamente questa classificazione può variare in funzione di particolari condizioni idrodinamiche, climatiche e di stress antropico.

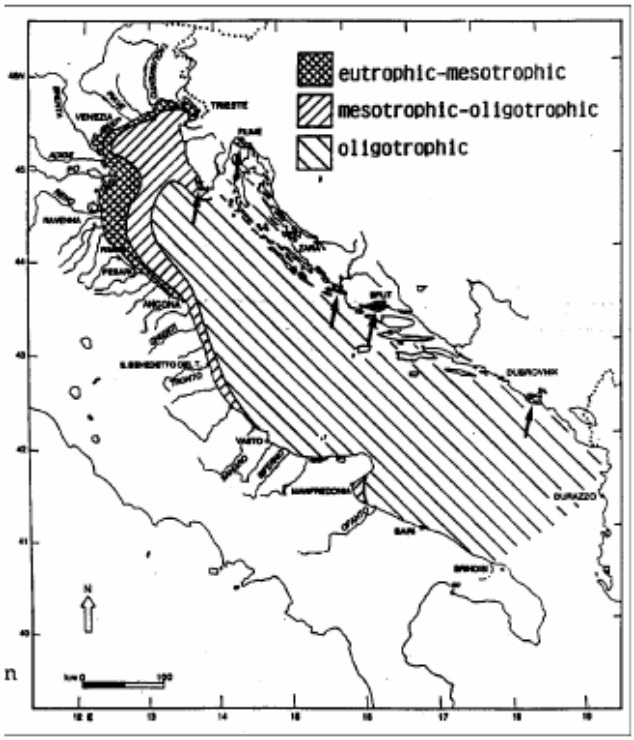


Fig. 1.4 - Condizioni trofiche in Adriatico. [Da Rinaldi e Montanari (1995)]

1.3.1 Produzione primaria e Clorofilla-a

La produzione primaria all'interno di un bacino avviene ad opera del fitoplancton nella zona eufotica attraverso la fotosintesi clorofilliana ed è limitata dalla disponibilità di luce, dalla presenza di nutrienti e di alcuni micronutrienti come ad esempio il ferro.

La stima della produzione primaria viene effettuata attraverso la stima della biomassa vegetale con l'utilizzo di tecniche complesse e dispendiose di conteggio diretto e di stima volumetrica delle cellule fitoplanctoniche. Un calcolo più rapido della produzione primaria si può ottenere dalla determinazione della concentrazione di clorofilla-a, che rappresenta la concentrazione di microalghe ricche di questo pigmento

(e quindi della possibile quantità di produzione primaria), che mostra all'interno della colonna d'acqua una frequenza stagionale, con massimi invernali, una progressiva diminuzione dalla primavera all'estate e una ripresa autunnale.

Esiste una differenziazione nel bacino settentrionale dove nella regione a sud del delta fluviale si osservano massimi di biomassa in autunno e primavera ma con valori tendenzialmente inferiori.

In inverno ed in primavera le concentrazioni di clorofilla sono correlate con le fioriture (blooms) di diatomee e con le elevate quantità di sostanze nutritive apportate dal fiume Po soprattutto nella fascia costiera. Una stima della distribuzione spaziale di questo parametro è stata data da Zavatarelli et al.(1997) per il Nord Adriatico su scala stagionale (soggetta a fenomeni a scala spazio-temporali molto brevi), in cui sono state omesse le aree con profondità inferiori ai 15 m, cioè l'intera fascia costiera, dove si verificano i fenomeni di produttiva più alta (fig. 1.5).

Il massimo di concentrazione rimane in ogni caso evidente in prossimità della costa e va calando allontanandosi progressivamente dal delta seguendo l'andamento stagionale delle correnti, in quanto tracciante semipassivo della circolazione.

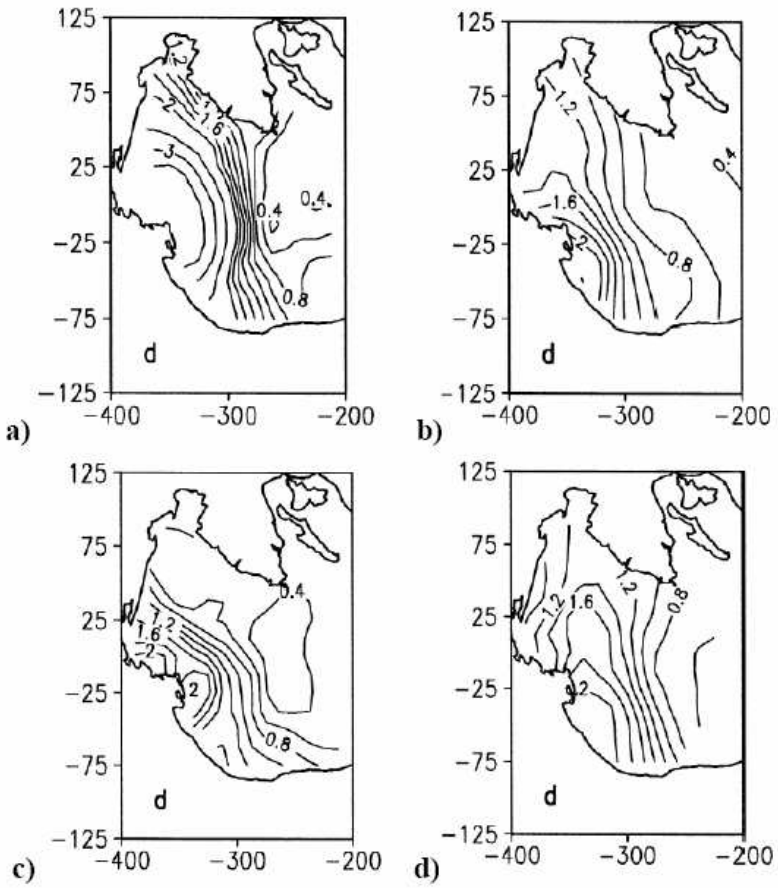


Fig. 1.5 - Mappe di concentrazione di clorofilla alla superficie nelle diverse stagioni per il Nord Adriatico tratte da Zavatarelli et al.(1997). a) distribuzione in INVERNO; b) in PRIMAVERA; c) in ESTATE; d) in AUTUNNO.

1.4 International Long Term Ecological Research (ILTER) Network

In questa tesi verrà studiata una lunga serie temporale di dati. La ricerca sulle serie temporali è una componente essenziale dello studio della variabilità dell'ecosistema terrestre e un programma internazionale, chiamato **I**nternational **L**ong **T**erm **E**cological **R**esearch (ILTER) Network, ne coordina le attività a livello globale. ILTER è stato fondato nel 1993 a seguito di un incontro internazionale riguardante le ricerche ecologiche a lungo termine, avvenuto negli Stati Uniti. In questa occasione i partecipanti decisero di formare una rete di ricerca scientifica che collaborasse per esprimere la multi - interdisciplinarità delle ricerche e dei monitoraggi ecologici (incluse le dimensioni umane) su lungo termine temporale e larga scala spaziale e si assunsero la responsabilità di sviluppare programmi mondiali e infrastrutture necessarie a facilitare la comunicazione e la distribuzione dei dati raccolti.

L'interesse scientifico globale sui programmi di ricerca ecologica di questo tipo, si è espanso rapidamente, riflettendo un crescente apprezzamento per l'importanza che questo studio ricopre, nella valutazione e risoluzione di complessi problemi ambientali.

ILTER Network nasce con la visione di una società dove contributi scientifici consentano di promuovere la salute, la produttività e la sostenibilità dell'ambiente globale, il quale per contro, sostiene la salute, la prosperità, il benessere e la sicurezza dell'uomo. Il suo impegno è di sviluppare e trasmettere efficacemente alla comunità scientifica, al mondo politico e alla comunità cittadina, informazioni scientifiche e previsioni su di esse, dedotte dalla comprensione di processi ecologici, attraverso l'analisi di serie temporali a lungo termine ed a larga scala spaziale, necessaria per

meglio comprendere, conservare, proteggere e gestire gli ecosistemi con la loro biodiversità e i servizi che forniscono, su scala locali, regionali e globali.

Gli obiettivi principali di ILTER Network sono:

- Fornire il miglior supporto possibile alla comunità scientifica ed alla società civile nelle decisioni di creare banche dati ben progettate e ben documentate, tali da poter essere utilizzate per lo scambio e la condivisione dei dati, in modo da poter meglio rispondere ai quesiti ambientali locali e globali;
- Creare conoscenza pubblica, ricerche interdisciplinari, relazioni informative e sviluppare teorie che incontrino le necessità sociali, attraverso studi su serie temporali a lungo termine e a larga scala spaziale;
- Fornire un'eredità accessibile di osservazioni ed esperimenti a lungo termine, ben progettati e documentati, archivi di campioni e campionamenti che possano essere utilizzati nella determinazione dei cambiamenti ecologici futuri;
- Promuovere la formazione, l'istruzione e l'insegnamento circa i cambiamenti dei maggiori ecosistemi terrestri generati a lungo termine e a larga scala spaziale, e educare una nuova generazione di scienziati;
- Impegnare e informare in maniera più vasta possibile la comunità scientifica, i politici e i comunità pubblica, rispetto la necessità di comprendere profondamente i complessi cambiamenti ambientali, in modo da potersi indirizzare verso una via d'azione comune;
- Sviluppare e facilitare le collaborazioni e il coordinamento tra i soggetti coinvolti nella rete di ricerca ecologica.

Molti paesi si occupano di ricerca ecologica di siti terrestri, ma esiste un progetto mondiale che riguarda la rete di ILTER relativa ai siti marini che al momento non gode di nessuna ufficialità.

Le banche dati dei siti marini, di cui fa parte anche quella della struttura oceanografica Daphne, sono più complesse da organizzare e costruire dato che il campionamento marino è sicuramente più costoso e decisamente più condizionato dalla stagionalità e dalle condizioni atmosferiche in genere, rispetto quello terrestre.

I dati di serie temporali a lungo esistenti risultano dunque essere una rara e preziosa risorsa per investigare l'ambiente marino.

1.5 Obiettivi della Tesi

L’obiettivo di questo studio è la caratterizzazione dell’ecosistema marino, in una stazione costiera al largo di Cesenatico, dove dati sono stati raccolti per due periodi diversi, il 1979-1980 e 1987-1988 a cadenza giornaliera. Questi dati forniscono una diagnostica dell’ecosistema marino unica per l’alta risoluzione temporale e la multidisciplinarietà delle misure. Lo studio si effettuerà attraverso:

1) L’analisi delle serie di variabili multiparametriche e loro controllo di qualità;
2) Il calcolo e analisi delle correlazioni tra variabili dell’ecosistema e parametri fisico-ambientali;
3) il calcolo e analisi degli spettri di frequenza delle serie più importanti.

Capitolo 2 - Serie temporali a disposizione

1.2 Campionamenti

I dati analizzati provengono dalla banca dati della Struttura Oceanografica Daphne, e fanno parte del programma di monitoraggio delle acque marine costiere dell'Emilia Romagna, nato per analizzare l'evoluzione temporale dei processi di eutrofizzazione che riguardano l'Adriatico a sud del delta del Po.

Il monitoraggio di ruotine, finalizzato a caratterizzare le acque fino a 20 Km dalla costa, si effettua su una griglia di circa 40 stazioni fisse, controllate fin dal 1979 con frequenza settimanale durante l'arco dell'anno (cf., e.g., Rinaldi e Montanari, 1982-1989; Vollenweider et al.;1992). Il monitoraggio ricopre tutte le stazioni prestabilite in due giorni successivi, un giorno la motonave Daphne si muove a Nord di Cesenatico, il giorno successivo in direzione Sud.

In modo da ottenere una migliore percezione della variabilità a breve termine di alcuni parametri essenziali e fattori pensati come produttori di fenomeni di eutrofizzazione, è stato effettuato un ulteriore programma di campionamento, con frequenza giornaliera, su una stazione fissa in due diversi periodi: tra Giugno 1979 e Dicembre 1980 (Serie 79-80), e tra Giugno 1987 e Ottobre 1988 (Serie 87-88).

La scelta della stazione per il campionamento giornaliero fu dettata dalle seguenti considerazioni:

- ad una distanza adeguata dal porto di Cesenatico tale da non essere influenzata direttamente dalle acque di uscita del porto stesso, e nello stesso

tempo in una zona interessata dai fenomeni eutrofici (si tenga presente sempre che i dati analizzati appartengo al piano di monitoraggio legati ai problemi di eutrofizzazione che affliggono il Nord Adriatico);

- la profondità battimetrica consente il manifestarsi della normale stratificazione che si sviluppa durante periodi di condizioni meteo marine stabili;
- è facilmente campionabile, perché facilmente raggiungibile e vicina alla sede di attracco abituale del battello Daphne;
- la possibilità di poter effettuare confronti tra i dati acquisiti e quelli già a disposizione in quanto la stazione 314 è stata sistematicamente analizzata e controllata fin dal 1977;

La stazione fissa, situata a 3 km al largo di Cesenatico (Stazione 314, con il numero 14 viene segnalato Cesenatico e 3 rappresenta la distanza dalla costa in km; fig. 2.1) presenta tutti i criteri sopra citati. La batimetria è di circa 8.5 m, ha coordinate geografiche 44°13'14'' di Lat. Nord e 12°26'11'' di Long. Est e può essere raggiunta in una mezz'ora. Per tanto i campioni possono essere raccolti e analizzati lo stesso giorno.

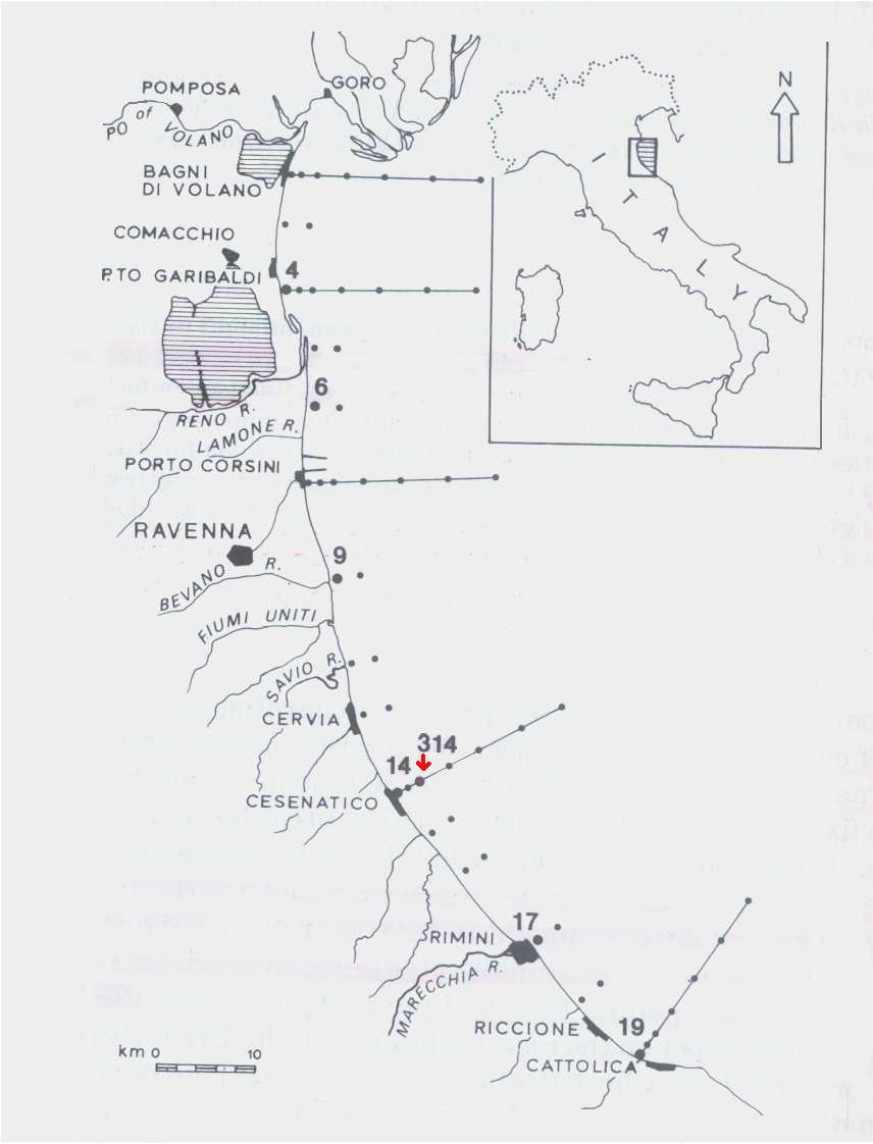


Fig. 2.1 - Locazione della stazione fissa per il monitoraggio giornaliero e dei transetti per il monitoraggio di routine della Daphne

2.2 Analisi preliminare dei dati

I campioni sono stati raccolti a 0.5 m sotto la superficie e 0.5 m sopra il fondo. I parametri analizzati si dividono in due categorie, quelli da sonda (pH, temperatura, salinità, densità, ossigeno disciolto, viene inoltre misurata la trasparenza mediante Disco Secchi) e quelli così detti da bottiglia (sali nutritivi: nitrati, nitriti e ammonio, ortofosfati e fosforo totale, Silice i cui valori sono presenti solo nella Serie temporale 79-80 e clorofilla).

I dati sono stati archiviati su foglio elettronico (Excel).

La Serie 79-80 presentava le dimensioni di una matrice formata da 23 colonne e 680 righe, di cui 358 riferite alla superficie e 321 al fondo; la matrice della 87-88 presentava 19 colonne e 301 righe riferite alla superficie e 16 colonne e 301 righe al fondo.

In primo luogo, dalla matrice sono stati tolti gli zeri per lasciare spazi vuoti nei punti in cui non erano presenti dati. Questo fa si che i calcoli non vengano falsati dalla presenza di dati non reali, “zero” infatti è un valore numerico mentre lo spazio vuoto consente al calcolatore di passare al valore successivo considerando l’assenza del dato semplicemente come un “buco” nella matrice.

Si è deciso utilizzare la serie più completa di dati per cui l’analisi è stata limitata ai soli dati di superficie.

Quindi sono stati considerati solo alcuni parametri: Temperature, Salinità, Ossigeno disciolto, nutrienti (Nitrati, Nitriti, Ammonio, Ortofosfati, Fosfato totale e Silicio), Clorofilla-*a*, come riportato in tab. 1. Queste variabili sono sufficienti e in larga parte necessari a determinare un quadro dei fenomeni naturali o indotti da interventi esterni.

VARIABILI	Unità di misura (ed errore di riproducibilità)
Temperatura	**℃ (± 0,05)**
Salinità	**Psu**
pH	**adimensionale (± 0,01)**
Ossigeno	**µM (± 1%)**
Clorofilla-*a*	**µM**
Nitrati	**µM**
Nitriti	**µM**
Ammonio	**µM**
Ortofosfati	**µM**
Fosforo totale	**µM**
Silicio	**µM**

Tab. 1 – Variabili considerate, unità di misura ed errore di riproducibilità relativo

La tab. 2 mostra la distribuzione temporale dei dati a disposizione, con l'aggiunta di parametri meteorologici presi dall'European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) (Temperatura e Pressione Atmosferica, Velocità del vento) e delle portate del Po relativi tutti allo stesso periodo di tempo.

	LUNGHEZZA SERIE TEMPORALI																																			
	1979							1980												1987							1988										
	G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D	G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O
Temperatura																																				
pH																																				
Salinità																																				
Ossigeno disciolto																																				
Ammonio																																				
Nitrati																																				
Nitriti																																				
Ortofosfati																																				
Fosforo totale																																				
Silice																																				
Clorofilla-a																																				
Portate del Po																																				
Temp. atm.																																				
Pressione atm.																																				
Venti																																				

Tab. 2 – Distribuzione dei dati nelle serie temporali originali

Come si può vedere alcuni dei parametri (nutrienti e clorofilla-*a* per il 1979-1980) presentavano valori soltanto nel periodo tra Giugno 1979 e Giugno 1980. Per questa ragione entrambe le Serie temporali sono state prese in considerazione soltanto per i 13 mesi che va appunto da Giugno (1979 in un caso e 1987 nell'altro) a Giugno dell'anno successivo (1980 e 1988).

Prima di procedere all'analisi sul database descritto in tab. 3 è stato effettuato un quality check, suddiviso in tre fasi, per definire l'attendibilità dei dati.

	LUNGHEZZA SERIE TEMPORALI																									
	1979							1980						N°OSS.	1987							1988						N°OSS.
	G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G		G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G	
Temperatura														172														223
pH														252														223
Salinità														251														223
Ossigeno disciolto														253														223
Ammonio														210														211
Nitrati														210														221
Nitriti														209														213
Ortofosfati														209														195
Fosforo totale														207														222
Silice														209														
Clorofilla-a														210														223
Portate del Po																												
Temp. atm.																												
Pressione atm.																												
Venti																												
														2.392														**2.177**

Tab. 3 – Distribuzione delle serie temporali dopo l'analisi preliminare dei dati.

Capitolo 3 – Metodologie di analisi

3.1 Controllo di qualità dei dati

L'analisi di qualità dei dati (QC) è stata eseguita sui dati riporatati in tab. 3.

L'analisi si è svolta in tre fasi. La prima, quella più intuitiva, detta anche analisi a vista, è stata effettuata osservando i grafici fatti sui dati giornalieri delle serie temporali. Qualora ci siano massimi o minimi ritenuti anomali (relativamente all'esperienza dell'osservatore), viene verificato che il dato sia attendibile (es. se viene verificato una valore di 42 psu nella salinità, il dato verrà automaticamente eliminato) e in caso contrario si prosegue l'osservazione. Questo esame, preliminare ed altamente soggettivo, non ha dato luogo ad una scrematura del dataset di partenza.

La seconda fase del QC è consistita in un gross check: basandosi su dati climatologici (Simoncelli et al.) riferiti alla stazione in esame, si è proceduto all'individuazione di intervalli di valori e quindi all'eliminazione di tutti i dati che non rientravano in detti intervalli.

Questo tipo di controllo è stato effettuato solo su un sottoinsieme di variabili di cui si avevano a disposizione serie climatologiche (tab. 4).

	Val. Max	*Val. Min*
Temperatura (℃)	28	4
pH	9	7,5
Salinità (psu)	38	15
O.D. (ppm)	16	5
NO_3 (µM)	120	≈ 0
PO_4 (µM)	2	≈ 0

Tab. 4 – Range di valori utilizzati nel gross check per Temperatura, pH, Salinità, Ossigeno disciolto, nitrati, ortofosfati e Clorofilla-*a*.

L’ultima fase del controllo dei dati, è stata fatta applicando il metodo statistico della deviazione standard.

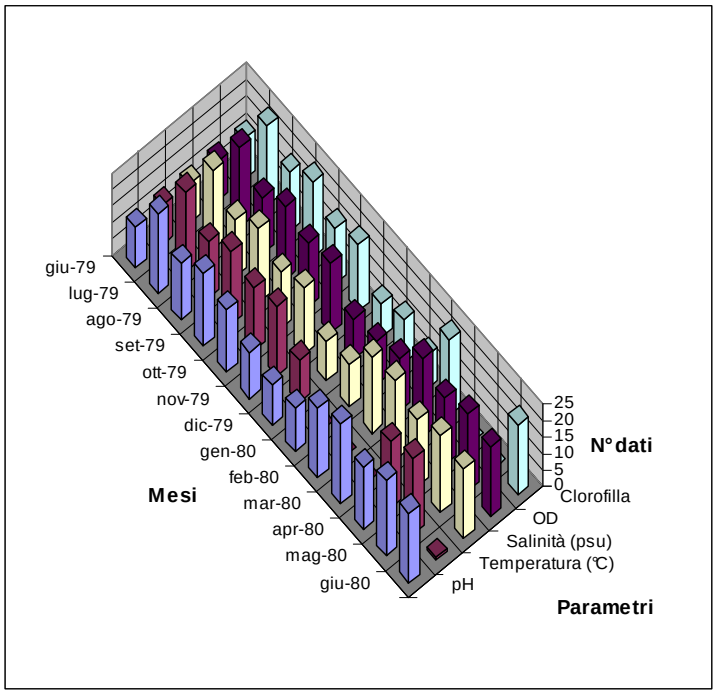
Dopo aver calcolato la media mensile di tutti i parametri considerati e la relativa deviazione standard, si è proceduto all’eliminazione dei dati che non rientravano nell’intervallo media ± 3 deviazioni standard. Questo controllo è stato ripetuto due volte e il dataset al netto del QC è riportato in tab 5.

	LUNGHEZZA SERIE TEMPORALI																									
	1979							**1980**						**N°OSS.**	**1987**							**1988**						**N°OSS.**
	G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G		G	L	A	S	O	N	D	G	F	M	A	M	G	
Temperatura														172														214
pH														241														220
Salinità														248														217
Ossigeno disciolto														244														212
Ammonio														196														199
Nitrati														201														205
Nitriti														209														201
Ortofosfati														189														184
Fosforo totale														194														218
Silice														209														
Clorofilla														191														203
Portate del Po																												
Temp. atm.																												
Pressione atm.																												
Venti																												
														2.294														**2.073**

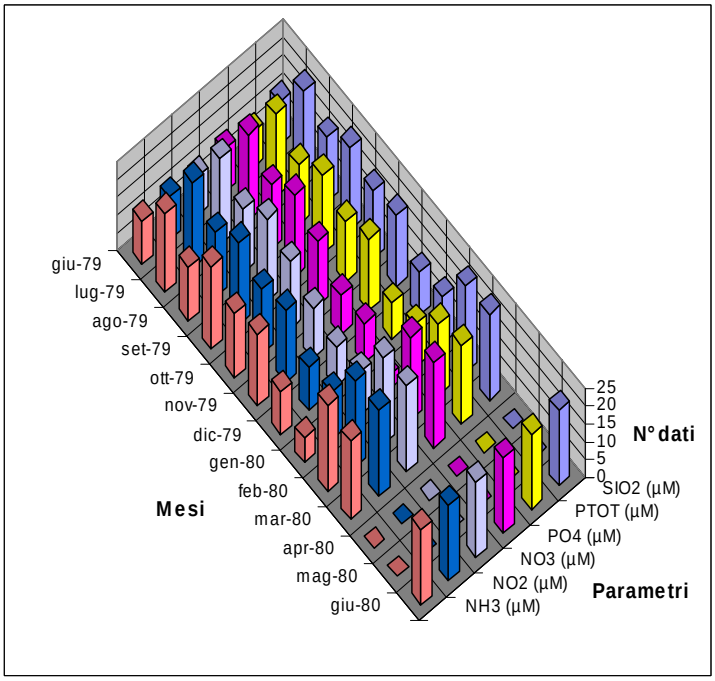
Tab. 5 – Struttura del database definitivo dopo aver effettuato il controllo di qualità dei dati, con il numero delle osservazioni per serie temporale

Le figure 3.1 e 3.2 illustrano come i dati sono distribuiti nei diversi mesi di campionamento.

Gli istogrammi relativi alle distribuzioni di frequenza dei principali parametri esaminati sono descritti nelle figure 3.3, 3.4 e 3.5.

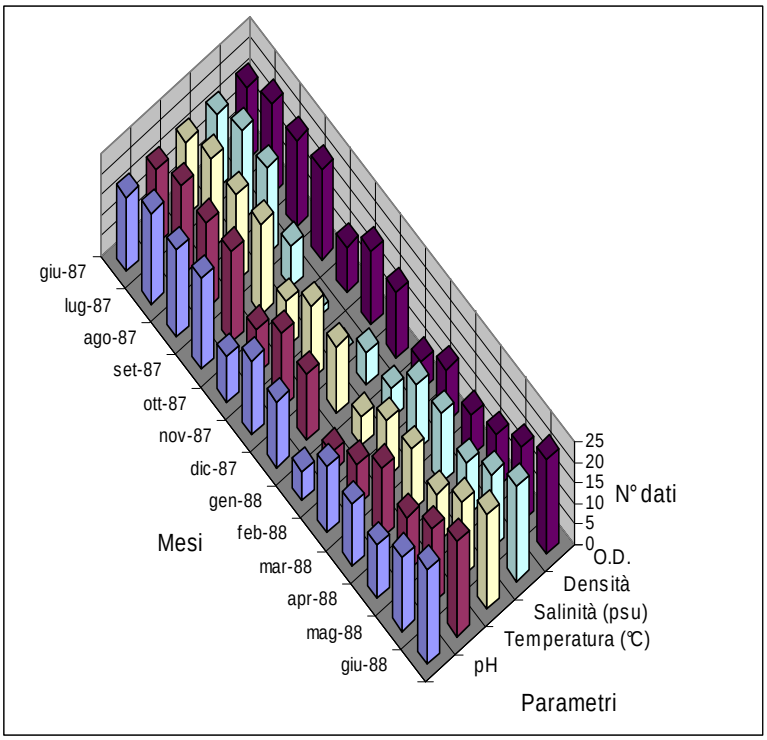


a)

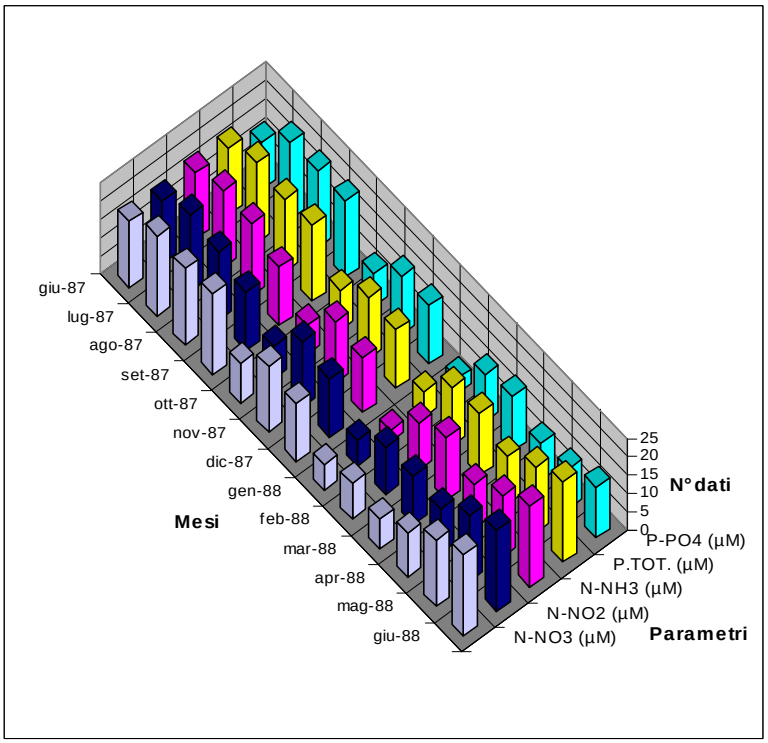


b)

Fig. 3.1 – Distribuzione mensile dei dati della serie temporale 79-80; a) pH, Temperatura, Salinità, O.D. e Clorofilla; b) nutrienti: nitrati, nitriti, ammonio, ortofosfati, fosforo totale e silice.

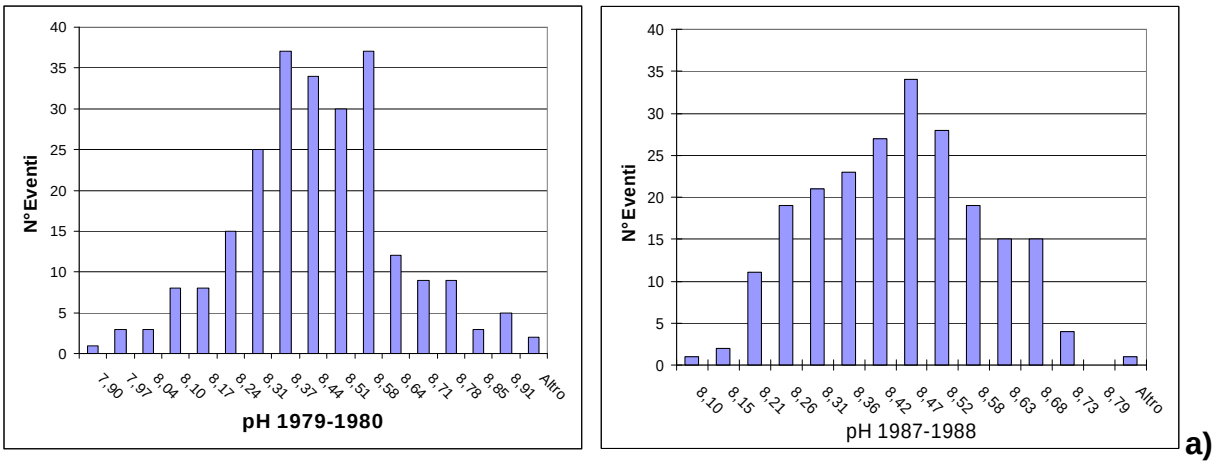


a)

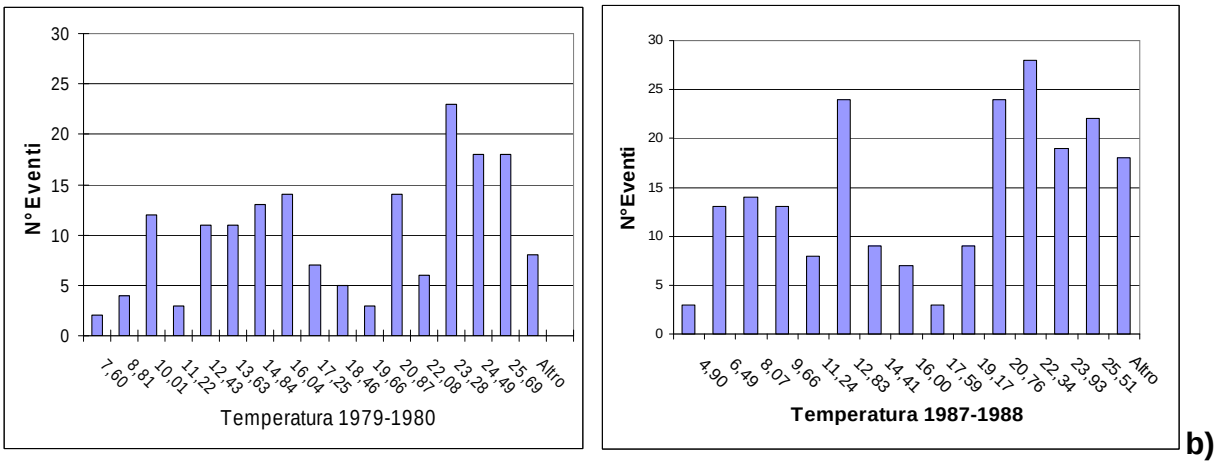


b)

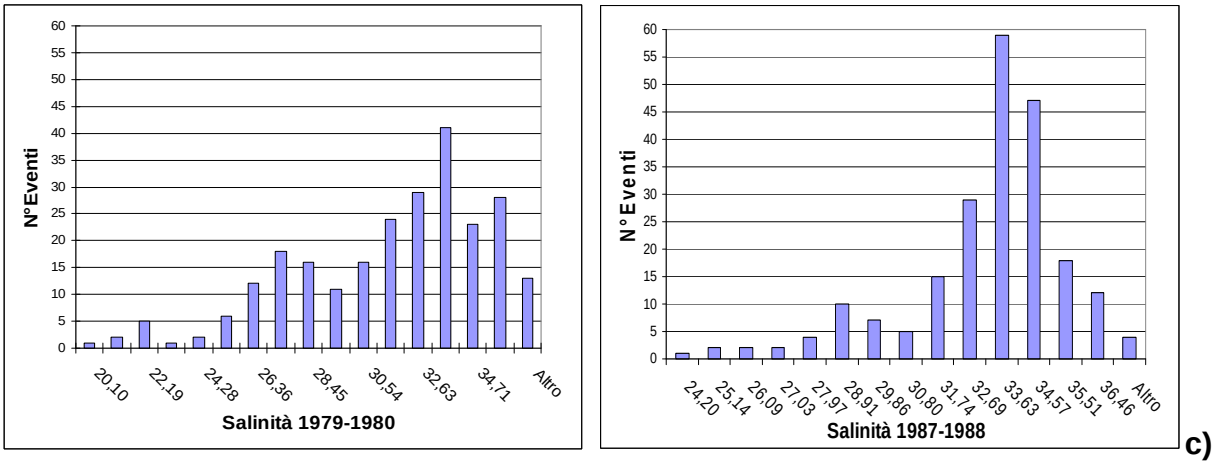
Fig. 3.2 – Distribuzione mensile dei dati della serie temporale 87-88; a) pH, Temperatura, Salinità, O.D. e Clorofilla; b) nutrienti: nitrati, nitriti, ammonio, ortofosfati e fosforo totale.



a)

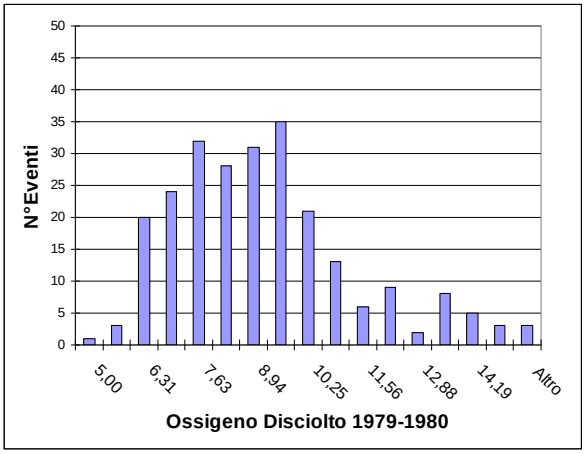


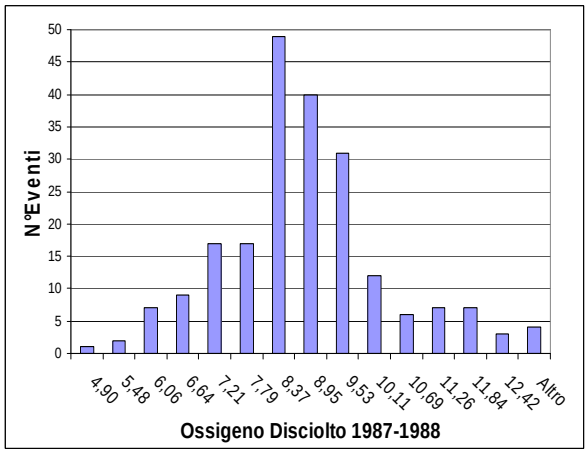
b)



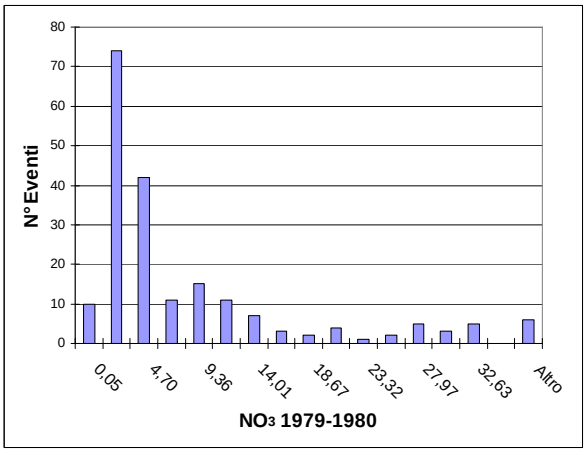
c)

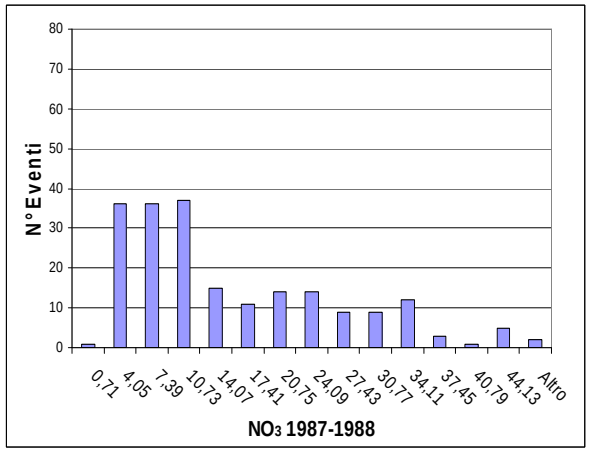
Fig. 3.3 – Distribuzione di densità dei valori: a sinistra la serie temporale 79-80 e a destra la serie temporale 87-88; a) pH; b) Temperatura; c) Salinità.



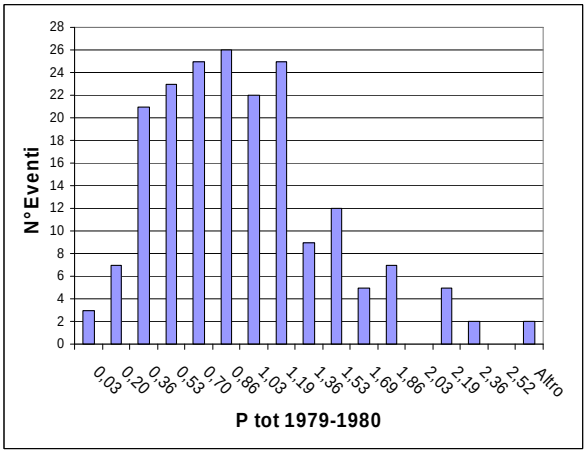


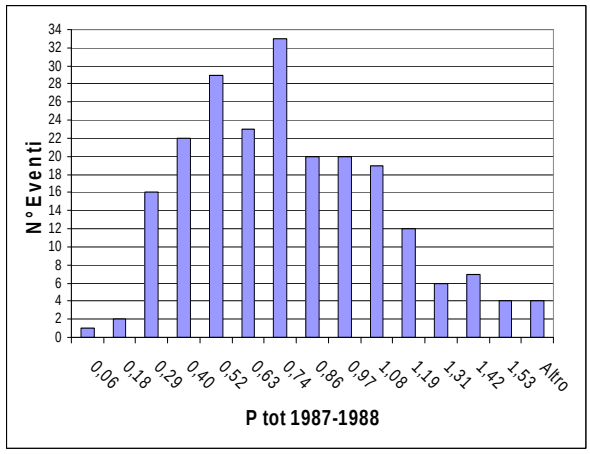
a)





b)





c)

Fig. 3.4 – Distribuzione di densità dei valori: a) Ossigeno disciolto; b) Nitrati; c) Fosforo totale.

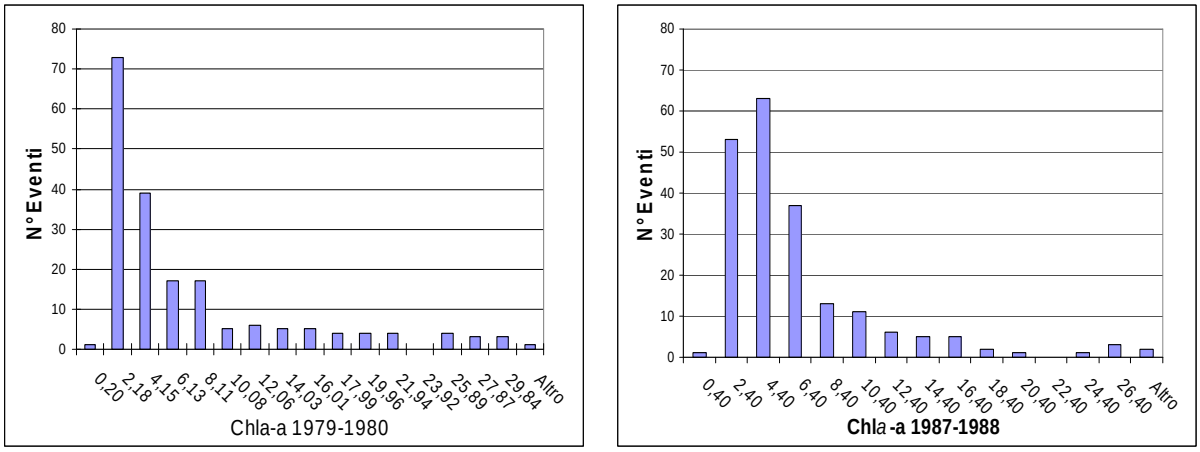


Fig. 3.5 - Distribuzione di densità dei valori: Clorofilla-*a*.

La tabella 6 mostra media, mediana e deviazione standard delle serie temporali considerate.

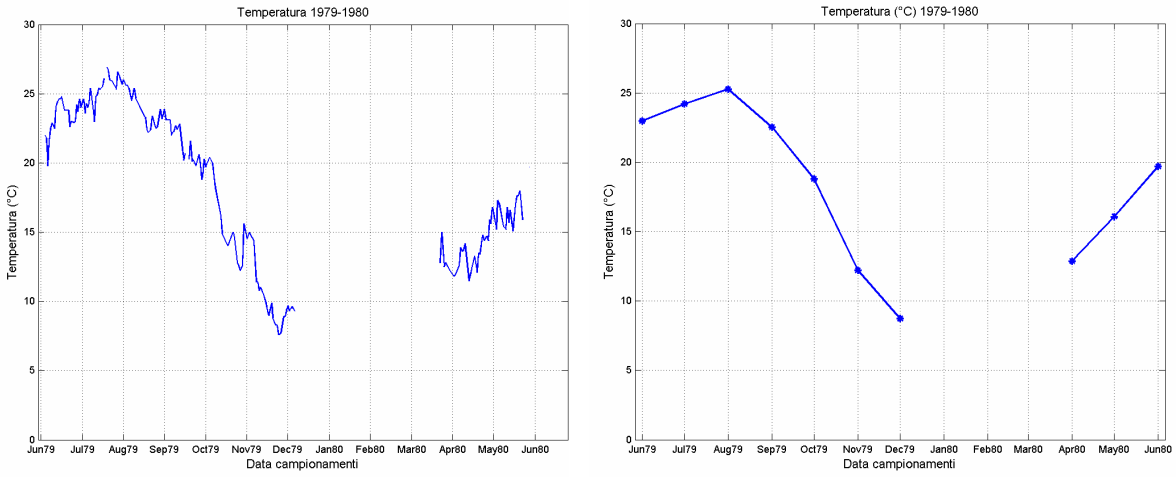
	1979-1980				1987-1988		
	Media	**Mediana**	**Dev St**		**Media**	**Mediana**	**Dev St**
pH	8,42	8,42	0,2		8,42	8,42	0,14
Temp. Acqua (°C)	18,35	19,70	5,58		17,17	19,35	6,72
Salinità (psu)	31,11	31,95	3,65		32,71	33,30	2,34
O.D.	8,83	8,60	2,15		8,52	8,50	1,48
Clorofilla "a" (mg/mc)	6,33	3,14	7,26		5,42	3,70	5,15
Nitrati (µM)	7,08	3,04	9,38		14,28	10,35	11,06
Nitriti (µM)	0,94	0,62	0,80		0,69	0,64	0,44
Ammonio (µM)	1,86	1,65	1,36		1,42	1,36	1,05
Ortofosfati (µM)	0,15	0,08	0,17		0,21	0,16	0,12
Fosforo Totale (µM)	0,88	0,82	0,52		0,73	0,68	0,34
Silicio (µM)	12,00	5,87	14,89				
Temp. Atm. (°C)	15,36	15,11	5,91		17,05	18,22	6,68
Pressione Atm (mbar)	1015,18	1015,00	6,63		1013,68	1014,00	5,45
Venti (m/s)	2,59	2,50	1,20		2,44	2,38	1,28
Protate del Po (mc/s)	1541,66	1315,00	930,84		1668,85	1515,00	800,30

Tab. 6 – Medie, Mediane e Deviazioni Standard calcolate per tutte le serie temporali considerate e confrontate.

3.2 Descrizione delle variabili principali

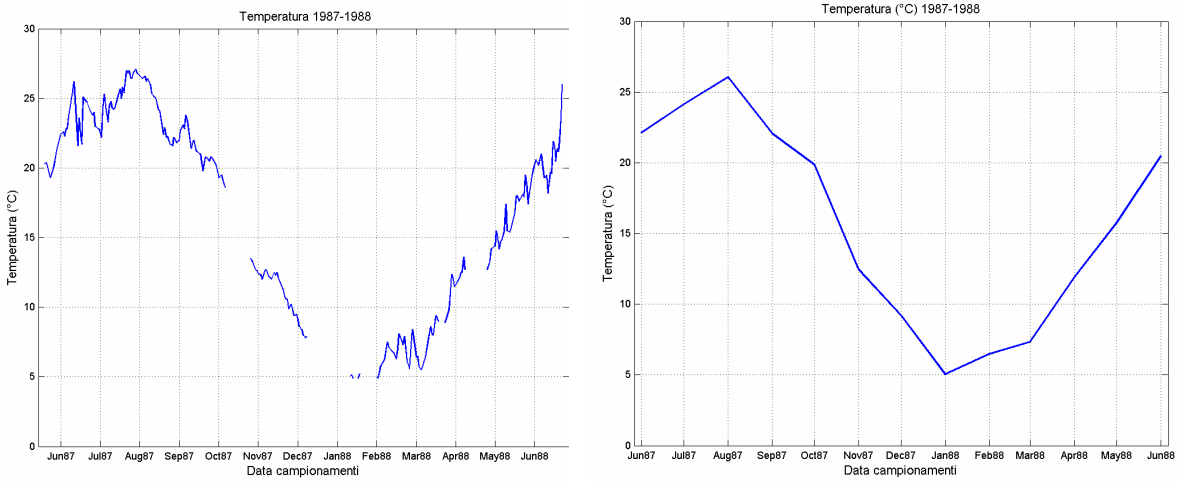
3.2.1 Temperatura

In figure 3.6 e 3.7 sono mostrati i valori di temperatura, sia dei campionamenti giornalieri (a) che mediati mensilmente (b), relativi alle due serie temporali.



a) **b)**

Fig. 3.6 – Temperatura: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) **b)**

Fig. 3.7 – Temperatura: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

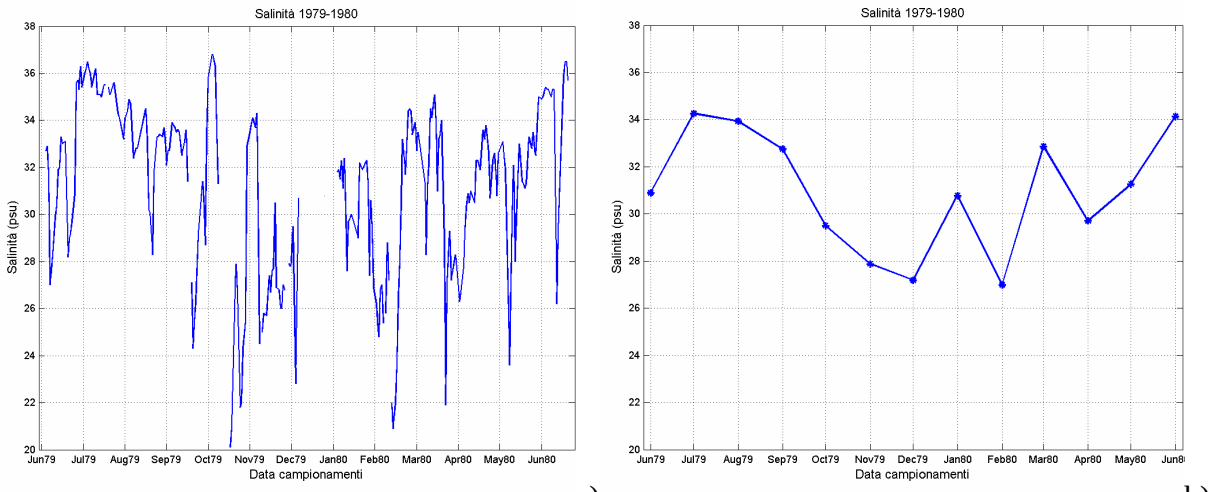
I valori medi annuali (tab. 6) sono rispettivamente 18,40 ℃ per la serie 79-80 e 17,20 ℃ per la serie 87-88; i massimi e i minimi s ono rispettivamente di 26,90 ℃ e 7,60 ℃ e 27,10 ℃ e 4,90 ℃. La differenza nei valori dei minimi è giustificabile dal fatto che nella serie 79-80 mancano di dati nel periodo più freddo (gennaio-marzo).

Il QC ha evidenziato in questa serie temporale una serie di eventi “anomali” che ci sembra importante sottolineare, visto che tutti i valori eliminati appartengono allo stesso periodo (febbraio 1988); in quel periodo sono state riscontrante temperature molto basse, che non rientravano negli intervalli stabiliti dal QC.

3.2.2 Salinità

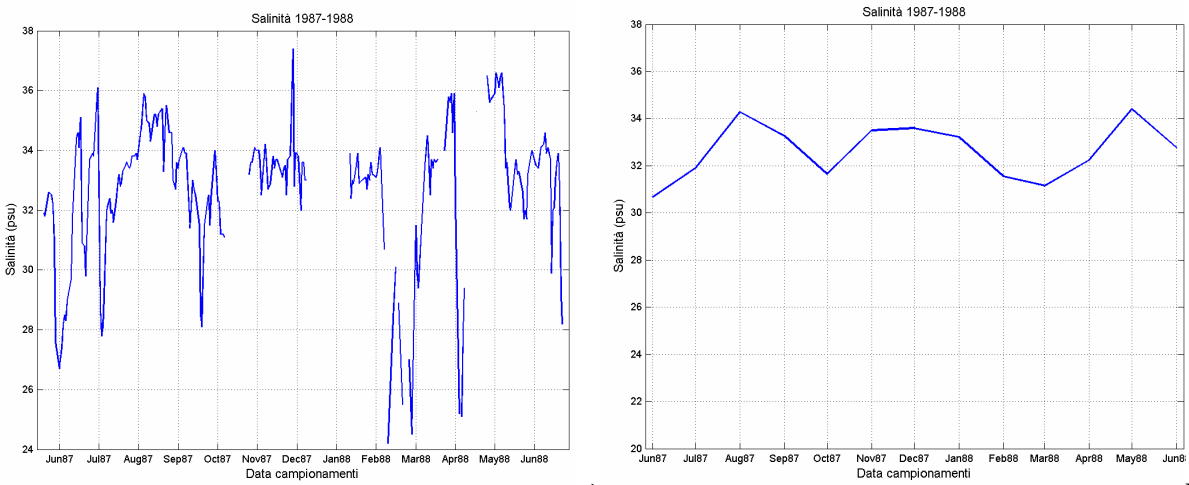
Le figure 3.8 e 3.9 mostrano i valori di salinità relativi alle due serie, sia mediati mensilmente (b) che dei campionamenti giornalieri (a).

Il valore medio annuale (tab. 6) per la serie 79-80 è 31,1 psu; il massimo di 36,8 psu ed il minimo di 20,1 psu; per la serie 87-88 la media è 32,7 psu, il valore massimo di 37,4 psu e il minimo di 24,2 psu.



a) b)

Fig. 3.8 – Salinità: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) b)

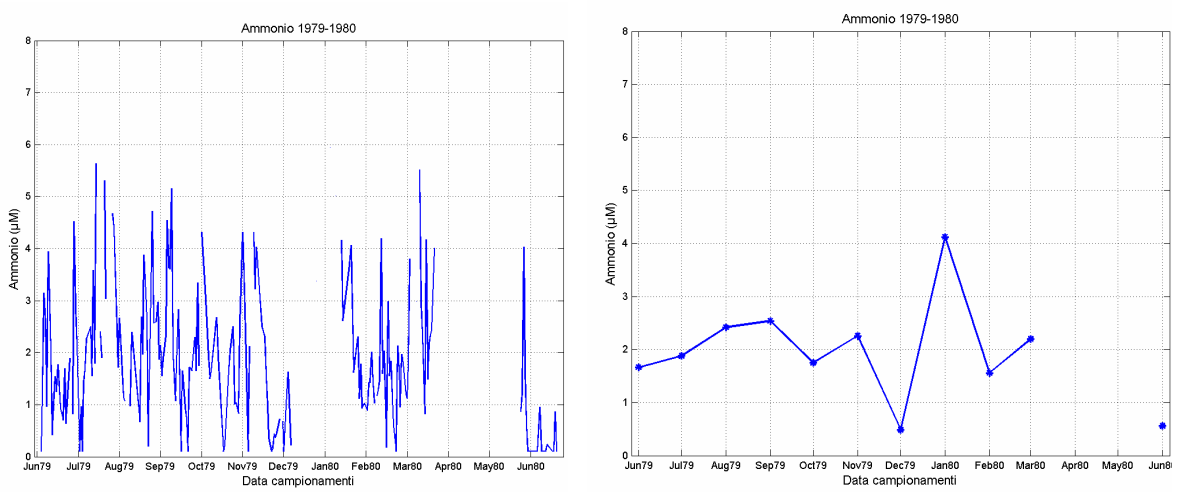
Fig. 3.9 – Salinità: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

Il periodo di minore variabilità della salinità è stato registrato tra luglio e agosto in entrambe le serie, infatti, è durante la stagione estiva che si registrano minimi nelle portate del Po e condizioni meteo marine stabili.

3.2.3 Ammonio

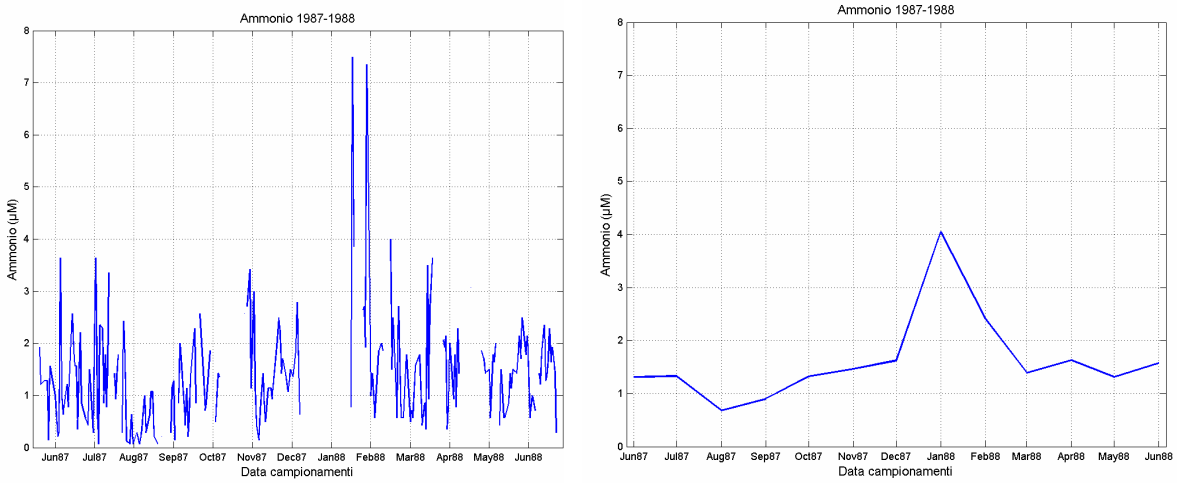
Le figure 3.10 e 3.11 mostrano i valori di ammonio relativi alle due serie, mediati mensilmente (b) e giornalieri (a).

Le medie annuali (tab. 6) di ammonio sono 1.86 µM per la serie temporale 79-80 e 1.42 µM per la serie temporale 87-88 e i valori oscillano tra 0.10 µM e 5.94 µM nella serie 79-80 e tra 0.10 µM e 7.40 µM.



a) **b)**

Fig. 3.10 – Ammonio: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) **b)**

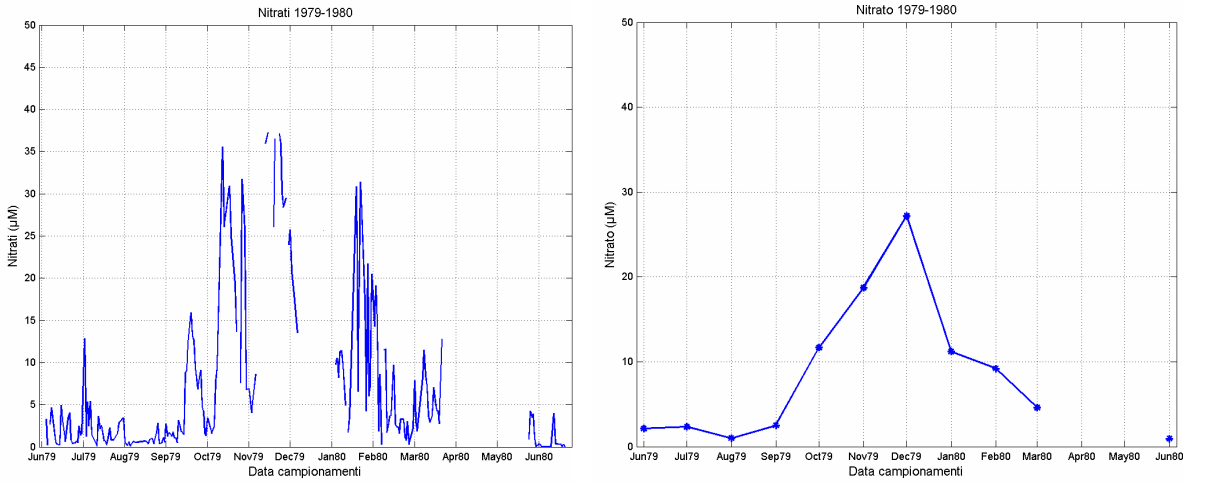
Fig. 3.11 – Ammonio: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

Questa serie temporale nel 79-80, presenta due periodi di crescita, uno estivo (luglio- agosto), e uno invernale (gennaio). Mentre nella serie temporale 87-88 è presente un unico massimo in inverno (gennaio) mentre nel periodo estivo (luglio-agosto) ritroviamo un minimo.

3.2.4 Nitrato

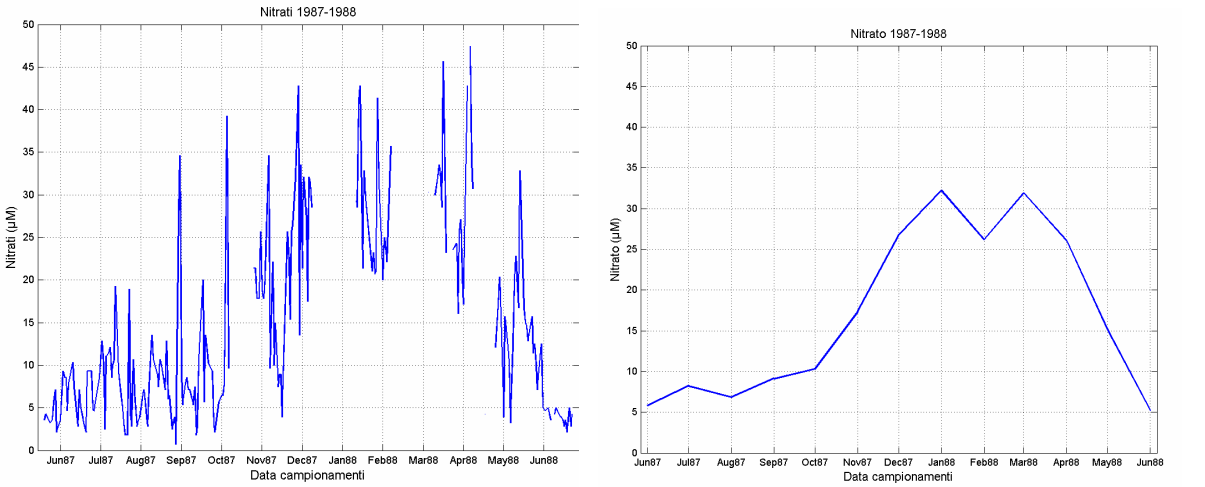
Le figure 3.12 e 3.13 mostrano i valori dei nitrati relativi alle due serie, giornalieri (a) mediati mensilmente (b).

I valori medi annuali (tab. 6) dei nitrati oscillano tra 7.80 µM (serie temporale 79-80) e 14.28 µM (serie temporale 87-88). I valori massimo e minimo della serie temporale 79-80 sono 37.28 µM e 0.05 µM, mentre quelli per la serie temporale 87-88 sono 42.80 µM e 0.70 µM.



a) **b)**

Fig. 3.12 – Nitrato: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) **b)**

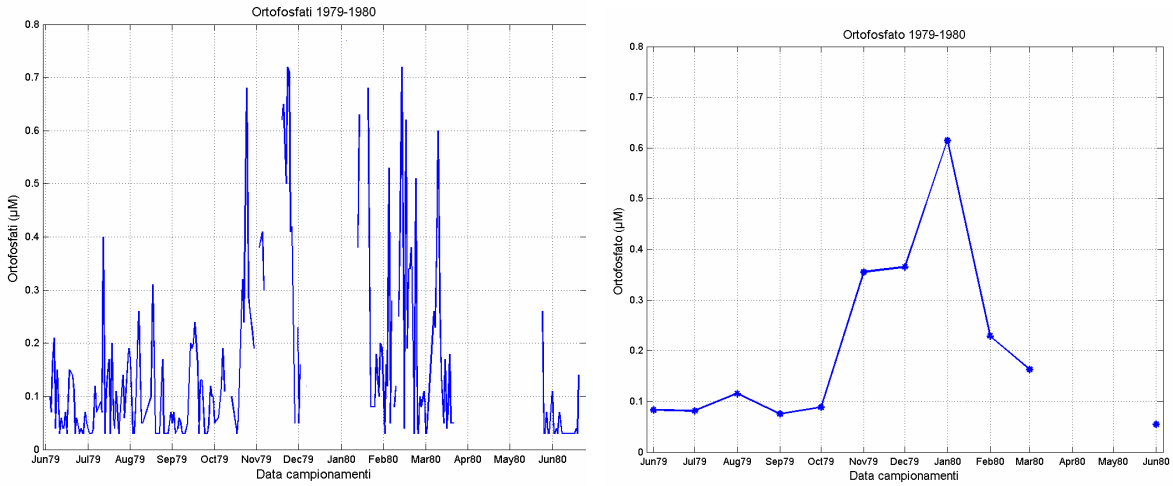
Fig. 3.13 – Nitrato: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

3.2.5 Ortofosfati

Le figure 3.14 e 3.15 mostrano i valori di ortofosfati relativi alle due serie, giornalieri (a) e mediati mensilmente (b).

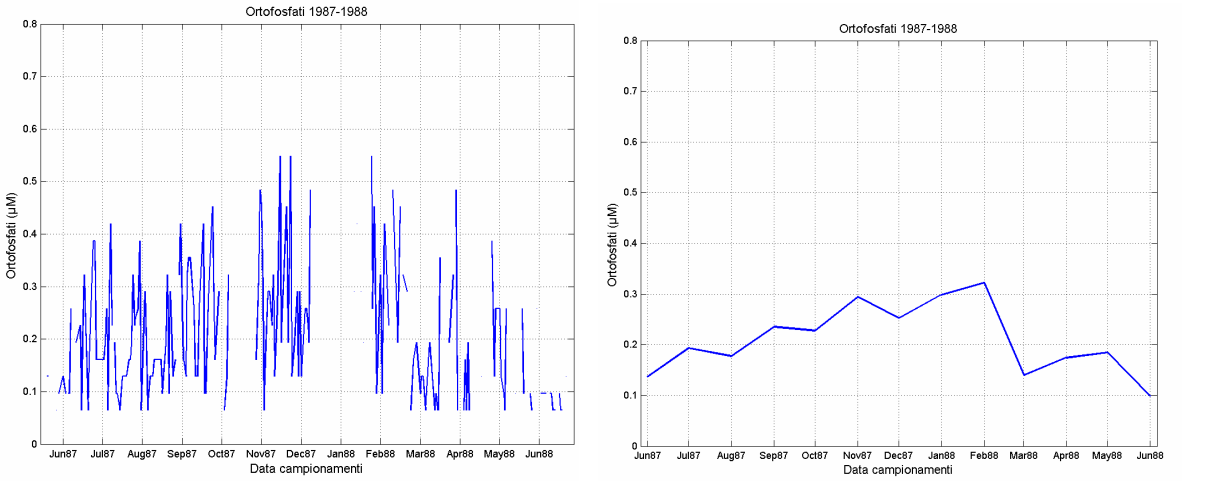
La media annuali (tab. 6) è pari a 0.15 µM per la serie temporale 79-80 e di 0.21 µM per la serie temporale 87-88.

I valori di ortofosfati della serie temporale 79-80, oscillano tra 0.72 µM (massimo) e 0.03 µM (minimo); quelli della serie temporale 87-88 tra 0.50 µM (massimo) e 0.10 µM (minimo).



a) **b)**

Fig. 3.14 – Ortofosfato: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



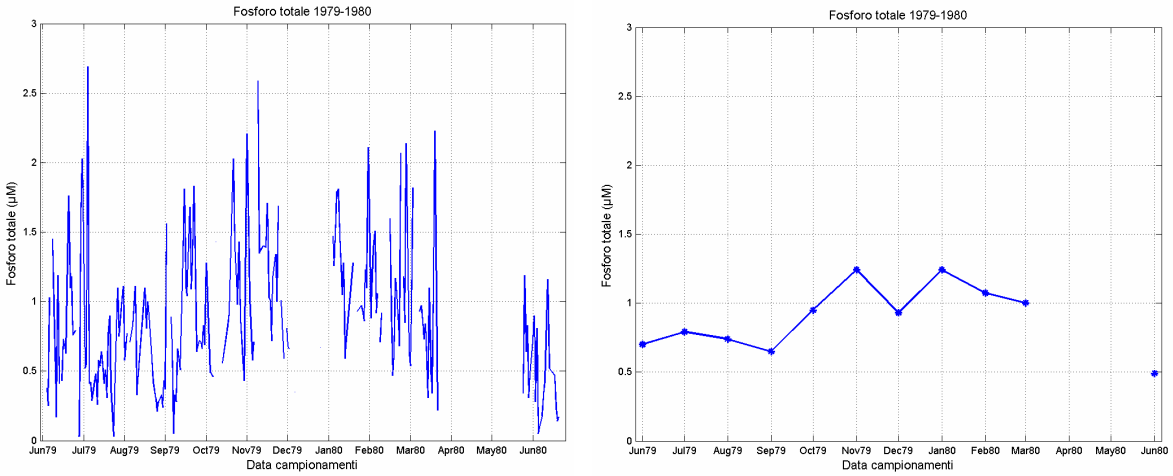
a) **b)**

Fig. 3.15 – Ortofosfato: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

3.2.6 Fosforo totale

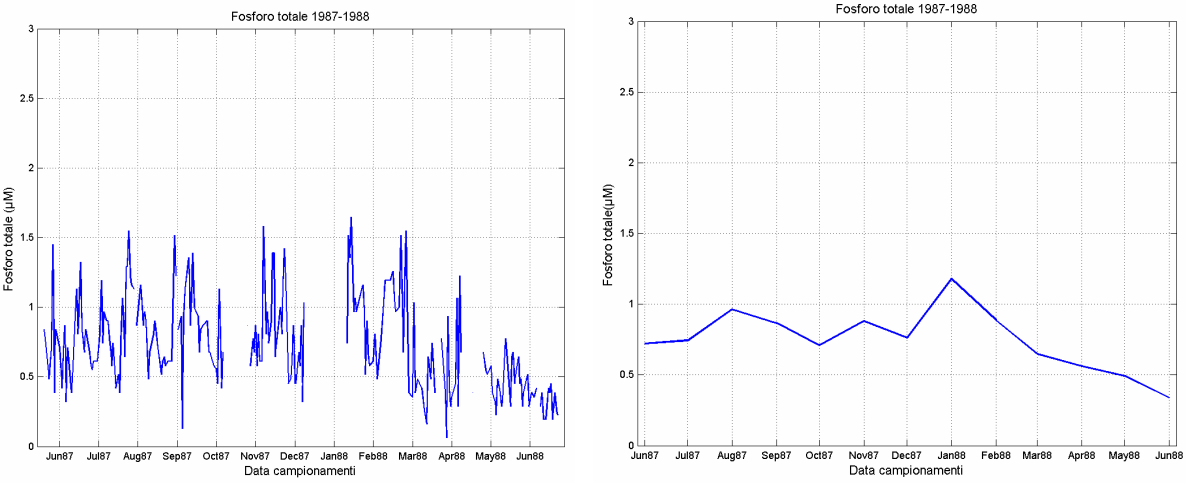
Le figure 3.16 e 3.17 mostrano i valori di fosforo totale relativi alle due serie, giornalieri (a) e mediati mensilmente (b).

Le medie annuali (tab. 6) del fosforo totale hanno valori pari a 0.88 µM (serie temporale 79-80) e 0.73 µM (serie temporale 87-88). I valori massimo e minimo per la serie temporale 79-80 sono 2.69 µM e 0.03 µM, quelli per la serie temporale 87-88 sono: 0.05 µM e 1.50 µM.



a) b)

Fig. 3.16 – Fosforo totale: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) b)

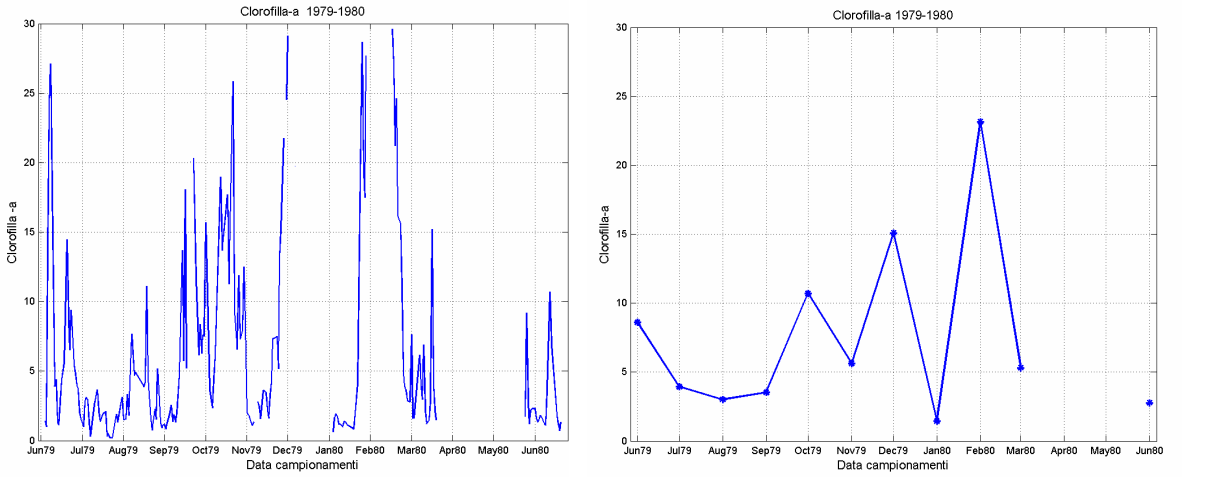
Fig. 3.17 – Fosforo totale: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.

3.2.7 Clorofilla-a

Le figure 3.18 e 3.19 mostrano i valori della clorofilla relativi alle due serie, giornalieri (a) e mediati mensilmente (b).

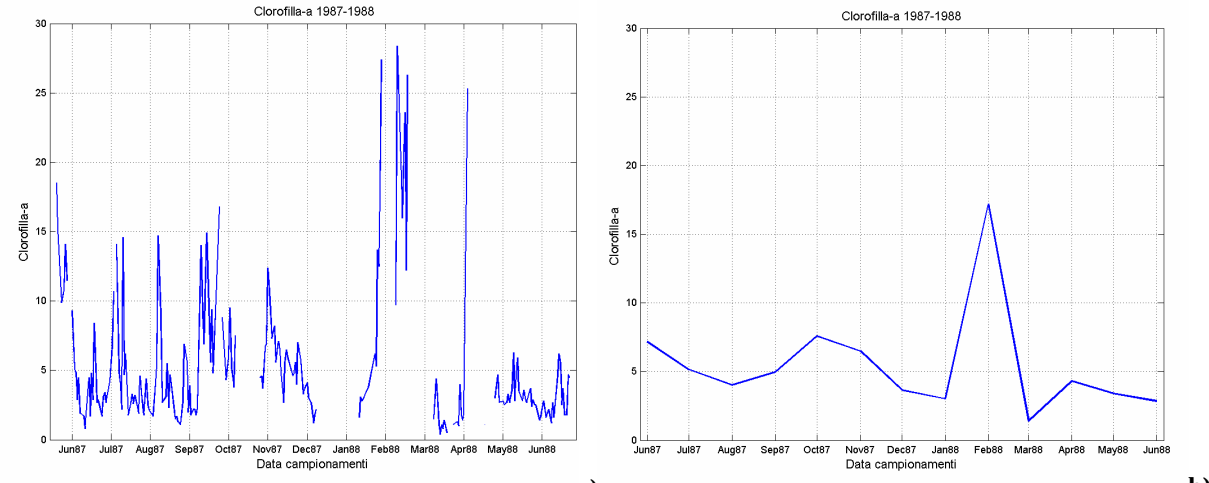
I valori medi (tab.6) nelle due serie temporali sono 6,33 mg/l (79-80) e 5,42 mg/l (87-88). La serie temporale 79-80 oscilla tra 31.82 mg/l (valore massimo) e 0.21 mg/l

(valore minimo); quella 87-88 tra 28.40 mg/l (valore massimo) e 0.40 mg/l (valore minimo).



a) **b)**

Fig. 3.18 - Clorofilla: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 79-80.



a) **b)**

Fig. 3.19 - Clorofilla: a) valori giornalieri; b) medie mensili; serie temporale 87-88.

3.3 Correlazioni

Le correlazioni sono uno strumento statistico che si utilizza per cercare di determinare se due variabili sono interdipendenti. Non esiste distinzione tra variabile dipendente e indipendente, si assume che la coppia di variabili che si intende correlare, siano una causa dell'altra, senza sapere né se è vero né in che modo si manifesti la causa-effetto. Si cerca perciò di stimare il grado di interdipendenza delle due variabili, che ne determina una variazione in valore comune.

Per utilizzare questo mezzo statistico, si procede calcolando il coefficiente di correlazione lineare (**r**) o la covarianza (C_{xz}) tra due variabili *x* e *z*, assumendo che queste siano casuali. Considerando le serie temporali *x* (x_1, x_2, …,x_N) e quella *z* (z_1, z_2, …, z_N) si può scrivere:

$$r = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\frac{(x_i-\bar{x})\cdot(z_j-\bar{z})}{\sigma_x\cdot\sigma_z}$$

e

$$C_{xz} = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})\cdot(z_j-\bar{z})$$

dove σ al denominatore è la deviazione standard delle rispettive variabili. Essendo numeratore e denominatore espresse con le stesse unità, **r** risulta una quantità non dimensionale i cui valori variano tra –1 e 1. Il coefficiente di correlazione **r** ci permette di stabilire se due parametri variano insieme nel tempo secondo una relazione lineare.

Se **r** = ±1 esiste una perfetta correlazione ma nel caso di valori positivi la correlazione è in fase mentre per valori negativi la correlazione si dice fuori fase e le due variabili si dicono anticorrelate. Questo significa che se x aumenta z diminuisce e viceversa.

Se r = 0 non esiste alcuna relazione lineare tra le due variabili che si dicono indipendenti. Anche in questo caso sono state elaborate tabelle di correlazione relative a ciascuna stazione.

L'ultimo passaggio è consistito nel testare la significatività statistica dei coefficienti di correlazione calcolati. Il numero totale osservazioni indipendenti N per ciascuna serie è compreso tra 150 e 300. Essendo il numero di gradi di libertà v pari a:

$$\nu = N - 2$$

si è assunto in maniera conservativa $\nu = 150$. Si è presa come riferimento la tabella tratta da W.J.Emery and R.E. Thomson (2001) in cui per un numero di gradi di libertà pari a v = 150, r_1 = 0.159 costituisce il limite con il livello di significatività pari a $\alpha_1 = 5\%$ e r_2 =0.208 per $\alpha_2 = 1\%$.

Possiamo dunque affermare per valori di **r** maggiori di r_1 che le variabili siano significativamente correlate con una probabilità (P=1-α) pari al 95% e per valori di **r** valori di r2 che le variabili siano correlate in maniera altamente significativa con probabilità del 99%.

Gradi di libertà	a=5%	a=1%	Gradi di libertà	a=5%	a=1%
1	0,997	1	24	0,388	0,496
2	0,95	0,99	25	0,381	0,487
3	0,878	0,959	26	0,374	0,478
4	0,811	0,917	27	0,367	0,47
5	0,754	0,874	28	0,361	0,463
6	0,707	0,834	29	0,355	0,456
7	0,666	0,798	30	0,349	0,449
8	0,632	0,765	35	0,325	0,418
9	0,602	0,735	40	0,304	0,393
10	0,576	0,708	45	0,288	0,372
11	0,553	0,684	50	0,273	0,354
12	0,532	0,661	60	0,25	0,325
13	0,514	0,641	70	0,232	0,302
14	0,497	0,623	80	0,217	0,283
15	0,482	0,606	90	0,205	0,267
16	0,468	0,59	100	0,195	0,254
17	0,456	0,576	125	0,174	0,228
18	0,444	0,561	150	0,159	0,208
19	0,433	0,549	200	0,138	0,181
20	0,423	0,537	300	0,113	0,148
21	0,413	0,526	400	0,098	0,128
22	0,404	0,515	500	0,088	0,115
23	0,396	0,505	1000	0,062	0,081

Tab. 7 -Coefficienti di correlazione con livelli di significatività $\alpha_1 = 5\%$ e $\alpha_2 = 1\%$. La tabella è stata tratta da W.J.Emery and R.E. Thomson (2001) e modificata. Si accetta Ho se r < r_2 → r = 0 , $\alpha_2 = 1\%$.

Di seguito riportiamo le tabelle di correlazioni calcolate per i parametri presi in considerazione, per entrambi gli anni di studio. Nelle tabelle sono stati inseriti soltanto le correlazioni con valori $\geq$ 0.208.

	pH	Temp	Salinità	OD	DIN	PO4	P tot	Chla-*a*	Port Po	T Atm	P Atm	Venti
Ph	1,000											
Temperatura	0,242	1,000										
Salinità	0,302	0,625	1,000									
O.D.	0,309	-0,525	-0,435	1,000								
DIN		-0,732	-0,520	-0,250	1,000							
Ortofosfati		-0,641	-0,349	0,310	0,377	1,000						
Fosforo totale		-0,295	-0,281	0,277	0,244	0,268	1,000					
Clorofilla-*a*		-0,371	-0,447	0,586	0,453		0,203	1,000				
Portate del Po		-0,253						0,556	1,000			
Temperatura Atm		0,943	0,496	-0,565	-0,474	-0,497	-0,386	-0,276		1,000		
Pressione Atm	0,939		0,406	0,208							1,000	
Venti						0,220				-0,266		1,000

Tab. 8 – Correlazioni tra parametri della serie temporale 1979-1980. In tabella sono stati inseriti i valori con significatività pari al 99%, cioè valori di r ≥ r_2 (r_2 =0.208). In giallo sono evidenziati i valori di correlazione maggiori di 0.500.

	pH	Temp.	Salinità	OD	DIN	PO4	P tot	Chla-*a*	Port Po	T. atm.	P. Atm.	Venti
pH	1,000											
Temperatura		1,000										
Salinità	0,310		1,000									
O.D.		-0,539	-0,432	1,000								
DIN		-0,513		0,300	1,000							
Ortofosfati	-0,317					1,000						
Fosforo totale	-0,247					0,413	1,000					
Clorofilla-*a*			-0,429	0,461	0,329		0,229	1,000				
Portate del Po							-0,297		1,000			
Temp. Atm		0,924		-0,591	-0,459	-0,203				1,000		
Pressione atm											1,000	
Venti		-0,216		0,209				0,261		-0,237	-0,251	1,000

Tab. 9 – Correlazioni tra parametri della serie temporale 1987-1988. In tabella sono stati inseriti i valori con significatività pari al 99%, cioè valori di r ≥ r_2 (r_2 =0.208). In giallo sono evidenziati i valori di correlazione maggiori di 0.500.

3.4 Analisi di Fourier

L'analisi di Fourier è un metodo che cerca di descrivere le fluttuazioni di una serie temporale jn termini di comportamento sinusoidale a varie frequenze. E' nota come analisi nello spazio delle frequenze.

Consideriamo $Z_1, Z_2, \ldots, Z_n$ una serie temporale di n numeri. Questa sequenza può essere vista come una serie di coordinate spaziali di un punto n-dimensionale.

In questo tipo di analisi si costruiscono vettori di funzioni chiamati basi, così che ogni altro vettore possa essere scritto come una combinazione lineare di elementi delle basi. Per un determinato spazio n-dimensionale un set di n vettori ortogonali forma una base. Per il caso di Fourier la base è scelta avere funzioni trigonometriche ortogonali $\left\{ \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right), \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) : k = 0,1,2,\ldots, \left[\frac{n}{2}\right] \right\}$ La serie temporale di n numeri dati, Z_t, può essere scritta come una combinazione lineare di questa base scrivendo quindi:

$$Z_t = \sum_{k=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]} \left[a_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \right], \qquad t = 1,2,\ldots,n.$$

Questa equazione è chiamata Trasformata di Fourier della sequenza Z_t. Dove a_k e b_k sono i coefficienti di Fourier. Usando le proprietà ortogonali delle funzioni trigonometriche

$$\sum_{t=1}^{n} \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \cos\left(\frac{2\pi jt}{n}\right) = \begin{cases} n, \ldots\ k = j = 0 \ldots\ o\ \frac{n}{2}(n - pari\ ); \\ \frac{n}{2}, \ldots\ k = j \neq 0 \ldots\ o\ \frac{n}{2}(n - pari\ ); \\ 0, \ldots\ k \neq j; \end{cases}$$

$$\sum_{t=1}^{n} \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \sin\left(\frac{2\pi jt}{n}\right) = \begin{cases} 0, \ldots\ k = j = 0 \ldots\ o\ \frac{n}{2}(n - pari\ ); \\ \frac{n}{2}, \ldots\ k = j \neq 0 \ldots\ o\ \frac{n}{2}(n - pari\ ); \\ 0, \ldots\ k \neq j; \end{cases}$$

$$\sum_{t=1}^{n} \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \cos\left(\frac{2\pi jt}{n}\right) = 0 \ldots\ \forall\ k,\ j.$$

si possono ottenere i valori di a_k e b_k. In definitiva, sostituendo $\frac{2\pi}{n}k$ con la frequenza ω_k, si avranno le seguenti equazioni:

$$Z_t = \sum_{k=0}^{\left[\frac{n}{2}\right]} \left(a_k \cos\ \omega_k t + b_k \sin\ \omega_k t\right)$$

$$a_k = \begin{cases} \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} Z_t \cos\ \omega_k t, \ldots\ k = 0, k = \frac{n}{2}(n - pari\ ), \\ \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n} Z_t \cos\ \omega_k t, \ldots\ k = 1,2,..., \left[\frac{n-1}{2}\right], \end{cases}$$

$$b_k = \frac{2}{n}\sum_{t=1}^{n} Z_t \sin\ \omega_k t, \ldots\ k = 1,2,..., \left[\frac{n-1}{2}\right]$$

Possiamo dire quindi che l'uso delle Trasformate di Fourier permette di pensare un segnale qualsiasi come una somma o sovrapposizione di infinite sinusoidi con la conseguenza che è possibile determinare come un sistema reagisce scomponendolo in queste sinusoidi.

Vediamo ora come calcolare l'energia o potenza della sequenza Z_t. La potenza è il modulo del vettore corrispondente a ciascuna armonica della serie di Fourier. La potenza consente di calcolare l'autocorrelazione delle componenti la serie di Fourier. Si scrive quindi:

$$Potenza = \begin{cases} a_0{}^2 + \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\left[\frac{n-1}{2}\right]}(a_k{}^2 + b_k{}^2), \ldots (n\ pari) \\ a_0{}^2 + \sum_{k=1}^{\left[\frac{n-1}{2}\right]}(a_k{}^2 + b_k{}^2) + a_{n/2}{}^2, \ldots (n\ dispari) \end{cases}$$

La rappresentazione grafica della potenza è definita periodogramma o spettro di potenza di Fourier. Tali grafici relazionano la potenza in ordinata con il periodo o la frequenza e mostrano la varianza con la quale si presentano le varie componenti della serie di Fourier della nostra serie temporale.

Per poter applicare la trasformata di Fourier alle serie temporali osservate è stato necessario renderle periodiche stabilendo che il primo valore della serie fosse uguale all'ultimo. Inoltre era necessario rendere continue le serie, si è quindi proceduto con una tecnica di riempimento dei buchi. Qualora il dato mancante fosse uno solo allora si è fatta la media tra il valore precedente e quello successivo, invece dove il buco era di due o più valori si è eseguita un'interpolazione lineare.

L'applicazione della trasformata di Fourier, è stata fatta in automatico con le routines del programma Matlab il quale ha prodotto periodiogrammi che saranno mostrati nel cap. 4.

Capitolo 4 – Discussione dei risultati

4.1 Discussione delle serie temporali

Le figure 4.1 e 4.2 mostrano l'andamento del rapporto tra azoto inorganico disciolto (DIN) e fosforo totale per le due serie temporali prese in esame, ed il rapporto Si:DIN per la serie 79-80.

Questi parametri sono significativi perché, sulla base della stechiometria interna del fitoplancton (Si:N:P= 16:16:1) è possibile individuare il nutriente limitante in funzione dei rapporti tra nutrienti nell'ambiente circostante (Justic' et al., 1992). Si avrà, pertanto, basandosi sul noto rapporto di Redfield (1963), una situazione di fosforo limitazione se N:P > 16 e Si:P >16, una situazione di azoto limitazione se N:P <16 e Si:N>1 e una limitazione da silice se Si:P<16 e Si:N<1.

Per verificare quale fosse il nutriente limitante nel nostro studio è stato utilizzato il fosforo totale. E' noto, infatti, che il fitoplancton, grazie all'esoenzima fosfatasi-alcalina di cui è dotato, può utilizzare anche fosforo organico per la produzione primaria.

La serie 79-80 presenta valori che denotano una limitazione da fosforo durante tutto l'anno con l'eccezione di gennaio. Sulla base del solo rapporto DIN:P la limitazione da fosforo risulta ancora più marcata nella serie 87-88, dove non erano presenti dati relativi ai silicati.

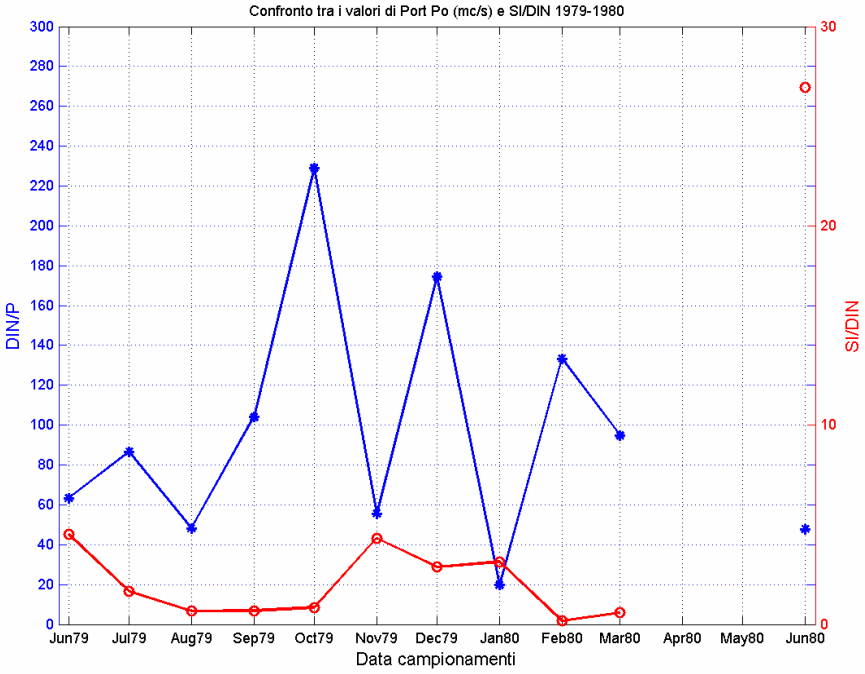


Fig. 4.1– Rapporto azoto su fosforo (in blu) e silicio su fosforo (in rosso), 1979-1980.

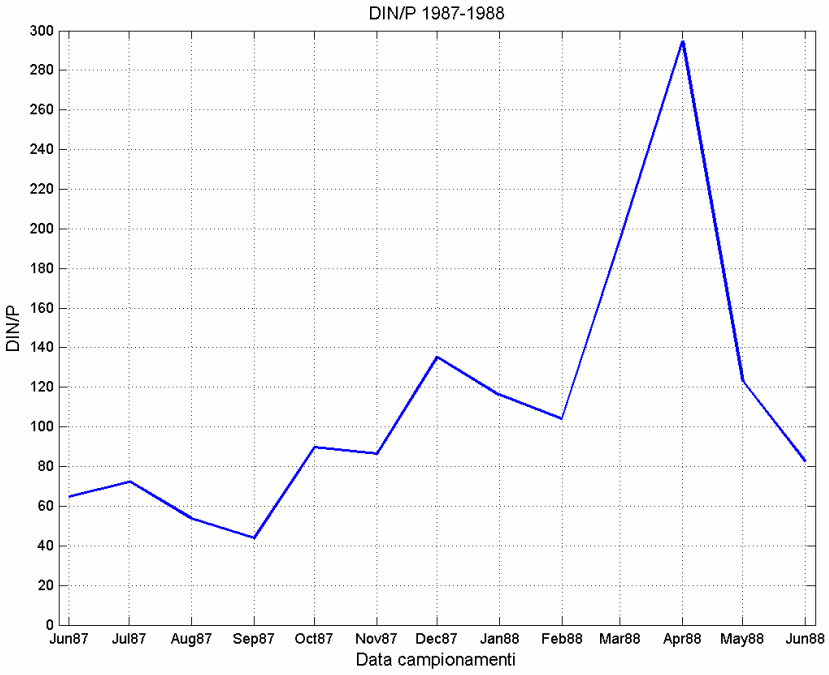


Fig. 4.2 – Rapporto azoto su fosforo 1987-1988.

La Clorofilla viene considerata una stima della biomassa algale, E' quindi logico pensare che ci sia una relazione tra questa misura e i nutrienti, necessari alla produzione primaria.

Per questo motivo qui di seguito (figure 4.3 e 4.4) vengono rappresentati i nutrienti in relazione all'andamento della concentrazione di clorofilla. e delle portate del Po.

In linea generale, quindi è possibile pensare che, un massimo di portata generalmente precede un massimo di nutrienti che, a sua volta, prelude ad un massimo di clorofilla.

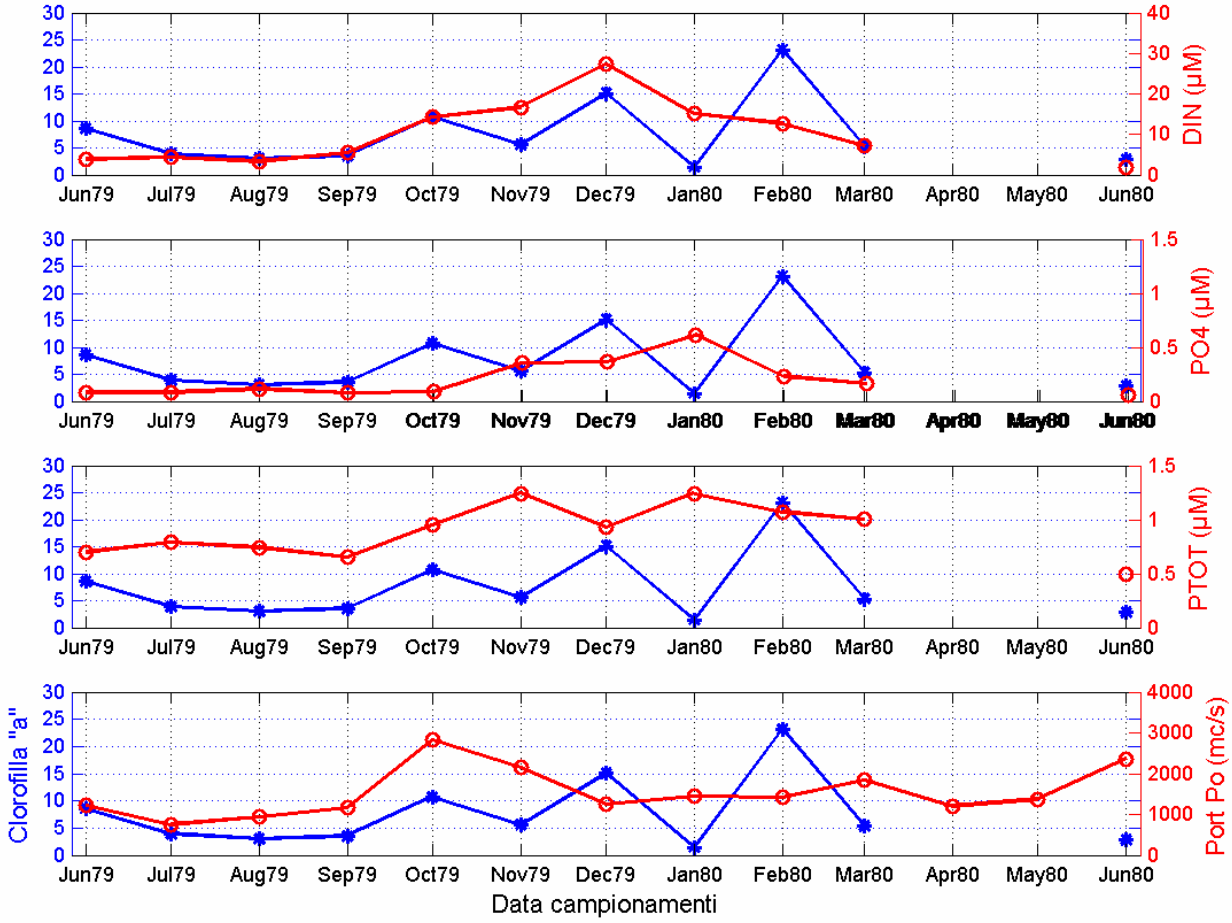


Fig. 4.3 – Confronto tra i valori di Clorofilla-*a* (sempre rappresentata dalla linea blu) e DIN, ortofosfati, fosforo totale e portate del Po, serie temporale 79-80.

Quanto detto è supportato (per quanto riguarda la serie 79-80) dal basso grado di correlazione tra clorofilla e nutrienti (0.324 con i nitrati e 0.203 col fosforo totale).

Normalmente la clorofilla prevensanta un diverso tipo di correlazione col fosforo (che noi abbiamo definito nutriente limitante) rispetto a quella col DIN. Ci si aspetta infatti, che i produttori primari, esauriscono prima il nutriente limitante.

Questo è evidente nella serie temporale 79-80 dove si può vedere che massimi di clorofilla corrispondono sempre a minimi di fosforo totale e ortofosfati.

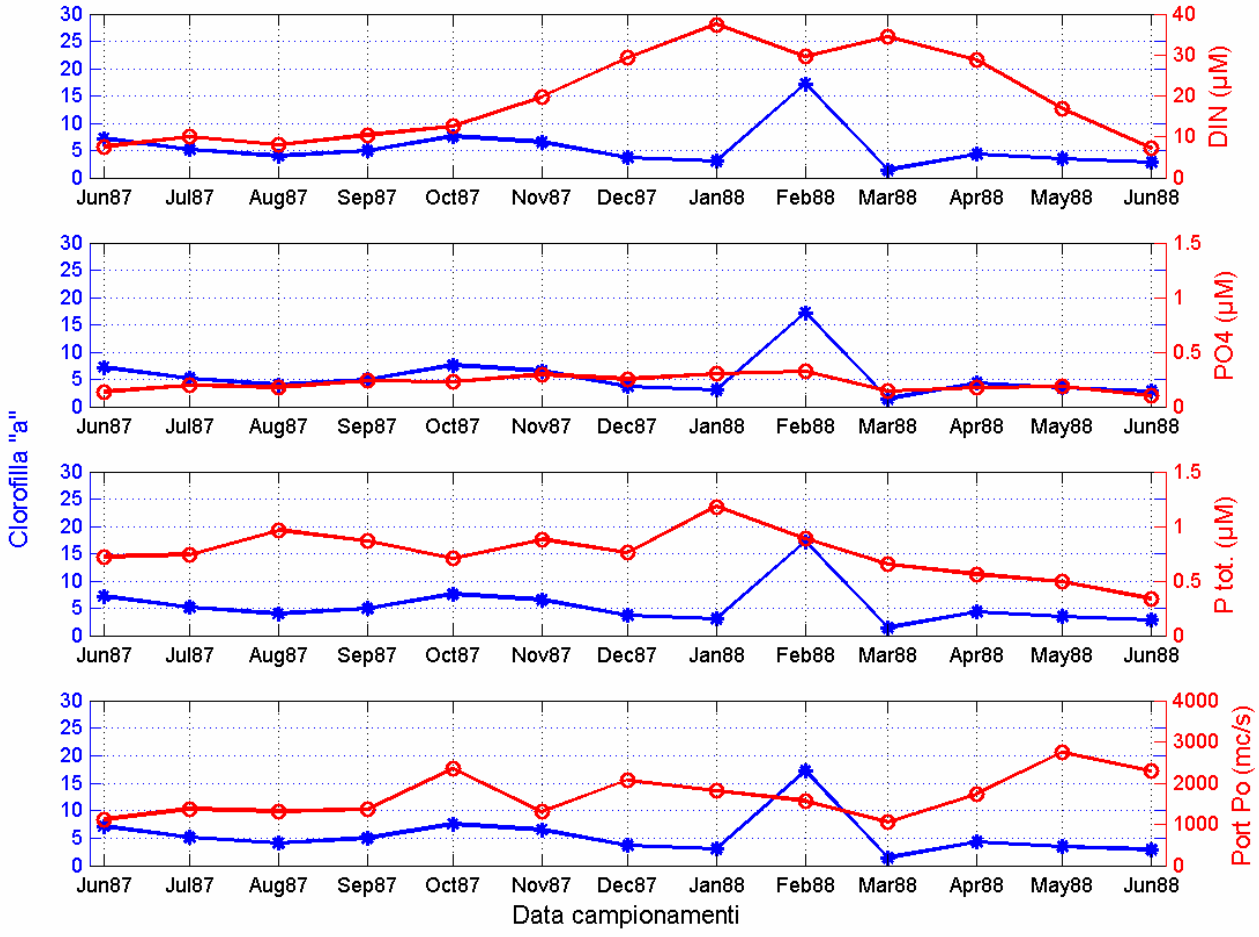


Fig. 4.4 – Confronto tra i valori di Clorofilla-*a* (sempre rappresentata dalla linea blu) e DIN, ortofosfati, fosforo totale e portate del Po, serie temporale 87-88.

Nella serie temporale 87-88, invece, il fosforo totale si comporta diversamente, non presentando dei minimi in corrispondenza dei massimi di clorofilla (fig. 4.4).

Inoltre, mentre le concentrazioni di fosforo sono analoghe a quelle della serie 79-80, la clorofilla non raggiunge gli stessi valori.

E' quindi possibile che sussista un fattore limitante , che inibisca la crescita della biomassa algale nonostante sia presente ancora fosforo utilizzabile.

Se si osserva la fig. 3.7a (temp. 87-88) è possibile notare come in corrispondenza di questo evento (febbraio '88) si siano registrate temperature molto basse (tanto da non rientrare negli intervalli stabiliti dal QC). In questo caso è possibile che proprio la temperatura possa aver agito da agente limitante.

Il nitrato e l'ammonio sono stati fin qui descritti attraverso la rappresentazione del l' azoto inorganico disciolto perché costituiscono entrambi una fonte di azoto per i produttori primari. L'analisi del rapporto tra NO_3 e NH_4 pero' può indicare se l'ecosistema è sostenuto da una produzione cosiddetta nuova, basata su nutrienti alloctoni, oppure da una produzione cosiddetta "rigenerata" e cioè basata su nutrienti riciclati all'interno della catena alimentare. L'azoto che entra nella catena trofica sotto forma do NO_3 ed NH_4 viene rigenerato da batteri e zooplancton sottoforma di ammonio. Quindi i processi biotici che avvengono nella colonna d'acqua hanno come effetto netto quello di ridurre l'azoto da nitrato ad ammonio

Possiamo supporre in linea di principio che ambienti costieri caratterizzati da sorgenti terrigene di nutrienti siano supportati da produzione nuova e saranno, quindi, caratterizzati, da un alto rapporto tra NO_3 ed NH_4, mentre ambienti oligotrofici di mare aperto siano sostenuti da una produzione rigenerata e quindi con un basso rapporto NO_3:NH_4.

In base all'intensità degli input esterni di nutrienti uno stesso sito può presentare una fluttuazione stagionale tra produzione nuova e rigenerata.

In fig. 4.5 sono mostrati i rapporti tra ammonio e nitrati per le serie temporali 79-80 e 87-88.

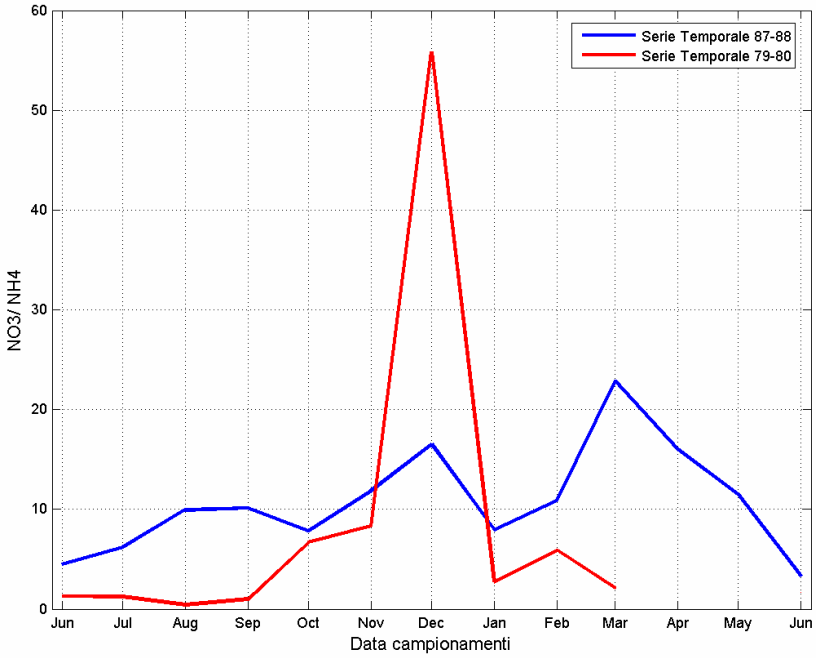


Fig. 4.5 – Rapporto tra ammonio e nitrato, medie mensili, serie temporale 79-80 (linea rossa), serie temporale 87-88 (linea blu)

La stazione considerata è situata in zona costiera altamente influenzata dall'apporto fluviale e quindi prevalentemente eutrofica. Infatti il rapporto NO_3:NH_4 è sempre molto superiore a 1 in entrambe le serie considerate. D'altra parte i dati mostrano una marcata stagionalità che indica una maggiore prevalenza di produzione nuova nei mesi invernali, in corrispondenza dei valori massimi di portate del Po.

L'esame comparativo delle medie mensili di salinità e portate del Po mostra come le due variabili siano generalmente inversamente correlate .

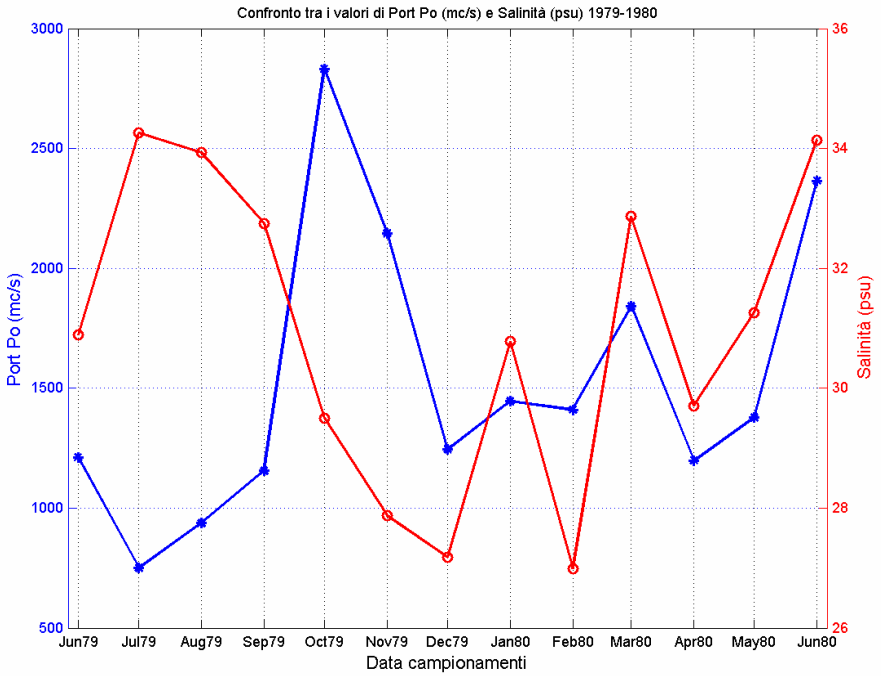


Fig. 4.6 – Portate del Po (linea blu) e salinità (linea rossa), medie mensili, serie temporale 79-80.

Valori elevati nella salinità, in periodi in cui le portate del Po registrano dei massimi, sono però presenti in gennaio e marzo nella serie 79-80 (fig. 4.6) e in dicembre e maggio della serie 87-88 (fig. 4.7). Questa apparente incongruenza potrebbe essere dovuta a due fattori: 1) i venti da terra (S-W Libeccio) che, spingendo al largo acque di superficie, richiamano verso costa acque più salate; e 2) il rapido raffreddamento delle acque del Nord Adriatico e il conseguente sprofondamento di acque più dense, che, tendendo a scorrere sul fondo verso sud, richiamano acque meridionali più salate (Eutrofizzazione delle acque marine costiere dell'Emilia Romagna, resoconto annuale della regione Emilia Romagna, 1982).

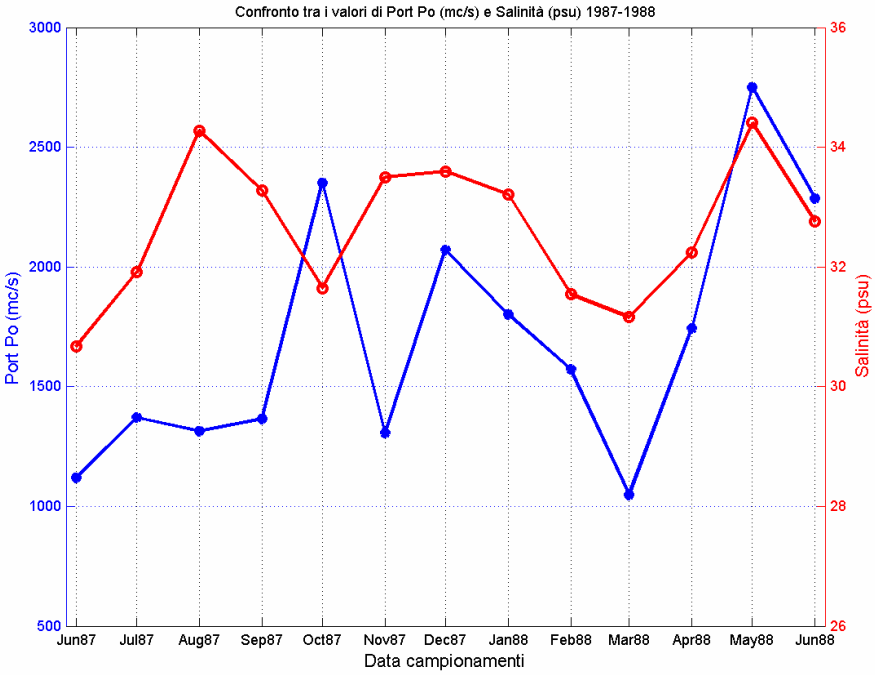


Fig. 4.7 – Portate del Po (linea blu) e salinità (linea rossa), medie mensili, serie temporale 87-88.

4.2 Analisi spettrale

Le figure 4.8 e 4.9 mostrano gli spettri ottenuti dall'Analisi di Fourier per le due serie temporali del 1979-1980 e 1987-1988.

Visto che il nostro intento era di investigare le eventuali ciclicità mensili e/o settimanali, il periodo considerato va da 1 a 50 giorni. I periodogrammi mostrati presentano il periodo in ascissa e lo spettro di potenza in ordinata. La linea rossa rappresenta lo spettro mentre le due linee blu rappresentano l'intervallo di confidenza al 95%.

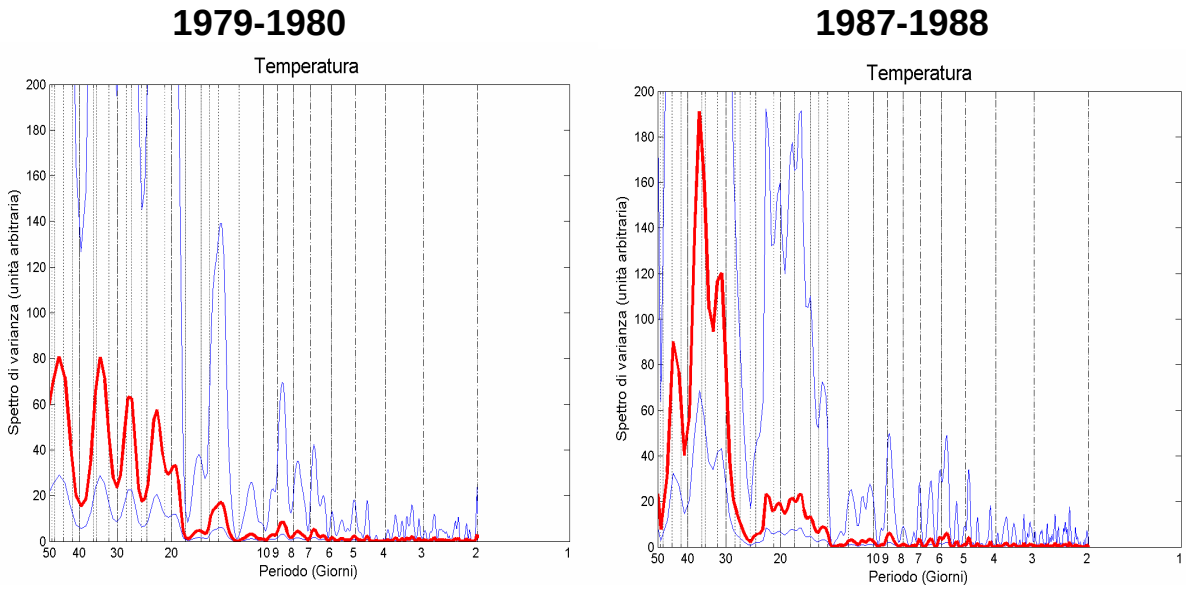
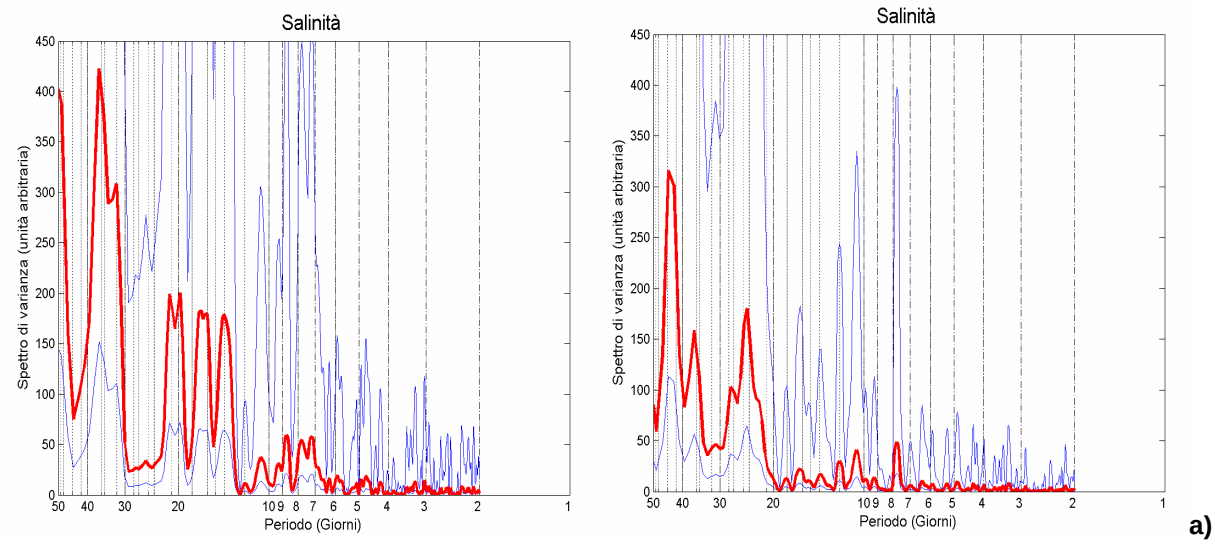
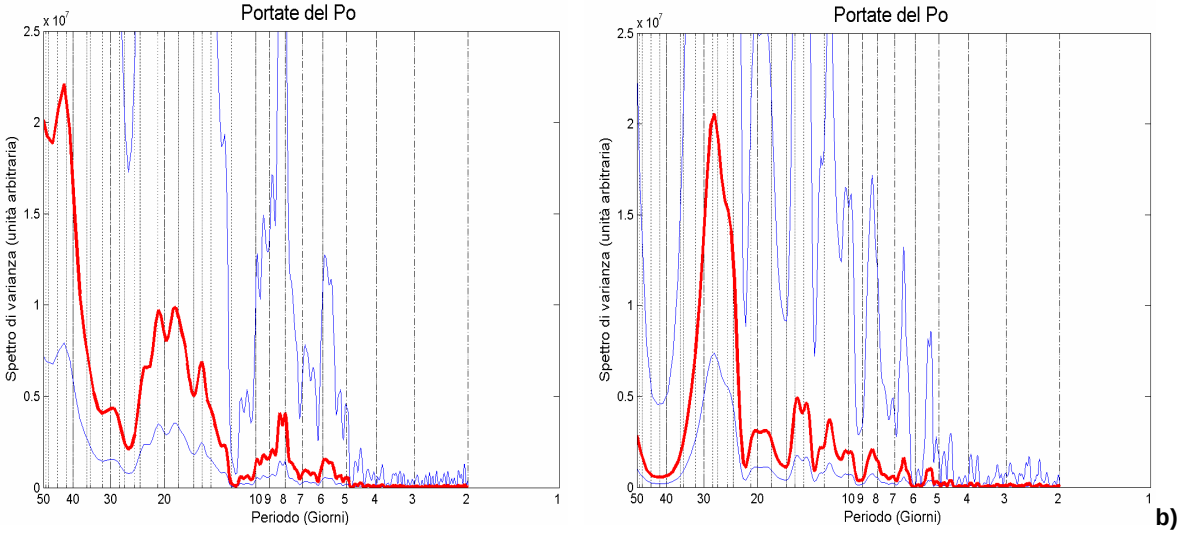


Fig. 4.8 – Spettri di potenza a confronto. A sinistra serie temporale 79-80, a destra serie temporale 79-80: Temperatura.

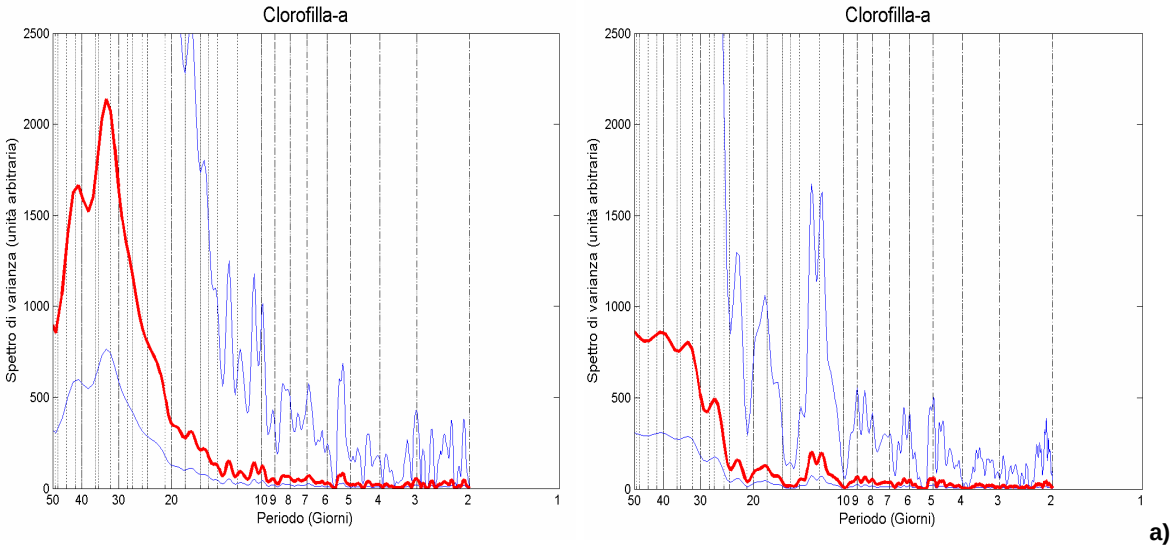


a)



b)

Fig. 4.9 – Spettri di potenza a confronto. A sinistra serie temporale 79-80, a destra serie temporale 79-80: a) Salinità; b) Portate del Po.



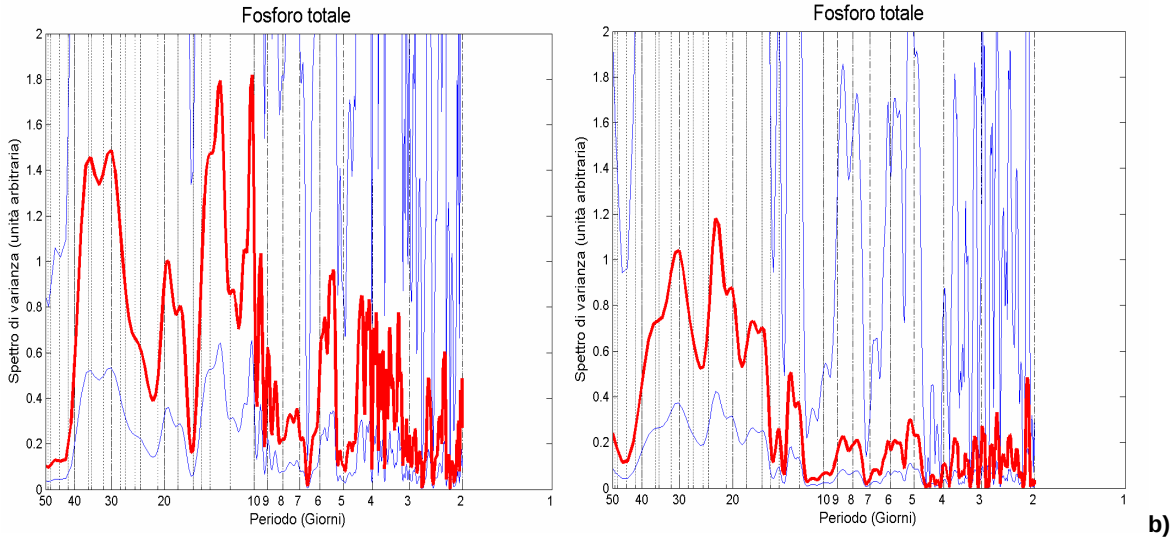


Fig. 4.10 – Spettri di potenza a confronto. A sinistra serie temporale 79-80, a destra serie temporale 79-80: a) Clorofilla-*a* b) Fosforo totale.

L'osservazione di questi grafici ci permette di individuare i periodi dominanti nei quali la varianza è maggiore ovvero c'è maggiore potenza o energia nel segnale. Se si rilevano picchi con stesso periodo per variabili diverse si può supporre l'esistenza di una correlazione diretta tra le variabili (sia essa positiva o negativa).

I picchi maggiori negli spettri di potenza sono presenti attorno ai periodi di 30-40 giorni che rappresentano l'eventuale ciclicità mensile. Altri picchi importanti esistono

attorno ai 12-18 giorni rappresentanti l'eventuale ciclicità bisettimanale e attorno ai 7-10 giorni rappresentanti l'eventuale ciclicità settimanale della variabile. I picchi inferiori a questi periodi non verranno considerati.

Tra le due diverse serie temporali riscontriamo una similarità nei picchi presenti per i tre periodi stabiliti precedentemente.

La temperatura (fig. 4.8a), registra un picco a 27 giorni, uno attorno a 15 e uno a 7.

Tra salinità e portate del Po (fig. 4.9a e 4.9b) è rilevabile un picco correlato attorno ai 30 giorni, (precisamente 28 giorni per le portate del Po e 32 per la salinità) così come attorno ai 10 giorni (10 per il Po e 12 per la salinità).

Così come può essere correlato il picco tra clorofilla (fig. 4.10a) e fosforo totale (fig. 4.10b) presente a 27 giorni, a 11 e 9 giorni. La clorofilla manifesta un picco anche a circa 6 giorni e il fosforo attorno ai 5 giorni.

Capitolo 5 – Conclusioni

Il lavoro svolto ha portato alle seguenti conclusioni:

1. La stazione analizzata presenta un forte ciclo stagionale per quanto riguarda tutti i parametri presi in esame;
2. I parametri biochimici (clorofilla, nutrienti) sono influenzati dalle portate del Po. La correlazione tra clorofilla e portate del Po potrebbe essere dovuta o all'avvezione di nutrienti nell'area della stazione esaminata (trasportati dalla WAC) oppure all'avvezione di biomassa prodotta in prossimità della foce del Po e successivamente trasportata verso sud;
3. L'analisi effettuata nella stazione conferma il regime di P-limitazione normalmente descritto in letteratura per il Nord Adriatico. Si è riscontrato un aumento della limitazione nella serie temporale 87-88;
4. Si è evidenziata una ciclicità stagionale anche per quanto riguarda la struttura trofica dell'ecosistema con un aumento nei mesi estivi dell'attività batterica (produzione rigenerata) in accordo con i risultati ottenuti da studi di modellistica ecologica;
5. L'analisi spettrale individua ciclicità a bassa scala temporale (7-8 giorni) indicando la necessità di un monitoraggio almeno settimanale per potere efficacemente risolvere le fluttuazioni dell'ecosistema.

BIBLIOGRAFIA

Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., and Russo, A, The Adriatic Sea general circulation. Part I: Air Sea interactions and water mass structure. *J. Phys. Oceanogr.,*27, 1492-1514, **1997a.**

Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., and Russo, A, The Adriatic Sea general circulation. Part II: Baroclinic circulation structure. *J. Phys. Oceanogr.,*27, 1515-1532, **1997b.**

Barmawidjaja, D.M., van der Zwaan, G.J., Jorissen, F.J., Puskaric, S., 150 years of eutrophication in the northern Adriatic Sea: Evidence from a benthic foraminiferal record. *Marine Geology*, Elsevier, 122: 367-384. **1995.**

Degobbis, D, Precali, R., Ferrari, C.R., Djakova, T., Rinaldi, A., Ivančić, I., Gismondi, M. and Smodlaka, N., Changes in nutrient concentrations and ratios durino mucilage events in the period 1999-2002. *Science of the Total Environment,* Elsevier, 353: 103-114. **2005.**

Dubravko, J., Rabalais, N.N., Turner, R.E. and Quay, Dortch, Changes in Nutrient Structure of River-dominated Coastal Waters: Stoichiometric Nutrient Balance and its Consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science,* Academic Press Limited 40, 339-356*.* **1995.**

Galliani, G., Filippini, F., Montanari, G., Rinaldi, A., and Vollenweider, R.A., Time series analysis of oceanological parameters measured at a fixed station*. Marine Coastal Eutrophication*, Elsevier, 171-186*.* **1992.**

Grilli, F., Marini, M., Degobbis, D., Ferrari, C.R., Fornasiero, P., Russo, A., Gismondi, M., Djakovac, T., Precali, R. and Simonetti R., Circulation and horizontal fluxes in the northern Adriatic Sea in the period June 1999-July 2002. Part II: Nutrient transport. *Science of the Total Environment,* Elsevier, 353: 115-125. **2005.**

Poulain, P.M., Adriatic Sea surface circulatione as derived from drifter data between 1990 and 1999. *J. Mar. Sys*, 29, 3-32, **2001.**

Poulain, P.M., and Cushman-Roisin, B, Circulation. In: Physical Oceanography of the Adriatic Sea. Past, present and future. *Kluwer Academic Publ.*, 67-109*,* **2001.**

Regione Emilia Romagna. Eutrofizzazione delle acque costiere dell'Emilia-Romagna – Andamenti temporali ed elaborazione statistiche dei parametri chimico-fisici e biologici in una stazione fissa. *Assessorato Ambiente e Difesa del Suolo.* A cura di Testoni, P., Montanari, G., Nespoli, G., Rinaldi, A.

Simoncelli, S., Pinardi, N., Montanari, G., Abbiati, M., Variabilità di campi fisici e bio-chimici nella fascia costiera dell'Emilia Romagna. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali indirizzo marino, Facoltà di Scienze MM FF NN, Università di Bologna, **2003.**

Sokal, R.R., e Rohlf, F.J., Introduction to biostatistics. (second edition) *W. H. Freeman and Company / New York*, pagg 267-293, **1987.**

Spiegel, M.R., Schaum's: Analisi Matematica vol. 8. *McGraw – Hill Libri Italia Srl*, pagg. 224-259 , 298-320, **1963.**

Warren, S.C., Nespoli, G., Rinaldi, A., Montanari, G., Vollenweider, R.A., Eutrophication along the Emilia Romagna coast: application of statistical analysis to 1984-1989 monitoring data. *Marine Coastal Eutrophication*, Elsevier, 187-200, **1992**.

Wei, William W. S., Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods. *Addison-Wesley Publishing Company.* **1990.**

Zavatarelli, M., Raicich, F., Bregant, D., Russo, A., Artegiani, A. Climatological Biogeochemical characteristics of the Adriatic Sea. *J. Mar. Sys*, Elsevier, 18, 227-263, **1998**.

Zavatarelli, M., Pinardi, N., The Adriatic Sea modelling system: a nested approach. *Annales Geophysicae,* European Geosciences Union 2003*,* 21*:*345-364. **2003.**

Zoppini, A., Pettine, M., Totti, C., Puddu, A., Artegiani, A. and Pagnotta, R., Nutrient, Standing Crop and Primary Production in Western Costal Waters of the Adriatic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science,* Academic Press Limited 41, 493-513*.* **1995.**