

Il ruolo degli eventi di piena nella formazione e distribuzione temporale dei carichi di fosforo e azoto nel fiume Po

Mariachiara Naldi^{1*}, Enrica Pierobon¹, Francesco Tornatore², Pierluigi Viaroli¹

¹ Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma, Viale G.P. Usberti 33/A - 43100 Parma

² Servizio Tutela Acque, Autorità di Bacino del Fiume Po, Parma

* Referente per la corrispondenza: mariachiara.naldi@unipr.it

Riassunto

I cambiamenti climatici e le pressioni antropiche dirette stanno determinando profonde alterazioni dei sistemi acquatici continentali. Ne è un esempio il bacino padano, nel quale la formazione dei carichi rilasciati dal Po nell'alto Adriatico deve essere valutata nel contesto di forti variazioni del regime idrologico, con particolare rilevanza dell'incidenza delle piene fluviali. Per questo motivo è stato intrapreso uno studio delle variazioni temporali dei carichi di azoto e fosforo transitati nella stazione di chiusura di bacino a Pontelagoscuro nel periodo 2003-2007, valutando l'incidenza dei carichi di piena rispetto al carico annuale totale. Le concentrazioni dei principali nutrienti sono state determinate con frequenza bisettimanale nei periodi di portata ordinaria e ogni 6-12 ore durante ciascun evento di piena. Il carico annuale di fosforo totale oscilla tra 5400 e 9300 t y⁻¹ e dipende in larga misura dagli eventi di piena, che trasportano il 25-40 % del carico annuale in un arco temporale limitato di soli 18-37 giorni. Al contrario il carico annuale di azoto totale (72000-156000 t y⁻¹) non dipende dagli eventi di piena, ma è correlato al carico idraulico. Il carico di azoto dovuto alle piene varia tra l'11 e il 27 % del totale annuo. Il carico dell'azoto inorganico disciolto è costituito soprattutto da nitrati e presenta una forte stagionalità in relazione alle fasi di siccità e piovosità e ai cicli colturali. La diversa evoluzione temporale dei carichi di azoto e fosforo e il conseguente sbilanciamento dei rapporti stechiometrici verso una minore limitazione da fosforo durante le piene, potrebbe avere effetti rilevanti sullo sviluppo delle comunità algali e della produttività primaria nella fascia marina costiera più direttamente influenzata dagli apporti del Po.

PAROLE CHIAVE: carichi di nutrienti / azoto / fosforo / eventi di piena / fiume Po

Relationships between flood events and formation and variability of nitrogen and phosphorus loads in the Po river

Climate changes and anthropogenic pressures are seriously altering continental aquatic systems. Consequently, in the Po river basin the study of nutrient load formation and delivery to the Northern Adriatic Sea must necessarily consider the large and sudden variations of water discharge rates, particularly flood events. Within this context, the temporal variability of nitrogen and phosphorus loads at the basin closing section of Pontelagoscuro was studied from 2003 to 2007, specifically considering the contribution of flood events to the total annual load. The main nutrient concentrations were determined biweekly during normal water discharge periods, and every 6-12 hours during flooding events. The annual total phosphorus load varies between 5400 and 9300 t y⁻¹ and largely depends on flood events, that deliver about 25-40% of the annual load during a very short period of only 18-37 days. The annual total nitrogen load (72000-156000 t y⁻¹), on the contrary, does not depend on flood events but directly on the discharged water volume; flood contribution to the annual nitrogen load varies only between 11 and 27%. The inorganic nitrogen load consists mostly of nitrate and shows a marked seasonality related to rain patterns and agricultural practices. The different seasonal patterns of nitrogen and phosphorus loads, and the resulting stoichiometric N:P imbalance towards less P-limiting conditions during floods, could have important consequences for primary producer communities in the coastal zone directly influenced by the Po river discharge.

KEY WORDS: nutrient loads / nitrogen / phosphorus / flood events / Po river

INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici e le pressioni antropiche dirette stanno determinando profonde alterazioni dei sistemi acquatici continentali che si manifestano sempre più frequentemente con forti variazioni del regime idrologico, piene di marcata intensità, sbilanciamenti

del trasporto solido e inquinamento (MEYBECK, 2002; 2004). Questi fenomeni, che si verificano a scala planetaria, hanno componenti locali altrettanto importanti. Ne è un esempio il bacino padano, nel quale qualità delle acque e regime idrologico sono modificati

anche in conseguenza del dissesto dei bacini e delle modificazioni degli alvei fluviali (MARCHETTI, 1993), nonché dalle sempre più frequenti e forti escursioni dei livelli idrometrici e delle portate (ALLODI e PECORA, 2003; MAZZARELLA e RAPETTI, 2004). In questo contesto, l'aumento delle pressioni e il deterioramento dello stato del sistema comportano un aumento degli impatti, soprattutto nei tratti planiziali e nelle aree marine costiere, dove si sviluppano processi di eutrofizzazione (CLOERN, 2001; DODDS e COLE, 2007). Il determinismo e le tendenze evolutive di questi fenomeni sono in larga misura correlati con portate fluviali, carichi dei nutrienti di origine continentale e stechiometria degli elementi eutrofizzanti (HESSEN, 1999; NEDWELL e RAFFAELLI, 1999; GIORDANI *et al.*, 2005).

Studi approfonditi sul fiume Po e sul bacino idrografico padano sono stati condotti tra il 1970 e il 1990 e pubblicati in numerose monografie e in lavori di sintesi (MARCHETTI e VERNA, 1992; PROVINI *et al.*, 1992). In particolare, il volume edito da MARCHETTI (1993) è diventato un riferimento importante per gli studi e per gli interventi che sono stati svolti negli anni successivi. In questo lavoro, per la prima volta viene presentato e discusso il quadro d'insieme delle conoscenze multidisciplinari, in particolare di quelle ecologiche, di tutta l'asta fluviale e di tutti i sistemi acquatici ad essa connessi, compresi laghi alpini e molti affluenti. Per quanto concerne specificatamente i nutrienti, sono presentati gli andamenti di concentrazioni e carichi a partire dal 1960 sino al 1991. Le variazioni dei carichi del fosforo risentono solo in parte dei provvedimenti legislativi volti alla riduzione dei fosfati nei detersivi (DM 7/86) e al miglioramento dei sistemi di depurazione, mentre resta elevato il contributo del carico diffuso di origine agro-zootecnica. Analoga evidenza si ha per i carichi dell'azoto, che nello stesso periodo tendono a variare in dipendenza dei fattori climatici e idrologici, piuttosto che per effetto delle politiche gestionali adottate.

Gli atti del convegno organizzato dal C.N.R. nel 1991 contengono studi preliminari sui meccanismi di trasporto dei carichi inquinanti con particolare attenzione a tre eventi di piena verificatisi tra gennaio 1988 e maggio 1990 (BERTONATI e IOANNILLI, 1992, TARTARI *et al.*, 1992).

I numerosi studi svolti negli anni successivi analizzano soprattutto gli effetti dei carichi sul sistema costiero per valutare le relazioni con fioriture algali e produzione massiva di mucillagini (VOLLENWEIDER, 1992). Un quadro aggiornato delle caratteristiche e delle criticità del bacino del fiume Po è stato presentato di recente dall'autorità di bacino competente (AdBPo, 2006) e in occasione della discussione del piano di gestione nel distretto idrografico del fiume Po (AdBPo, 2009).

In seguito alla piena verificatasi dal 12 ottobre al 4

dicembre 2000, vengono avviate nuove indagini sugli effetti dell'export fluviale nell'ecosistema costiero. In questo contesto molti sono i lavori pubblicati che si incentrano principalmente sull'analisi della composizione della frazione particellata veicolata dal fiume Po. La maggior parte degli studi, svolti nell'ambito del progetto europeo EUROSTRATAFORM, analizza le dinamiche di deposizione del particellato derivante dal sistema fluviale e i relativi effetti ecologici, sia nei sistemi deltizi che nella piattaforma continentale (WHEATCROFT *et al.*, 2006; TESI *et al.*, 2007). Eventi di piena eccezionale, come quello del 2000, sembrano avere anche effetti a distanza, fino alla fascia costiera di Pesaro (PENNA *et al.*, 2004).

Il regime idrologico, che costituisce il fattore più importante nel trasporto dei carichi, è stato studiato in relazione a fattori meteo climatici (evapotraspirazione e precipitazioni) ad una scala temporale di circa due secoli (ZANCHETTIN *et al.*, 2008). Negli ultimi decenni, a fronte di una diminuzione totale dei deflussi che alimentano il fiume Po, i valori di portata in occasione degli eventi di piena risultano essere più elevati che nel passato. Tale tendenza sembra essere dovuta più a sistemazione e regolazione idraulica del reticolo idrografico che al cambiamento climatico. Va comunque sottolineato che nel 4th Assessment Report dell'IPCC la regione padana è inclusa nelle zone continentali europee che saranno soggette a forti variazioni del regime pluviometrico con una amplificazione degli estremi idrologici (IPCC, 2007, si veda anche TIBALDI *et al.* in questo volume).

La valutazione dei carichi di azoto e fosforo rilasciati dal Po nell'alto Adriatico costituisce uno strumento conoscitivo indispensabile per le attività di pianificazione degli interventi atti a ridurre l'eutrofizzazione delle acque costiere e di transizione e per mitigare la contaminazione delle acque continentali (PALMERI *et al.*, 2005). I modelli attualmente in uso per il bacino del Po (es. MONERIS, POLFLOW, ELCOM + CAEDYM) non considerano esplicitamente gli effetti della regimazione idraulica e l'incidenza delle piene nella formazione dei carichi inquinanti e la calibrazione dei modelli è prevalentemente svolta con i valori medi di portata del periodo di riferimento 1961-1990 (DE WIT e BENDORICCHIO 2001; SPILLMAN *et al.*, 2007) che sono sensibilmente diversi da quelli degli ultimi anni (ZANCHETTIN *et al.*, 2008).

Questo lavoro si pone l'obiettivo di analizzare le relazioni tra carichi eutrofizzanti e regime idrologico del fiume Po in un periodo recente (2003-2007) caratterizzato da prolungati periodi di siccità. In specifico sono considerati i carichi del fosforo in relazione al regime idrologico, con particolare riferimento agli eventi di piena.

MATERIALI E METODI

Dati utilizzati

L'Autorità di Bacino del fiume Po (AdBPo) e il Servizio Idro-Meteo-Clima dell'ARPA Regione Emilia Romagna hanno fornito dati di portata del fiume Po a Pontelagoscuro per il periodo gennaio 1991-dicembre 2007. AdBPo ha inoltre fornito i dati del monitoraggio idrochimico effettuato da HERA Ferrara nel periodo 1999-2007 a Pontelagoscuro. In particolare HERA ha reso disponibili i dati di qualità dell'acqua relativi al monitoraggio ordinario (1999-2007) e dati di qualità dell'acqua relativi al monitoraggio intensivo degli eventi di piena (2003-2007).

Tra i dati rilevati da HERA secondo il protocollo di indagine concordato con AdBPo, sono stati selezionati i parametri idrochimici di interesse per la determinazione dei carichi eutrofizzanti, di seguito riportati con le unità di misura adottate: solidi sospesi totali (SST, mg L⁻¹); torbidità (NTU); azoto nitroso (N-NO₂⁻, mg N L⁻¹); azoto nitrico (N-NO₃⁻, mg N L⁻¹); azoto ammoniacale (N-NH₄⁺, mg N L⁻¹); azoto totale (TN, mg N L⁻¹); fosforo reattivo solubile: (SRP, µg P L⁻¹); fosforo totale particellato (PP, µg P L⁻¹, solo dal 2005 al 2007); fosforo totale (TP, µg P L⁻¹); silice reattiva disciolta (DRSi, mg Si L⁻¹, solo dal 2005 al 2007).

Il campionamento di HERA viene svolto da stazione fissa, attraverso le opere di presa e di adduzione delle acque inviate al sistema di potabilizzazione. La frequenza è variabile ed è in funzione del parametro di interesse, ad esempio il prelievo è giornaliero per torbidità, azoto nitroso ed ammoniacale, settimanale per l'azoto nitrico. Per le specifiche tecniche e i metodi analitici si rimanda ai metodi ufficiali (APHA, 1998; APAT, 2003).

Ove possibile, i dati sono stati integrati con quelli forniti da ARPA Emilia Romagna, che effettua campionamenti con frequenza all'incirca quindicinale, con esclusione dei periodi di piena.

A partire da settembre 2003, HERA ha effettuato campionamenti intensivi durante gli eventi di piena. Sono stati considerati tali tutti gli eventi con portate superiori a 1500 m³s⁻¹ e/o con torbidità maggiore di 150 NTU. In media, i prelievi sono stati effettuati ogni 12 ore e su tutti i campioni sono stati analizzati i parametri riportati in precedenza. Dal 2005 al 2007 in occasione delle piene sono stati determinati anche PP e DRSi.

Analisi della serie dei dati di portata 1991-2007

La serie dei dati di portata rilevati dal 1991 al 2007 è stata analizzata con la Change Point Analysis (TAYLOR, 2000) che permette di stabilire se nell'evoluzione dei valori si siano verificate variazioni statisticamente si-

gnificative. Questo metodo è usato frequentemente per identificare eventuali *shift* nei valori medi; si basa sull'analisi iterativa della somma cumulata degli scarti dal valore medio (CUSUM, test non parametrico) in combinazione con *bootstrapping* dei valori residui.

Analisi dei carichi di fosforo e azoto

Durante il periodo di monitoraggio ordinario, i carichi giornalieri sono stati calcolati integrando i dati per intervalli temporali discreti (PROVINI *et al.*, 1992). Inizialmente, per le date in cui erano disponibili sia i valori di portata che le concentrazioni dei nutrienti, sono stati ottenuti i carichi istantanei (espressi in g s⁻¹). In seguito è stata usata una funzione lineare per interpolare ogni coppia di valori di carico sequenziali. La pendenza della retta risultante è stata quindi utilizzata per calcolare i carichi nei giorni mancanti. Ogni dato giornaliero del monitoraggio ordinario è stato riferito all'intervallo 0-24 ore del giorno considerato.

Il calcolo dei carichi degli eventi di piena è stato svolto utilizzando i dati sperimentali disponibili ad intervalli di 12 ore circa. Il carico riferito ad ogni giorno è stato calcolato integrando i dati per intervalli temporali discreti, ovvero sono stati integrati i dati nell'intervallo 0-24 ore del giorno interessato.

Il calcolo del carico di piena è stato svolto solo per l'intervallo temporale compreso tra il primo e l'ultimo prelievo relativi all'evento di piena e identificati con la valutazione congiunta di portata e torbidità. Il resto del carico è stato attribuito alle portate ordinarie, interpolando l'ultimo valore di concentrazione misurato prima e il primo valore misurato dopo la piena. È stato adottato questo metodo e non l'interpolazione dell'ultimo dato di portata ordinaria con il primo di piena perché, con l'arrivo della piena, le variazioni temporali delle variabili chimiche sono anche di uno-due ordini di grandezza e avvengono in tempi brevi. In tal caso il valore medio ottenuto con l'interpolazione utilizzata per le portate ordinarie potrebbe causare una sovrastima del dato. Va comunque sottolineato che è possibile che con l'algoritmo utilizzato il carico reale venga sottostimato.

RISULTATI

Portate

La portata media a Pontelagoscuro calcolata dal 1991 al 2007 è risultata 1476 m³s⁻¹ (Fig. 1), confrontabile con il valore medio di 1480 m³s⁻¹ del periodo di riferimento 1961-1990. Nel 2003-2007, le portate sono però mediamente inferiori al resto del periodo 1991-2007, con valori medi annui compresi tra 832 e 1024 m³s⁻¹, ad eccezione del 2004 (1433 m³s⁻¹).

Nel periodo 1991-2007, è stata considerata anche la

distribuzione di frequenza delle portate medie giornaliere, dalla quale si evidenzia una frequenza elevata dei giorni con portata media inferiore alla media annuale del periodo 1961-1990, nonché un numero di giorni di magra estrema pari a circa il 5% (Fig. 2). L'incidenza di portate molto basse è rilevante soprattutto negli ultimi anni, quando si sono contati rispettivamente 65 (2005), 74 (2006) e 66 giorni (2007) con portata inferiore a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; in particolare nel 2006 ben 43 giorni hanno portate inferiori a $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fig. 3).

La Change Point Analysis dei dati di portata del periodo 1991-2007 è coerente con i risultati dello studio di ZANCHETTIN *et al.* (2008); in particolare si individuano variazioni statisticamente significative del-

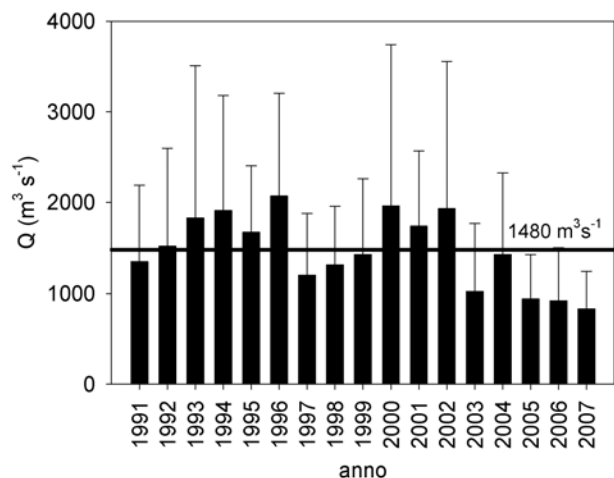


Fig. 1. Confronto tra i valori medi annui di portata rilevati dal 1991 al 2007 a Pontelagoscuro e la media del periodo di riferimento 1961-1990 ($1480 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Nel grafico sono riportate le deviazioni standard delle medie. Per un confronto con i dati pregressi si rimanda a MARCHETTI (1993).

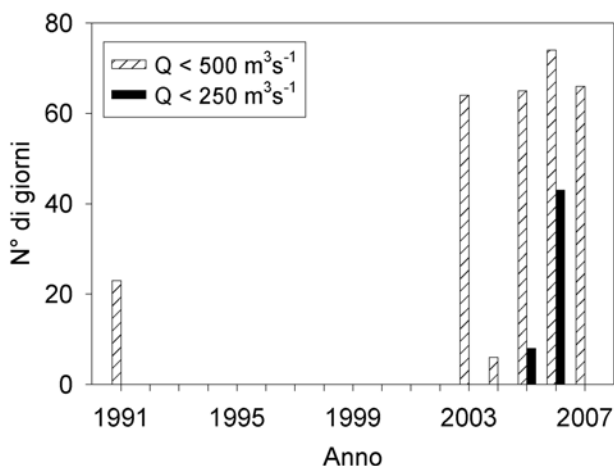


Fig. 3. Numero dei giorni con portate medie giornaliere inferiori a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (istogramma chiaro) e a $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (istogramma nero) nel periodo 1991-2007.

le portate per intervalli temporali di breve durata. Dal 1991 al 2007, se si esclude l'evento di piena del 2000 perché di carattere eccezionale, si osservano tre distinti periodi, dei quali l'ultimo in ordine di tempo presenta una progressiva diminuzione delle portate e un aumento dei transitori idrologici, con una forte incidenza degli eventi di magra (Fig. 4).

Carichi di azoto e fosforo

L'andamento temporale della concentrazione del nitrato rivela una forte stagionalità, con minimi estivi e massimi tardo invernali molto pronunciati (Fig. 5). Non sono riscontrabili differenze interannuali significative, né differenze apprezzabili tra eventi di piena e portate ordinarie (Tab. I). Le concentrazioni dell'azoto totale presentano un comportamento analogo.

Le concentrazioni del fosforo totale (TP) non seguono una stagionalità, ma piuttosto sono soggette a improvvise quanto rapide variazioni che si accompa-

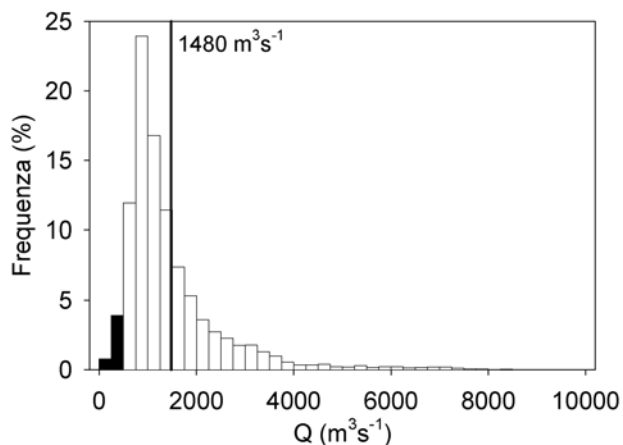


Fig. 2. Frequenza delle portate medie giornaliere calcolate per il periodo 1991-2007. Le due barre in nero si riferiscono alle portate di magra inferiori a $500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e a $250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. La linea verticale rappresenta la portata annua media del periodo di riferimento 1961-1990.

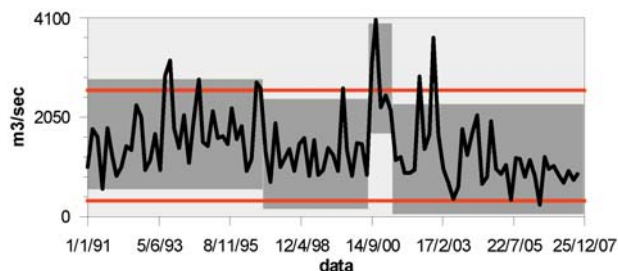


Fig. 4. Output grafico della Change Point Analysis. In grigio scuro sono evidenziati gli intervalli temporali in cui si sono registrati trend caratterizzati da valori medi statisticamente diversi tra di loro. Le linee scure orizzontali indicano i limiti del range entro cui varierebbero i dati nell'ipotesi che non si verificasse nessun cambiamento durante il periodo considerato.

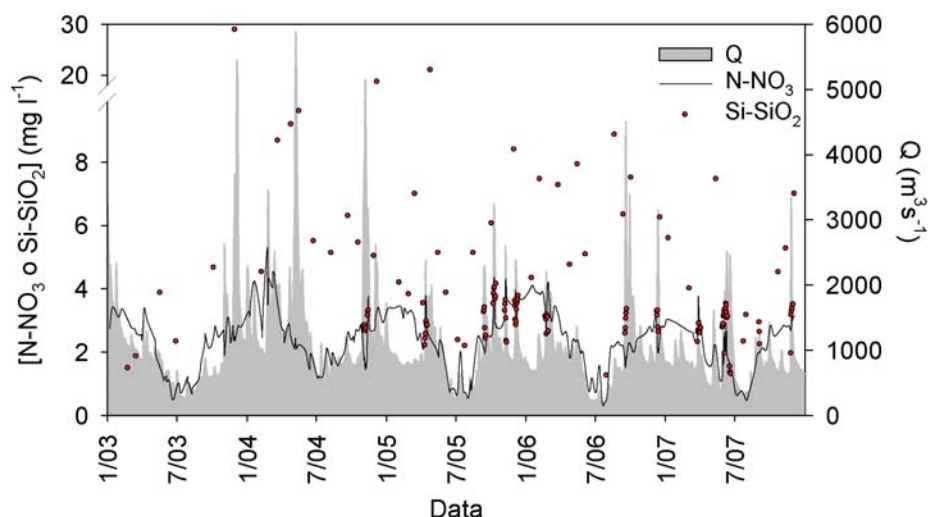


Fig. 5. Variazioni delle concentrazioni di nitrato (linea nera) e silice (cerchi) e delle portate medie giornaliere (Q, area grigia) a Pontelagoscuro dal 2003 al 2007.

Tab. I. Valori medi delle concentrazioni di fosforo reattivo solubile (SRP), fosforo totale (TP), azoto nitrico (NO_3^-) e azoto totale (TN). Sono riportati i valori medi annuali, del regime di piena e ordinario. Le medie annuali sono calcolate come media aritmetica dei dati disponibili (media totale, media piena, media ordinario), come media pesata sul tempo a cui è riferito ogni valore di concentrazione (TWMC: time-weighted mean concentration) e come media pesata sul carico idraulico (FWMC: flow-weighted mean concentration).

| | | SRP ($\mu\text{g L}^{-1}$) | | TP ($\mu\text{g L}^{-1}$) | | N- NO_3^- (mg L^{-1}) | | TN (mg L^{-1}) | |
|------|-----------------|------------------------------|----|-----------------------------|-----|---|-----|---------------------------|-----|
| | | media | ds | media | ds | media | ds | media | ds |
| 2003 | TWMC | 47 | | 138 | | 2,2 | | 3,3 | |
| | FWMC | 53 | | 165 | | 2,5 | | 3,8 | |
| | media totale | 48 | 24 | 290 | 269 | 2,2 | 0,7 | 3,7 | 1,5 |
| | media piena | 49 | 22 | 409 | 306 | 2,4 | 0,2 | 3,8 | 1,1 |
| | media ordinario | 46 | 25 | 141 | 79 | 2,1 | 0,9 | 3,5 | 2,7 |
| 2004 | TWMC | 53 | | 178 | | 2,6 | | 3,4 | |
| | FWMC | 56 | | 217 | | 2,8 | | 3,5 | |
| | media totale | 52 | 26 | 259 | 230 | 2,6 | 0,9 | 3,7 | 1,3 |
| | media piena | 52 | 25 | 376 | 286 | 2,7 | 1,0 | 4,0 | 1,4 |
| | media ordinario | 52 | 28 | 156 | 72 | 2,5 | 0,8 | 3,3 | 1,0 |
| 2005 | TWMC | 50 | | 199 | | 2,5 | | 3,1 | |
| | FWMC | 56 | | 248 | | 2,8 | | 3,5 | |
| | media totale | 58 | 27 | 323 | 269 | 2,9 | 0,9 | 3,9 | 1,5 |
| | media piena | 62 | 29 | 462 | 306 | 3,2 | 0,7 | 4,6 | 1,4 |
| | media ordinario | 51 | 23 | 169 | 62 | 2,4 | 1,0 | 3,0 | 1,5 |
| 2006 | TWMC | 58 | | 188 | | 2,4 | | 2,8 | |
| | FWMC | 60 | | 223 | | 2,6 | | 3,0 | |
| | media totale | 56 | 25 | 287 | 196 | 2,6 | 0,9 | 3,3 | 1,1 |
| | media piena | 52 | 27 | 473 | 193 | 2,7 | 0,9 | 3,7 | 1,0 |
| | media ordinario | 60 | 24 | 166 | 45 | 2,4 | 1,0 | 2,9 | 1,0 |
| 2007 | TWMC | 57 | | 182 | | 2,2 | | 2,6 | |
| | FWMC | 62 | | 211 | | 2,3 | | 2,8 | |
| | media totale | 60 | 19 | 292 | 259 | 2,3 | 0,7 | 3,1 | 1,0 |
| | media piena | 62 | 12 | 387 | 301 | 2,5 | 0,6 | 3,4 | 0,9 |
| | media ordinario | 54 | 27 | 156 | 46 | 2,0 | 0,8 | 2,3 | 0,9 |

gnano all'aumento della portata (Fig. 6). Il fosforo reattivo solubile (SRP) si mantiene invece ad un livello di *background* e non risente in modo apprezzabile delle variazioni di portata. In particolare, nei periodi di piena le concentrazioni del TP e del fosforo particellato (PP) sono fortemente correlate a quelle dei solidi sospesi totali (Fig. 7), al punto che la quasi totalità del TP è rappresentata dal PP (Fig. 8). Al contrario, durante gli eventi di piena le concentrazioni dell'azoto totale non presentano alcuna evidente relazione con i solidi sospesi totali (dati non riportati). Le concentrazioni del SRP non presentano variazioni interannuali di rilievo ($54 \pm 23 \mu\text{g P L}^{-1}$), né tantomeno si evidenziano differenze tra regime di piena e portate ordinarie. Le concentrazioni del TP sono invece da due a tre volte più elevate in condizioni di piena (Tab. I).

La stima dei carichi di azoto e fosforo è stata eseguita a partire dal 1999, ma il contributo degli eventi di piena è stato determinato solo a partire dal 2003. I carichi totali stimati per il periodo 1999-2002 sono riportati nella tabella II. Nella tabella III, oltre ai carichi totali, sono riportati anche i contributi dovuti alle piene per il periodo 2003-2007. In quest'ultimo periodo i carichi annui dell'azoto totale variano da 71512 a 156300 t y^{-1} e sono dovuti per più dell'83% ad azoto inorganico disciolto (DIN), a sua volta costituito per più del 92% da nitrato. I carichi di minore entità sono stati registrati dal 2005 al 2007, quando la portata annua del fiume si è notevolmente ridotta.

L'analisi dell'evoluzione temporale dei carichi evidenzia come quello azotato non sia dipendente dagli eventi di piena, ma sia direttamente correlato al carico

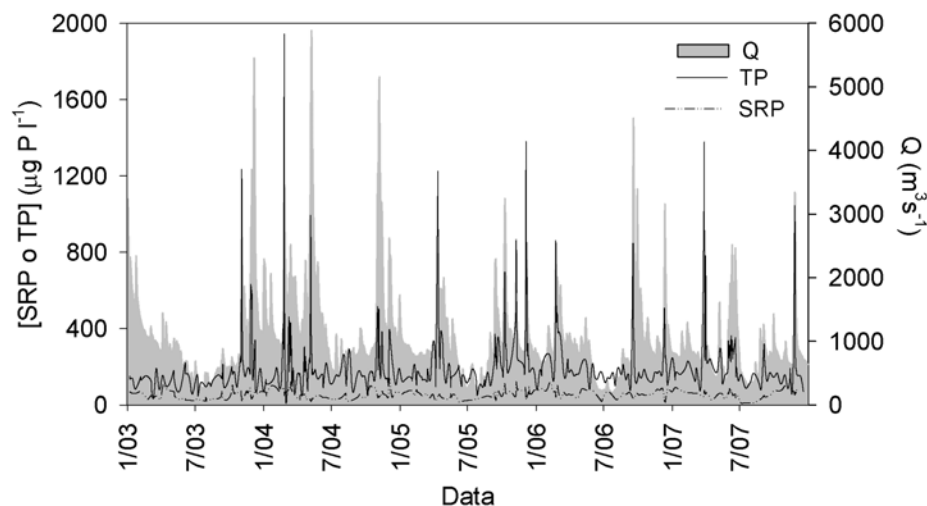


Fig. 6. Variazioni delle concentrazioni di fosforo totale (TP, linea continua) e fosforo reattivo (SRP, linea tratteggiata) e delle portate medie giornaliere a Pontelagoscuro (Q, area grigia) dal 2003 al 2007.

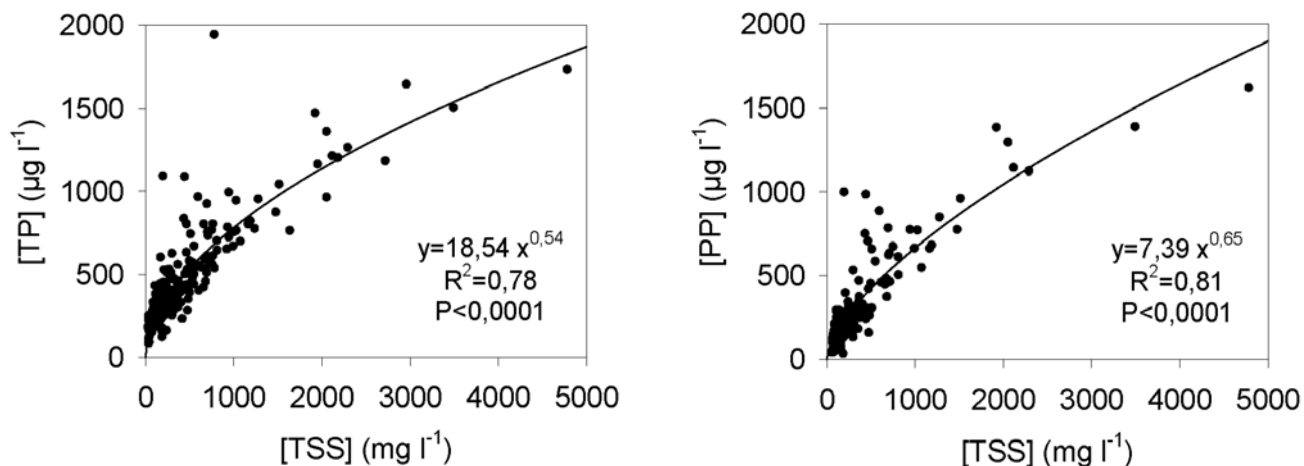


Fig. 7. Regressione tra solidi sospesi totali (SST) e fosforo totale (TP) per tutte le piene del periodo 2003-2007 e tra SST e fosforo particellato (PP) per le piene del periodo 2005-2007.

idraulico totale. Il contributo dovuto alle piene varia dall'11 al 27% ed è proporzionale al relativo carico idraulico (Tab. III).

I carichi annuali del TP sono compresi tra 5000 e 10000 t y⁻¹, in accordo con le stime dell'AdBPo (2006), e presentano una forte variabilità interannuale. Dal 2003 al 2007, anni caratterizzati da portate mediamente basse, le piene hanno apportato dal 25 al 40% del carico totale annuo del fosforo. In particolare, nel 2004 e nel 2005 le piene fluviali hanno contribuito al 38% e al 40% del carico annuale del TP. Va inoltre rilevato come gli eventi di piena abbiano breve durata, vale a dire che la maggior parte del carico è rilasciata in poche settimane. Per esempio, nel 2006 il 29% del carico del TP è stato rilasciato in soli 19 giorni, mentre nel 2005 il 40% è stato trasportato in 37 giorni.

L'andamento della silice reattiva disciolta è in larga

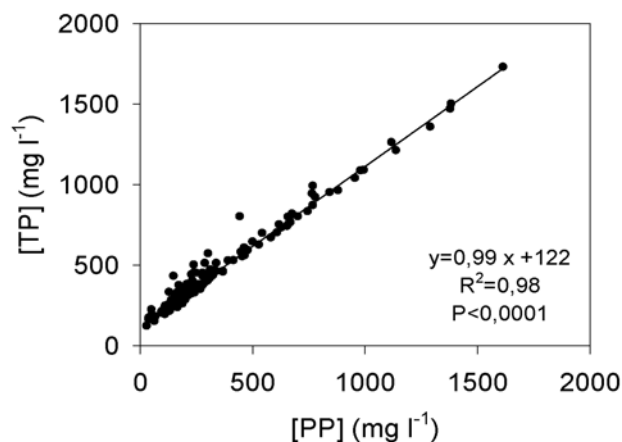


Fig. 8. Relazione tra fosforo totale (TP) e fosforo particellato (PP) durante tutti gli eventi di piena campionati nel periodo 2005-2007.

Tab. II. Volumi d'acqua transitati annualmente a Pontelagoscuro e relativi carichi annui di azoto e fosforo nel periodo 1999-2002.

| | Acqua (10 ⁹ m ³ y ⁻¹) | N-NH ₄ ⁺ (t y ⁻¹) | N-NO ₂ ⁻ (t y ⁻¹) | N-NO ₃ ⁻ (t y ⁻¹) | DIN (t y ⁻¹) | TN (t y ⁻¹) | SRP (t y ⁻¹) | TP (t y ⁻¹) |
|------|--|--|--|--|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1999 | 45,2 | 6093 | 1175 | 89129 | 96398 | 112682 | 3739 | 10238 |
| 2000 | 62,0 | 8750 | 1637 | 143237 | 153625 | 180723 | 2708 | 17056 |
| 2001 | 54,8 | 6248 | 1452 | 104395 | 112095 | 131816 | 2579 | 7708 |
| 2002 | 60,9 | 7690 | 1985 | 136874 | 146549 | 179701 | 3388 | 8382 |

Tab. III. Volumi d'acqua transitati annualmente a Pontelagoscuro e relativi carichi di azoto e fosforo nel periodo 2003-2007, con distinzione tra carichi di regime ordinario e di piena. Il carico dovuto alle piene è riportato anche come contributo percentuale (% piena) al carico totale annuo.

| | | Acqua (10 ⁹ m ³ y ⁻¹) | N-NH ₄ ⁺ (t y ⁻¹) | N-NO ₂ ⁻ (t y ⁻¹) | N-NO ₃ ⁻ (t y ⁻¹) | DIN (t y ⁻¹) | TN (t y ⁻¹) | SRP (t y ⁻¹) | TP (t y ⁻¹) |
|------|-------------------|--|--|--|--|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 2003 | totale | 32,3 | 3863 | 1128 | 81253 | 86244 | 101607 | 1762 | 5426 |
| | ordinario | 29,8 | 3492 | 992 | 75172 | 79655 | 90787 | 1649 | 4093 |
| | piena (18 giorni) | 2,6 | 371 | 137 | 6081 | 6589 | 10820 | 113 | 1333 |
| | % piena | 8 | 10 | 12 | 7 | 8 | 11 | 6 | 25 |
| 2004 | totale | 45,3 | 5695 | 1488 | 127118 | 134301 | 156300 | 2512 | 9334 |
| | ordinario | 36,3 | 4257 | 1104 | 104015 | 109377 | 122160 | 2082 | 5809 |
| | piena (31 giorni) | 9,1 | 1438 | 384 | 23102 | 24924 | 34139 | 429 | 3525 |
| | % piena | 20 | 25 | 26 | 18 | 19 | 22 | 17 | 38 |
| 2005 | totale | 29,7 | 3431 | 1015 | 82775 | 87222 | 102786 | 1674 | 7388 |
| | ordinario | 23,8 | 2363 | 693 | 63834 | 66890 | 74691 | 1298 | 4430 |
| | piena (37 giorni) | 5,9 | 1068 | 323 | 18941 | 20332 | 28095 | 376 | 2959 |
| | % piena | 20 | 31 | 32 | 23 | 23 | 27 | 22 | 40 |
| 2006 | totale | 29,1 | 3087 | 890 | 73966 | 77942 | 87650 | 1723 | 6326 |
| | ordinario | 25,1 | 2379 | 698 | 64119 | 67196 | 73799 | 1540 | 4465 |
| | piena (19 giorni) | 4,0 | 708 | 192 | 9847 | 10747 | 13851 | 183 | 1861 |
| | % piena | 14 | 23 | 22 | 13 | 14 | 16 | 11 | 29 |
| 2007 | totale | 26,3 | 1564 | 655 | 59215 | 61434 | 71512 | 1542 | 5453 |
| | ordinario | 21,2 | 1159 | 453 | 47326 | 48938 | 54896 | 1234 | 3502 |
| | piena (37 giorni) | 5,1 | 406 | 202 | 11889 | 12496 | 16616 | 308 | 1951 |
| | % piena | 19 | 26 | 31 | 20 | 20 | 23 | 20 | 36 |

misura sovrapposto a quello del nitrato. La maggior parte dei valori (70%) è compresa tra 2 e 4 mg Si L⁻¹, con alcuni valori particolarmente elevati in corrispondenza di eventi di piena importanti.

Rapporti stechiometrici

Gli eventi di piena determinano variazioni dei rapporti stechiometrici dei nutrienti. In condizioni di regime ordinario il rapporto molare tra azoto totale e fosforo totale varia da 35 a 49 (Tab. IV), in accordo con i valori rilevati nel periodo 1988-1996, compresi tra 44 e 58 (PROVINI e BINELLI, 2006), mentre sono superiori a quelli rilevati fino al 1984 (Tab. V, MARCHETTI *et al.*, 1989). I carichi di piena hanno invece un rapporto nettamente inferiore, nell'intervallo 16-21, che è prossimo a quello di Redfield per la crescita bilanciata del fitoplancton (N:P = 16:1). A partire dal 2005 sono stati considerati anche i carichi della silice reattiva disciolta, per cui è possibile stimare i rapporti Si:N e Si:P differenziati per i regimi ordinario e di piena (Tab. V). In condizioni di portate ordinarie si hanno rapporti Si:N bilanciati per la crescita delle diatomee (Si:N = 1), mentre il fosforo sembra essere il principale fattore limitante. Durante le piene si ha limitazione sia da silice che da fosforo, mentre l'azoto non sembra essere limitante.

DISCUSSIONE

La diminuzione delle portate che si è verificata a partire dal 2000 deve essere attentamente valutata nel quadro dell'evoluzione a lungo termine del sistema idrografico padano, in relazione alle pressioni locali e agli scenari del cambiamento su scala globale (IPCC,

2007; TIBALDI *et al.* in questo volume). Pur tenendo conto della grande variabilità a cui è soggetto il sistema idrografico del Po, per cui non è possibile individuare alcuna tendenza evolutiva sulla base di serie temporali troppo brevi, l'analisi dei dati di portata del periodo 1991-2007 ha prodotto risultati coerenti con quelli dello studio di ZANCHETTIN *et al.* (2008), che analizzando le portate degli ultimi 200 anni ha evidenziato una ricorrente variabilità stagionale del regime idrologico; a partire dall'inizio del XX secolo sono però progressivamente aumentate le differenze tra portate di piena e

Tab. IV. Confronto dei rapporti molari tra azoto totale e fosforo totale calcolati per i carichi totali annuali e distintamente per il periodo ordinario e gli eventi di piena dal 2003 al 2007.

| | Rapporto N:P | | | | |
|-----------|--------------|------|------|------|------|
| | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
| totale | 41 | 37 | 31 | 31 | 29 |
| ordinario | 49 | 47 | 37 | 37 | 35 |
| piena | 18 | 21 | 21 | 16 | 19 |

Tab. V. Confronto dei rapporti molari medi dei carichi transitanti nella stazione di Pontelagoscuro dal 2005 al 2007 con quelli del periodo 1968-1984 (MARCHETTI *et al.*, 1989, JUSTI *et al.*, 1995, BILLEN e GARNIER, 2007).

| | 1968-1984 | 2005-2007 | |
|------|-----------|-----------|----------|
| | totale | ordinario | piena |
| N:P | 20,5 | 36,3±1,2 | 18,5±2,5 |
| Si:N | 0,8 | 1,1±0,2 | 0,4±0,0 |
| Si:P | 16,3 | 38,4±0,8 | 10,1±1,1 |

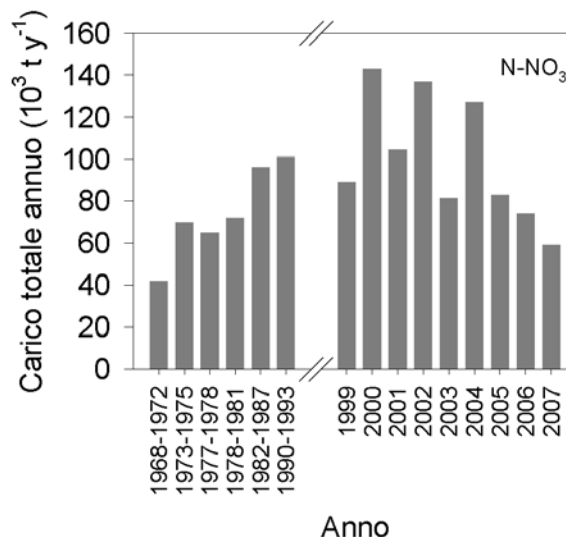
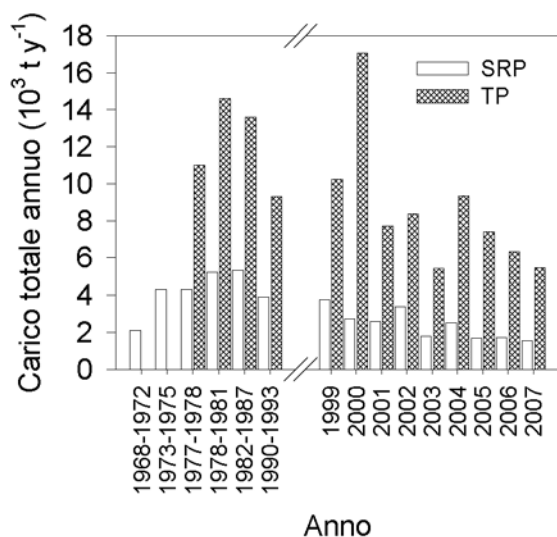


Fig. 9. Confronto dei carichi misurati dal 1968 al 1993 (PROVINI *et al.*, 1992; PROVINI e BINELLI, 2006) e nel presente studio (1999-2007). Nel grafico a sinistra sono riportati i carichi di fosforo reattivo solubile (SRP) e fosforo totale (TP), in quello a destra i carichi di azoto nitrico.

di magra. In particolare questi autori rilevano come negli ultimi 90 anni si siano verificate cinque magre estreme, delle quali ben tre sono avvenute tra il 2003 e il 2006. Queste proprietà divengono importanti in un sistema acquatico nel momento in cui influiscono su capacità di ritenzione idrica, tempi medi di ritorno degli eventi, possibilità di laminazione degli eventi di piena e caratteristiche delle magre. La crescente incidenza di eventi estremi può avere profondi impatti, oltre che sul corso d'acqua, anche sulla fascia marina di transizione e sull'area terrestre del delta. Ne è un chiaro esempio la risalita del cuneo salino che dal 2003 ad oggi ha più volte raggiunto i 20-25 km verso monte nei rami del delta del Po (ANGONESE, 2006).

In media, i carichi di SRP e di TP del periodo 1999-2007 risultano inferiori a quelli del periodo 1968-1993 (Fig. 9). Se si esclude l'anno 2000, caratterizzato da una piena storica, si osserva un picco a metà degli anni '70 del secolo scorso e, successivamente, una graduale diminuzione con valori minimi negli ultimi anni più secchi. I carichi annuali del fosforo totale calcolati per il periodo 2003-2007 sono compresi tra 5000 e 10000 t y⁻¹, in accordo con quanto riportato nel piano stralcio per il controllo dell'eutrofizzazione dell'Autorità di Bacino del Po e da PROVINI e BINELLI (2006).

I carichi dell'azoto nitrico, che è la forma azotata prevalente, presentano invece una certa variabilità solo in parte associata alle variazioni del regime idrologico (Fig. 9). Infatti, se da un lato i carichi di azoto più elevati sono determinati negli anni con i carichi idraulici maggiori, dall'altro è da notare come in anni con portate equivalenti i carichi azotati possono risultare anche molto diversi (es. 2005 e 2007).

A differenza delle forme inorganiche dell'azoto, che sono altamente idrosolubili e vengono trasportate in forma disciolta in colonna d'acqua, per il fosforo si

riscontra una forte dipendenza dal trasporto in fase solida. In particolare, nei periodi di piena le concentrazioni del TP e del fosforo particellato (PP) sono fortemente correlate con quelle dei solidi sospesi totali (SST) a dimostrazione che, nella colonna d'acqua, il trasporto del fosforo è regolato soprattutto dalla fase solida in sospensione e che questa risente in larga misura degli eventi di piena e/o delle forti variazioni di portata. La relazione si fa più chiara e robusta ad elevate concentrazioni di SST, verosimilmente durante gli eventi di piena quando il trasporto solido è molto intenso.

I carichi annuali totali del fosforo sono significativamente correlati ($r = 0,943$, $p < 0,001$) con i carichi veicolati dalle piene (Fig. 10). L'equazione della retta di regressione del carico totale (Y) in funzione del carico di piena (X) ha intercetta $Y_0 = 2764 \pm 865$ e pendenza $b = 1,73 \pm 0,35$. In particolare, si osserva che l'intercetta potrebbe rappresentare una sorta di valore di fondo assimilabile al background del sistema in assenza di fenomeni meteorici significativi. I carichi di piena e totali dell'azoto non sono invece correlati.

Quote comprese tra il 20 ed il 40% del carico totale annuo del fosforo sono rilasciate in tempi molto brevi, compresi tra i 18 e i 37 giorni e si configurano come una sorta di "flash loading". Una velocità così elevata del rilascio del carico è associata al trasporto soprattutto della componente particellata sospesa nella massa d'acqua, che negli eventi di piena più consistenti è costituita per circa il 50% da materiale organico refrattario e per un ulteriore 30-35% dalle componenti inorganiche legate al calcio, che sono particolarmente insolubili (GIORDANI *et al.*, in questo volume) e quindi non immediatamente biodisponibili.

La diversa evoluzione temporale dei carichi di azoto e fosforo, congiuntamente con quello della silice reattiva che non è stata analizzata in modo approfondito in

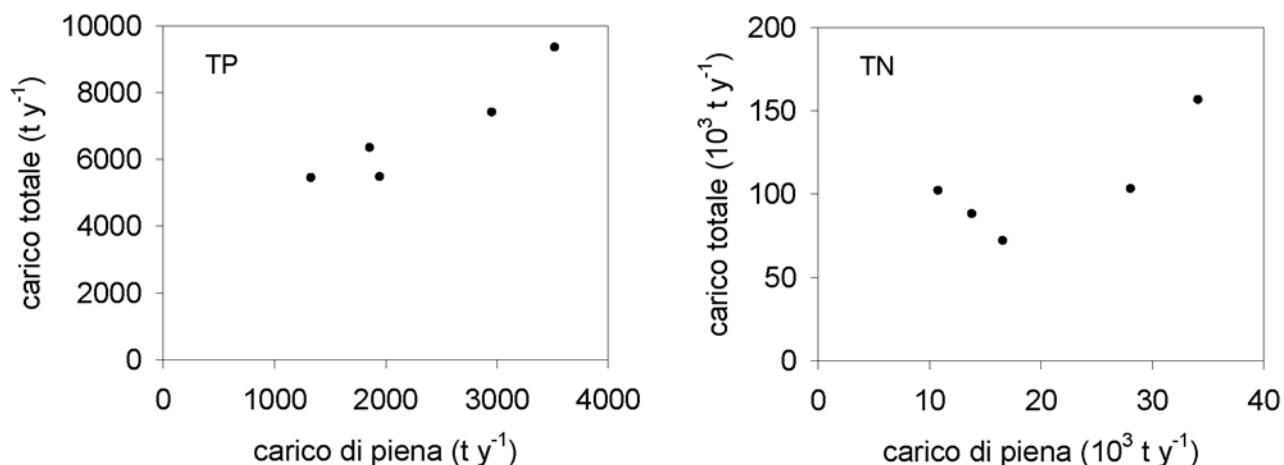


Fig. 10. Relazione tra i carichi di piena ed il carico totale annuo di fosforo e azoto totali.

questo studio, potrebbe avere effetti rilevanti sullo sviluppo delle comunità algali e della produttività primaria nella fascia marina costiera più direttamente influenzata dagli apporti del Po.

L'incidenza dei nutrienti rilasciati dal Po è stata valutata anche in studi precedenti. DEGOBBIS e collaboratori (2000; 2005) hanno evidenziato una correlazione tra la comparsa di mucillagine nell'area costiera più prossima alla foce del Po e la diminuzione del carico del fosforo. In particolare, il notevole aumento del rapporto DIN/DIP sembra favorire l'escrezione di composti polisaccaridici ad opera di specie sia del fitoplancton che del microfitobentos e, in parallelo, la carenza di P sembra limitare la degradazione batterica degli essudati. La variazione del rapporto stechiometrico di N e P è amplificata durante gli eventi di piena, per effetto soprattutto della componente particellata che è rintracciabile nelle sequenze stratigrafiche del sedimento (MISEROCCHI *et al.*, 2007). Variazioni dei rapporti stechiometrici tra regime ordinario e regime di piena possono avere effetti sulla selezione dei popolamenti algali sia nel corso d'acqua che nella fascia marina adiacente. Nella zona marina, in particolare, l'arricchimento in azoto potrebbe favorire la crescita di macroalghe nitrofile, mentre l'eccesso di fosforo potrebbe stimolare fioriture di alghe tossiche (BILLEN e GARNIER, 2007).

In definitiva, variazioni significative del regime idrologico fluviale, sia come entità che come durata e frequenza degli eventi estremi, possono avere effetti rilevanti sui carichi e, a cascata, sugli ecosistemi di transizione e marini costieri adiacenti (FLEMER e CHAMP, 2006).

In anni particolarmente secchi, una parte consistente del carico del fosforo è rilasciata in tempi brevi ed è in gran parte costituita da forme insolubili e poco reattive. Ciò significa che il fosforo può diventare un fattore limitante o addirittura critico, soprattutto nei periodi di magra prolungata. Questo aspetto dovrà

essere considerato con attenzione nel contesto del cambiamento climatico (TIBALDI *et al.* in questo volume).

Il carico dell'azoto è invece relativamente indipendente dal regime idrologico ed è particolarmente reattivo, in quanto costituito soprattutto dalla forma nitrica. Le trasformazioni del carico azotato lungo il corso d'acqua non sono state considerate in questo studio, ma risultati di ricerche sul ciclo dell'azoto in alcuni tributari e nel reticolo idrografico minore del Po sono presentati in questo volume da NIZZOLI *et al.*, PINARDI *et al.* e RACCHETTI *et al.* Sulla base di queste indagini si sottolinea come i processi che avvengono nella colonna d'acqua contribuiscono alle trasformazioni dell'azoto solo quando aumenta il materiale particellato in sospensione; deve essere più attentamente valutato il ruolo della produzione primaria in relazione al regime idrologico. I processi bentonici possono avere una notevole incidenza sul controllo del carico azotato, i tassi più elevati si verificano, però, nelle aree di ristagno o di bassa velocità della corrente e in presenza di concentrazioni elevate della sostanza organica. Le forme di fondo e le aree laterali assumono quindi un ruolo importante nel controllo del ciclo dell'azoto. Questi processi ed i fattori di regolazione ad essi associati sono, in definitiva, legati ad idrologia e morfologia. In particolare la loro efficacia tende a diminuire al crescere della rettificazione e dell'incisione degli alvei che determinano una banalizzazione delle forme di fondo e la scomparsa delle zone di contatto laterali.

Questi aspetti dovranno essere riconsiderati analizzando le trasformazioni, la speciazione e i rapporti stechiometrici dei nutrienti. Di particolare interesse è certamente la silice reattiva disciolta, che in questo studio è stata considerata solo marginalmente, ma la cui carenza può provocare la scomparsa delle diatomee a vantaggio di alghe flagellate e coccolitofori, con reazioni a cascata lungo la rete trofica marina (HUMBORG *et al.*, 1998).

BIBLIOGRAFIA

- ADBPO, 2006. *Caratteristiche del bacino del fiume Po e primo esame dell'impatto ambientale delle attività umane sulle risorse idriche*. Autorità di bacino del fiume Po, Parma: 643 pp.
- ADBPO, 2009. *Piano di Gestione nel distretto idrografico del fiume Po* (<http://www.adbpo.it/on-multi/ADBPO/Home/PianodiGestioneepartecipazionepubblica.html>).
- ALLODI A., PECORA S., 2003. Sulla magra invernale del fiume Po nell'anno 2002. *L'Acqua*, 4: 23-32.
- ANGONESE G.A., 2006. *Gestione Sacca di Goro e monitoraggio delle acque lagunari e marine*. Provincia di Ferrara, Servizio
- Risorse idriche e tutela ambientale, UOPC Acque costiere ed economia ittica. <http://www.dittypoint.org/Article/Angonese.pdf>.
- APAT, 2003. *Metodi analitici per le acque*. Rapporti 29: 1153 pp.
- APHA, AWWA, WEF, 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*: 20th Ed. Washington, DC.
- BERTONATI M., IOANNILLI E., 1992. Comportamento dei nutrienti e di altri parametri idrochimici in funzione del regime idrologico e conseguenze metodologiche per la valutazione degli apporti al mare Adriatico. In: *Atti del Convegno 'La*

- qualità delle acque del fiume Po negli anni '90*, Quad. Ist. Ric. Acque 92.
- BILLEN G., GARNIER J., 2007. River basin nutrient delivery to the coastal sea: Assessing its potential to sustain new production of non-siliceous algae. *Marine Chemistry*, **106**: 148-160.
- CLOERN J.E., 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, **210**: 223-253.
- DE WIT M., BENDORICCHIO G., 2001. Nutrient fluxes in the Po basin. *Science of the Total Environment*, **273**: 147-161.
- DEGOBBIS D., PRECALI R., IVANCIC I., SMOĐLAKA N., FUX D., KVEDER S., 2000. Long-term changes in the northern Adriatic ecosystem related to anthropogenic eutrophication. *International Journal of Environment and Pollution*, **13**: 495-533.
- DEGOBBIS D., PRECALI R., FERRARI C.R., DJAKOVAC T., RINALDI A., IVANCIC I., GISMONDI M., SMOĐLAKA N., 2005. Changes in nutrient concentration and ratios during mucilage events in the period 1999-2002. *Science of the Total Environment*, **353**: 103-114.
- DODDS W.K., COLE J.J., 2007. Expanding the concept of trophic state in aquatic ecosystems. It's not just the autotrophs. *Aquatic Sciences*, **69**: 427-439.
- FLEMER D.A., CHAMP M.A., 2006. What is the future of estuaries given nutrient over-enrichment, freshwater diversion and low flows? *Marine Pollution Bulletin*, **52**: 247-258.
- GIORDANI G., VIAROLI P., SWANEY D.P., MURRAY C.N., ZALDIVAR J.M., MARSHALL CROSSLAND J.I., 2005. Nutrient fluxes in transitional zones of the Italian coast. *LOICZ Reports & Studies* No. 28., LOICZ, Texel, the Netherlands, 158 pp.
- HESSEN D.O., 1999. Catchment properties and the transport of major elements to estuaries. *Advances in Ecological Research*, **29**: 1-41.
- HUMBORG C., ITTEKOT V., COCIASU A., VON BODUNGEN B., 1998. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386**: 385-388.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007. *Fourth Assessment Report – Climate Change 2007*. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge and New York: 996 pp.
- JUSTI D., RABALAIS N.N., TURNER R.E., DORTCH Q., 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters, stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **40**: 339-356.
- MARCHETTI R., 1993. Problematiche ecologiche del sistema idrografico padano. *Acqua e Aria*, 6-7.
- MARCHETTI R., VERNA N., 1992. Quantification of the phosphorus and nitrogen loads in the minor rivers of the Emilia-Romagna coast (Italy). A methodological study on the use of theoretical coefficients in calculating the loads. In: Vollenweider R.A., Marchetti R., Viviani R., (eds). Marine Coastal Eutrophication. *Science of the Total Environment; Suppl.*: 315-336.
- MARCHETTI R., PROVINI A., CROSA G., 1989. Nutrient loads carried by the river Po into the Adriatic Sea, 1968-1987. *Marine Pollution Bulletin*, **20**: 168-172.
- MAZZARELLA A., RAPETTI F., 2004. Scale-invariance laws in the recurrence interval of estreme floods: an application to the upper Po river valley (northern Italy). *Journal of Hydrology*, **288**: 264-271.
- MEYBECK M., 2002. Riverine quality at the Anthropocene: propositions for global space and time analysis, illustrated by the Seine River. *Aquatic Sciences*, **64**: 376-393.
- MEYBECK M., 2004. The Global Change of continental aquatic systems: dominant impacts of human activities. *Water Science and Technology*, **49**: 73-83.
- MISEROCCHI S., LANGONE L., TESI T., 2007. Content and isotopic composition of organic carbon within a flood layer in the Po river prodelta (Adriatic Sea). *Continental Shelf Research*, **27**: 338-358.
- NEDWELL D., RAFFAELLI D. (eds.), 1999. *Estuaries*. Academic Press, London and San Diego: 306 pp.
- PALMERI L., BENDORICCHIO G., ARTIOLI Y., 2005. Modelling nutrient emissions from river systems and loads to the coastal zone: Po River case study, Italy. *Ecological Modelling*, **184**: 37-53.
- PENNA N., CAPELLACCI S., RICCI F., 2004. The influence of the Po river discharge on phytoplankton bloom dynamics along the coastline of Pesaro (Italy) in the Adriatic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **48**: 321-326.
- PROVINI A., BINELLI A., 2006. Environmental quality of the Po River delta. In: Wangersky P.J. (ed.) *The handbook of environmental chemistry* Volume 5, Part H Estuaries. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg: 175-195.
- PROVINI A., CROSA G., MARCHETTI R., 1992. Nutrient export from the Po and Adige river basins over the last 20 years. In: Vollenweider R.A., Marchetti R., Viviani R., (eds). Marine Coastal Eutrophication. *Science of the Total Environment; Suppl.* 291-314.
- SPILLMAN C.M., IMBERGER J., HAMILTON D.P., HISPEY M.R., ROMERO J.R., 2007. Modelling the effects of Po river discharge, internal nutrient cycling and hydrodynamics on biogeochemistry of the Northern Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, **68**: 167-200.
- TARTARI G., MILAN C., ELLI M., 1992. Idrochimica dei nutrienti. In: *Atti del Convegno 'La qualità delle acque del fiume Po negli anni '90'*, Quaderni IRSA 92.
- TAYLOR W., 2000. *Change-point analyzer 2.0 shareware program*. Taylor Enterprises, Libertyville, Illinois. Disponibile all'indirizzo: <http://www.variation.com/cpa>.
- TESI T., MISEROCCHI S., GONI M.A., LANGONE L., BOLDRIN A., TURCHETTO M., 2007. Organic matter origin and distribution in suspended particulate materials and surficial sediments from the western Adriatic Sea (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **73**: 431-446.
- VOLLENWEIDER R.A., 1992. Coastal Marine Eutrophication: principles and controls. In: Vollenweider R.A., Marchetti R., Viviani R., (eds). Marine Coastal Eutrophication. *Science of the Total Environment; Suppl.*: 1-20.
- WHEATCROFT R.A., STEVENS A.W., HUNT L.M., LEWIS R.C., 2006. The distribution and internal geometry of the October 2000 Po River flood deposit: digital X-radiographic evidence. *Continental Shelf Research*, **26**: 499-516.
- ZANCHETTIN D., TRAVERSO P., TOMASINO M., 2008. Po river discharge: a preliminary analysis of a 200 year time series. *Climatic Change*, **89**: 411-433.