

Figura 2.1.56. Mappe del bacino del Lago di Pusiano in cui vengono indicati i 5 sottobacini considerati nella modellizzazione del carico diffuso (a sinistra) e del carico puntiforme (a destra) con indicazione dei punti di sezione di chiusura (pallini bianchi nei due grafici) e degli scolmatori fognari attivi in tempo asciutto (quadrati viola e bianchi nel grafico a destra).

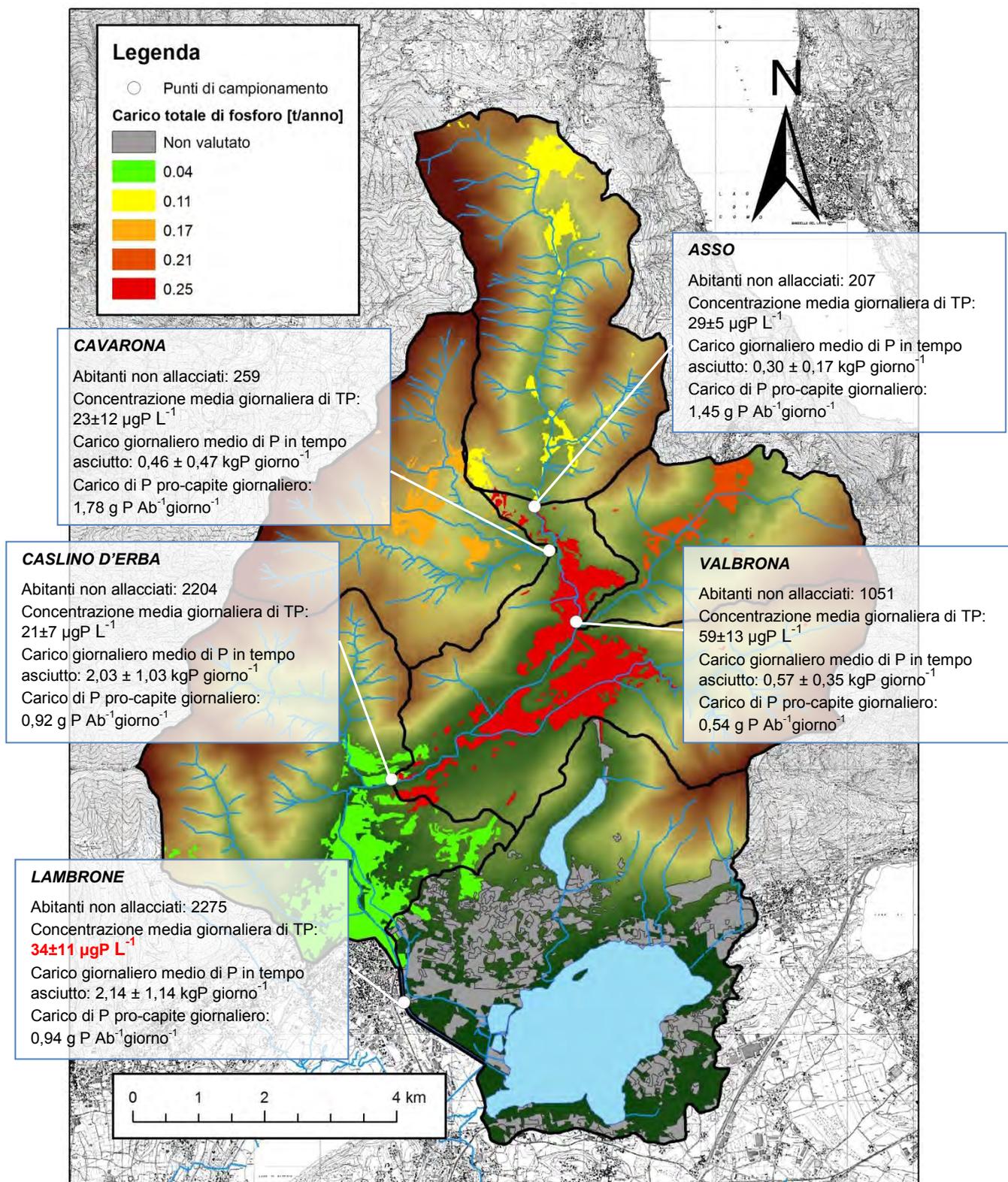


Figura 2.1.57. Mappa del bacino del Lago di Pusiano in cui vengono indicati i 5 sottobacini considerati nella modellazione del carico diffuso e segnalati i punti di sezione di chiusura (punti bianchi). I riquadri riiepilogano, per ogni sottobacino, il numero di utenze non allacciate, la concentrazione media giornaliera di fosforo totale, il carico medio giornaliero ed il carico giornaliero pro-capite di fosforo.

Per ogni sottobacino considerato è stato calcolato il carico totale diffuso moltiplicando la concentrazione di TP, misurata in laboratorio in ciascun campione “puntuale” prelevato in condizioni di tempo asciutto e considerato come rappresentativo dell’intera giornata, per la corrispondente portate media giornaliera simulata con SWAT . Come si può vedere in Figura 2.1.57 e nella Tabella 2.1.17 complessivamente nel bacino il carico totale diffuso di fosforo calcolato in tempo asciutto tende ad aumentare progressivamente spostandosi dalle sezioni a monte verso quelle a valle, con un valore medio che è massimo nel punto di chiusura del bacino del Lambrone a Erba (2,14 kg d⁻¹). Successivamente, sulla base del numero totale di abitanti non allacciati alla rete fognaria in ogni sezione (Tabella 2.1.17), ottenuto sommando il numero dei non allacciati di tutti i comuni ricadenti in ciascun sottobacino, è stato possibile calcolare il carico diffuso giornaliero pro capite nelle 5 sezioni, i cui valori sono riportati in Tabella 2.1.17. Per il calcolo del numero totale degli abitanti non collegati in ogni sezione, ricordiamo che il bacino con sezione di chiusura ad Asso, comprende i comuni di Magreglio, Barni, Lasnigo e Sormano, mentre il bacino con sezione di chiusura a Cavarona è rappresentato dai comuni di Caglio e Rezzago; nel bacino con sezione di chiusura a Caslino d’Erba gravano invece i comuni di Magreglio, Barni, Lasnigo, Sormano, Caglio, Rezzago, Asso, Canzo, Valbrona e Castelmarte; infine il bacino con sezione di chiusura a Valbrona comprende solamente una parte del comune di Valbrona, quindi non tutti gli abitanti ricadono in questo bacino. Andando a confrontare i valori ottenuti nelle diverse sezioni, si può notare che nel bacino con sezione di chiusura a Valbrona è risultato il carico più basso, pari a 0,54 gP d⁻¹ ab⁻¹, mentre il carico più alto si è ottenuto a Cavarona 1,78 (gP d⁻¹ ab⁻¹). Testimonianze fotografiche raccolte durante l’intensa attività di censimento degli scolmatori fognari nel bacino condotta nel Progetto PIRoGA (Ricchiuti, 2011) provano che nei bacini di Asso, Caslino d’Erba, Lambrone e Cavarona siano presenti degli scolmatori risultati attivi anche in condizioni di tempo asciutto, che verosimilmente contribuiscono al carico di fosforo calcolato in assenza di pioggia (Fig. 2.1.58).



Figura 2.1.58. Scolmatore di Ponte Lambro (a sinistra) e di Caglio (a destra) attivi anche in tempo asciutto.

Considerando che invece nella sezione di Valbrona non si è avuta, ad oggi, alcuna evidenza di scolmatori attivi in tempo asciutto, si può quindi assumere che il valore del carico pro capite

giornaliero risultato a Valbrona, riconducibile solamente agli abitanti non allacciati alla rete di collettamento, sia il valore del carico di fosforo generato a persona da considerare per tutto il bacino, laddove i valori superiori riscontrati nelle altre sezioni sono sovrastimati poiché includono anche il contributo degli scolmatori attivi. Questa assunzione permette di calcolare, per ciascun sottobacino, il carico diffuso dovuto agli abitanti non allacciati totali moltiplicandoli per il valore minimo di $0,54 \text{ gP ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$, ottenendo così i valori riportati nella Tabella 2.1.17. Invece, per potere definire il carico diffuso di fosforo dovuto ai non allacciati per ogni singola sezione, bisogna sottrarre il contributo dei carichi delle sezioni poste a monte; pertanto per le sezioni di Caslino d'Erba e Lambrone i valori risultano più bassi rispetto al dato iniziale (perché non vengono considerati i carichi generati complessivamente nelle sezioni di Asso, Valbrona e Cavarona nel primo caso, e di Asso, Valbrona, Cavarona, e Caslino nel caso della sezione del Lambrone). Conoscendo il carico diffuso totale, dovuto sia agli abitanti non allacciati sia agli scolmatori attivi anche in condizioni di tempo asciutto, e il carico diffuso riconducibile solo agli abitanti non allacciati, è possibile stimare il carico dovuto agli scolmatori attivi in tempo asciutto (Tab. 2.1.17). Considerando distintamente le diverse sezioni, questo risulta nullo nella sezione di Valbrona, per quanto detto sopra (nessuna evidenza di scolmatori attivi in tempo asciutto), mentre i valori più alti intorno a $0,3 \text{ kgP d}^{-1}$ sono relativi alle sezioni di Cavarona e Caslino, in cui sono presenti numerosi scolmatori di cui alcuni potrebbero attivarsi in tempo asciutto. Nella sezione di chiusura del Lambrone a Erba si ha invece il valore minimo, inferiore a $0,1 \text{ kgP d}^{-1}$: va ricordato che nel tratto da Caslino al punto di chiusura a Erba sono presenti pochi scolmatori, in quanto quelli ricadenti nel comune di Erba sono per lo più gravanti sulla derivazione della Roggia Molinara (vedere mappe di Fig.2.1.18, Fig.2.1.20, Fig.2.1.21). Il carico diffuso può essere tuttavia calcolato anche sulla base del valore teorico procapite giornaliero di carico di fosforo pari a $1,86 \text{ gP ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (carico procapite simile a quello utilizzato in altri studi quali $1,6 \text{ gP d}^{-1}$ (Salerno et al., 2006) e $1,89 \text{ gP d}^{-1}$ (Gilmour et al., 2008)) riportato in letteratura (Demars et al., 2005), moltiplicato per il numero degli abitanti non allacciati. I valori così calcolati per ogni sottobacino sono riportati in Tabella 2.1.17, e consentono di affermare che il carico diffuso dovuto agli abitanti non allacciati ottenuto sperimentalmente rappresenta il 29% del carico totale teorico.

Tabella 2.1.17. Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per ogni sottobacino del Lago di Pusiano considerato.

| | Bacino Asso | Bacino Cavarona | Bacino Valbrona | Bacino Caslino d'Erba | Bacino Lambrone |
|---|-------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| Carico totale diffuso (kg P d ⁻¹) | 0,30 | 0,46 | 0,57 | 2,03 | 2,14 |
| Dev.standard carico diffuso totale tempo asciutto | 0,17 | 0,47 | 0,35 | 1,9 | 1,4 |
| Abitanti non allacciati | 207 | 259 | 1051 | 2204 | 2275 |
| Carico pro capite(g P Ab ⁻¹ d ⁻¹) | 1,45 | 1,78 | 0,54 | 0,92 | 0,94 |
| Carico diffuso dovuto agli abitanti non allacciati (kg P d ⁻¹)(considerando carico minimo a persona di 0.54 g P d ⁻¹) | 0,11 | 0,14 | 0,57 | 1,19 | 1,23 |
| Carico TP dovuto agli abitanti non allacciati per sezione (kg P d ⁻¹) | 0,11 | 0,14 | 0,57 | 0,37 | 0,04 |
| Carico dovuto agli scolmatori sezione (kg P d ⁻¹) | 0,19 | 0,32 | 0,00 | 0,84 | 0,91 |
| Carico dovuto agli scolmatori per sezione (kg P d ⁻¹) | 0,19 | 0,32 | 0,00 | 0,33 | 0,07 |
| Carico diffuso teorico (kg P d ⁻¹) (calcolato in base al carico teorico diffuso di 1.8 g P Ab ⁻¹ d ⁻¹) | 0,39 | 0,48 | 1,96 | 4,10 | 4,23 |

La Figura 2.1.58 presenta il grafico riepilogativo che mette a confronto, per i 5 sottobacini considerati, il carico totale in condizioni di tempo asciutto (dovuto sia agli abitanti non allacciati sia agli scolmatori attivi), il carico diffuso dovuto agli abitanti non allacciati (origine diffusa) e il carico da ricondurre agli scolmatori attivi in tempo asciutto (origine puntiforme) e mette in evidenza come i carichi di fosforo in tempo asciutto tendano ad aumentare progressivamente da monte a valle e siano quindi superiori nei sottobacini di Caslino d'Erba e Lambrone.

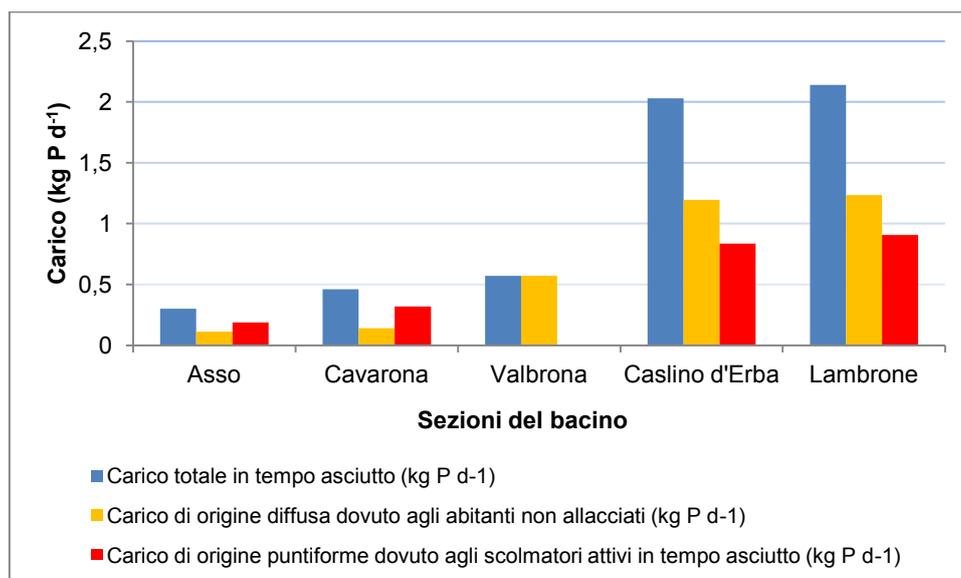


Figura 2.1.58. Rappresentazione grafica dei carichi di fosforo in tempo asciutto, di origine diffusa e puntiforme (kgP d⁻¹) calcolati per le sezioni di Asso, Cavarona, Valbrona, Caslino d'Erba e Lambrone.

2.1.8.2 Caratterizzazione del carico di fosforo in tempo di pioggia

Analogamente a quanto fatto per la sezione del Gajum, anche per il Lambrone i dati acquisiti in continuo con la sonda e i dati idrochimici misurati in laboratorio sui campioni prelevati durante i tre campionamenti intensivi monitorati (a febbraio, marzo, novembre 2011), sono stati analizzati unitamente con l'obiettivo di individuare, tra queste variabili chimico-fisiche, il/i possibile/i predittori per la stima delle concentrazioni di fosforo.

A tale scopo, una prima analisi ha riguardato il confronto degli andamenti delle concentrazioni di fosforo totale (TP) rispetto sia alle diverse condizioni di regime idrologico (portata) e pluviometrico (precipitazioni) (Figura 2.1.59) sia alla torbidità (Figura 2.1.60) nei tre eventi precipitativi, come illustrato nei seguenti grafici.

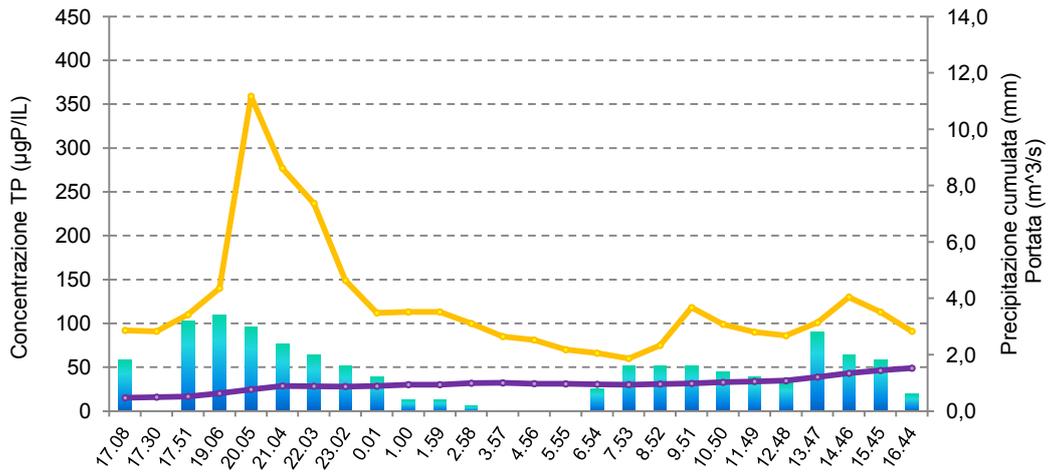
Rispetto alla precipitazione cumulata e alla variazione di portata, si può notare che mentre negli eventi di febbraio e marzo (Fig 2.59 - grafici a e b) la portata, pur aumentando per via della precipitazione, si è mantenuta comunque intorno a valori mediamente piuttosto bassi e inferiori a 1 m³/s, (rispettivamente 0,95±0,25 e 0,78±0,08 m³/s), mentre a novembre (Fig 2.1.59 - grafico c) si è passati da una portata iniziale molto bassa (<1 m³/s) sino a valori massimi intorno a 12,5 m³/s, con un valore medio durante l'evento di 7,68±3,01 m³/s.

Inoltre, rispetto al primo picco di precipitazione, il primo valore di massima concentrazione di TP si è misurato ad una distanza di circa 1-2 ore, mentre l'aumento della portata, in tutti e tre gli eventi, ha cominciato a verificarsi già dall'inizio dell'evento, raggiungendo a febbraio e a marzo un primo picco all'incirca nello stesso momento in cui si è misurata la massima concentrazione di TP (Fig 2.1.60 – grafici a e b), mentre a novembre la massima portata si è osservata in corrispondenza del secondo picco di concentrazione di TP (Fig.2.1.60- grafico c).

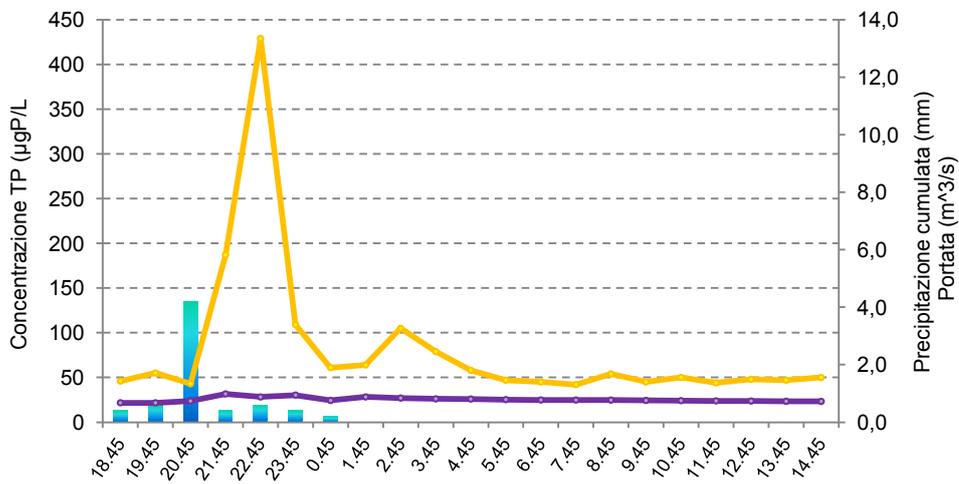
Dai grafici in Figura 2.1.60, invece, è evidente che in generale l'andamento della concentrazione di TP segue abbastanza quello della torbidità in tutti e tre gli eventi, anche se, nella fase iniziale, a febbraio e soprattutto a novembre il primo picco di concentrazione di TP precede di un'ora quello di torbidità, laddove a marzo si osserva una sincronia tra i picchi. Osservando la parte iniziale dei tre eventi nei grafici di Figura 2.1.60, che come appena descritto sopra sono stati caratterizzati da diverse condizioni idrologiche e pluviometriche (Fig. 2.1.59), si noti che mentre le concentrazioni massime di TP raggiunte sono sempre intorno ai 350-400 $\mu\text{gP L}^{-1}$, i massimi valori di torbidità sono tuttavia piuttosto bassi sia a febbraio (<40 NTU) sia a marzo (circa 20 NTU), laddove a novembre si raggiunge una torbidità circa 5-10 volte superiore (circa 200 NTU).

Analizzando i tre eventi precipitativi in termini di variazioni del carico di fosforo, calcolato sulla base delle portate osservate e delle concentrazioni di TP misurate, per il periodo campionato intensivamente, si è osservato che il carico totale generato negli eventi di febbraio e marzo è stato rispettivamente di 11 kgP in 26 ore e 5 kgP in 21 ore, mentre a novembre il carico totale è stato di ben 74 kgP in 29 ore, cioè da 7 a 14 volte superiore.

a) 15-16 febbraio 2011:



b) 27-28 marzo 2011:



c) 4-5 novembre 2011:

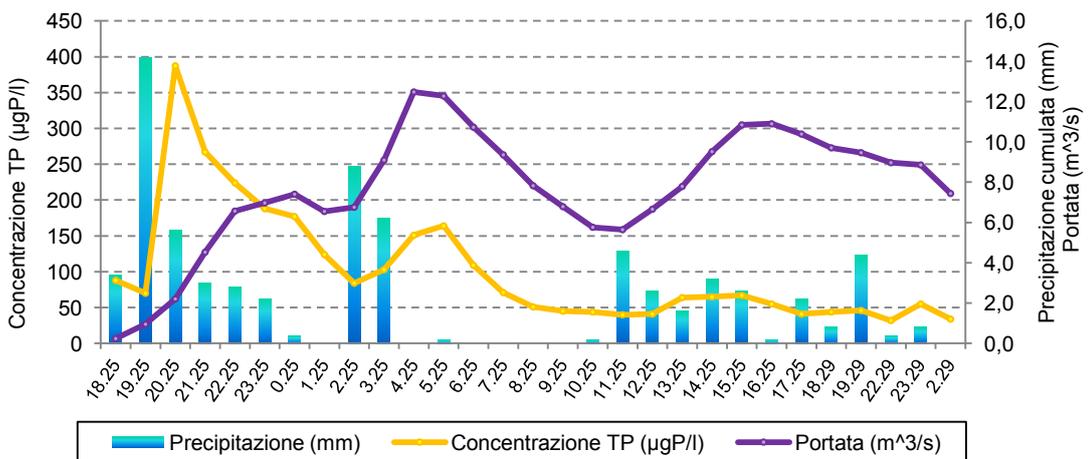


Figura 2.1.59. Andamento delle concentrazioni di TP, della portata e della precipitazione cumulata a scala oraria durante i tre eventi campionati intensivamente sul Lambrone.

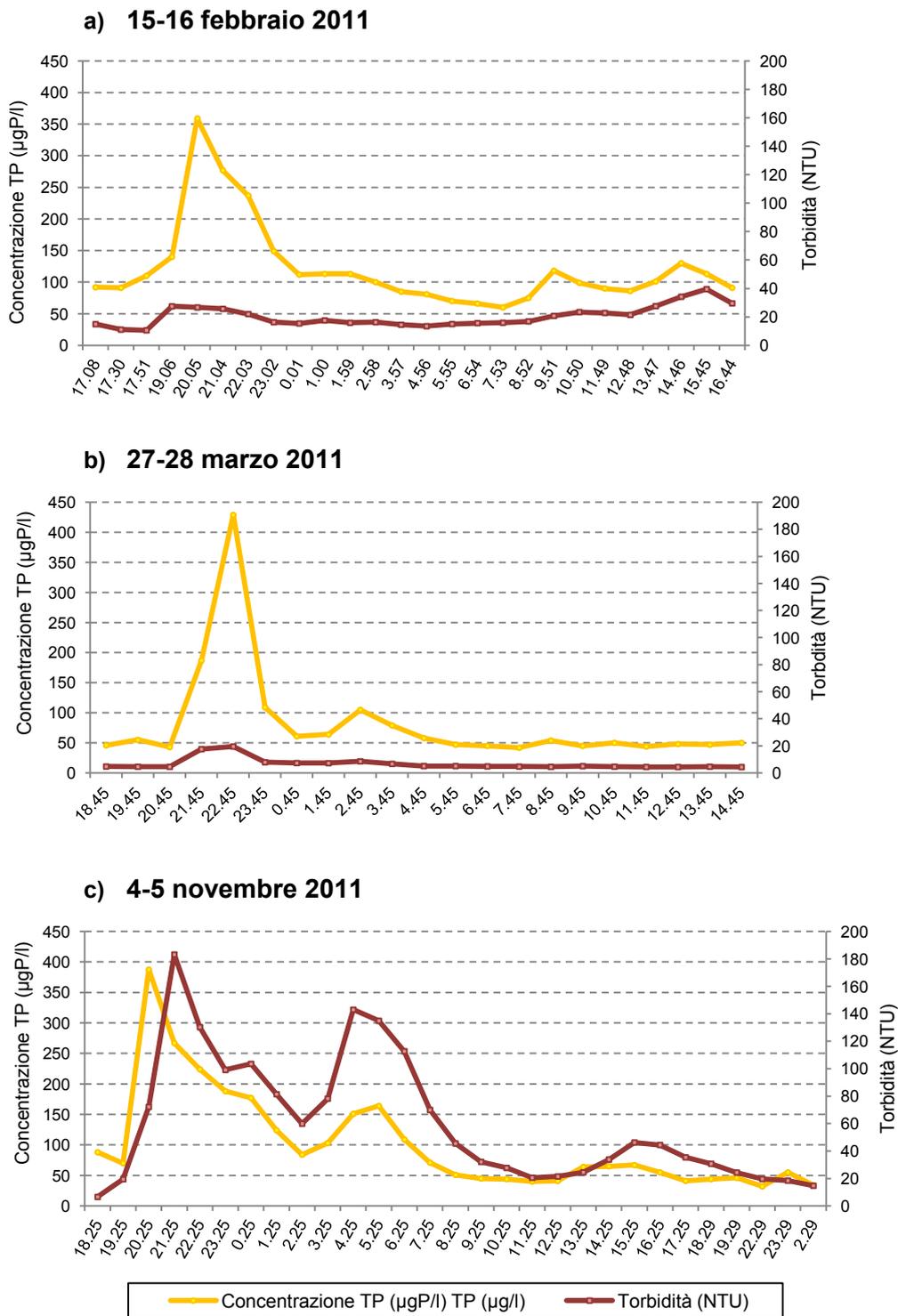


Figura 2.1.60. Andamento delle concentrazioni di TP e della torbidità a scala oraria durante i tre eventi campionati intensivamente sul Lambrone.

Analogamente a quanto fatto per il sottobacino del Gajum, si è analizzata la relazione tra i valori di torbidità e le concentrazioni di TP di tutti i campioni dei tre eventi considerati unitamente. Sulla base di questi dati, diversamente da quanto osservato per il Gajum e da quanto riportato in letteratura da numerosi autori (Grayson et al., (1996), Christensen et al. (2002), non si è evidenziata per il Lambrone

una simile relazione univoca, bensì si è osservata una distribuzione dei punti che segue un comportamento all'incirca biforcuto, come evidenziato dal grafico di Figura 2.1.61.

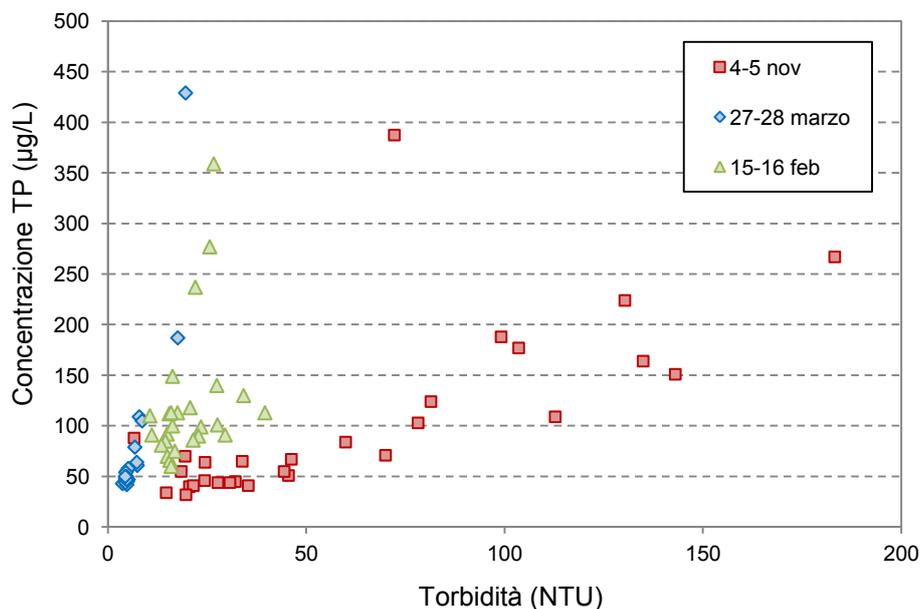


Figura 2.1.61. Relazione tra la concentrazione di TP e la torbidità di tutti i campioni prelevati durante i tre eventi. Si noti la distribuzione dei punti rossi rispetto a quelli verdi e azzurri, secondo due diversi andamenti.

Risultati dell'analisi statistica

A questo punto, con l'intento di sviluppare specifiche equazioni di regressione per descrivere la relazione tra le concentrazioni di fosforo e i possibili predittori per la loro stima indiretta, è stata eseguita una multiregressione tra le principali forme di fosforo (TP, TDP, PP, P-PO₄) misurate in laboratorio sui campioni prelevati durante i tre eventi precipitativi e i corrispondenti dati sperimentali acquisiti in continuo (torbidità, conducibilità specifica, portata, temperatura, pH, potenziale di ossidoriduzione). Ricordiamo che la torbidità e la conducibilità sono tra le variabili maggiormente indicate in letteratura come predittori per la stima delle concentrazioni di TP (Grayson et al., 1996; Christensen et al. 2002; Settle et al., 2007; Stubblefield et al., 2007; Rasmussen et al., 2008, Spackman Jones et al., 2010), oltre alla portata, stimata dalle misurazioni di livello (Nolan et al, 2005), tradizionalmente utilizzata come unico predittore per le concentrazioni dei nutrienti (Robertson and Roerish, 1999; Johnes, 2007, Jordan et al., 2007).

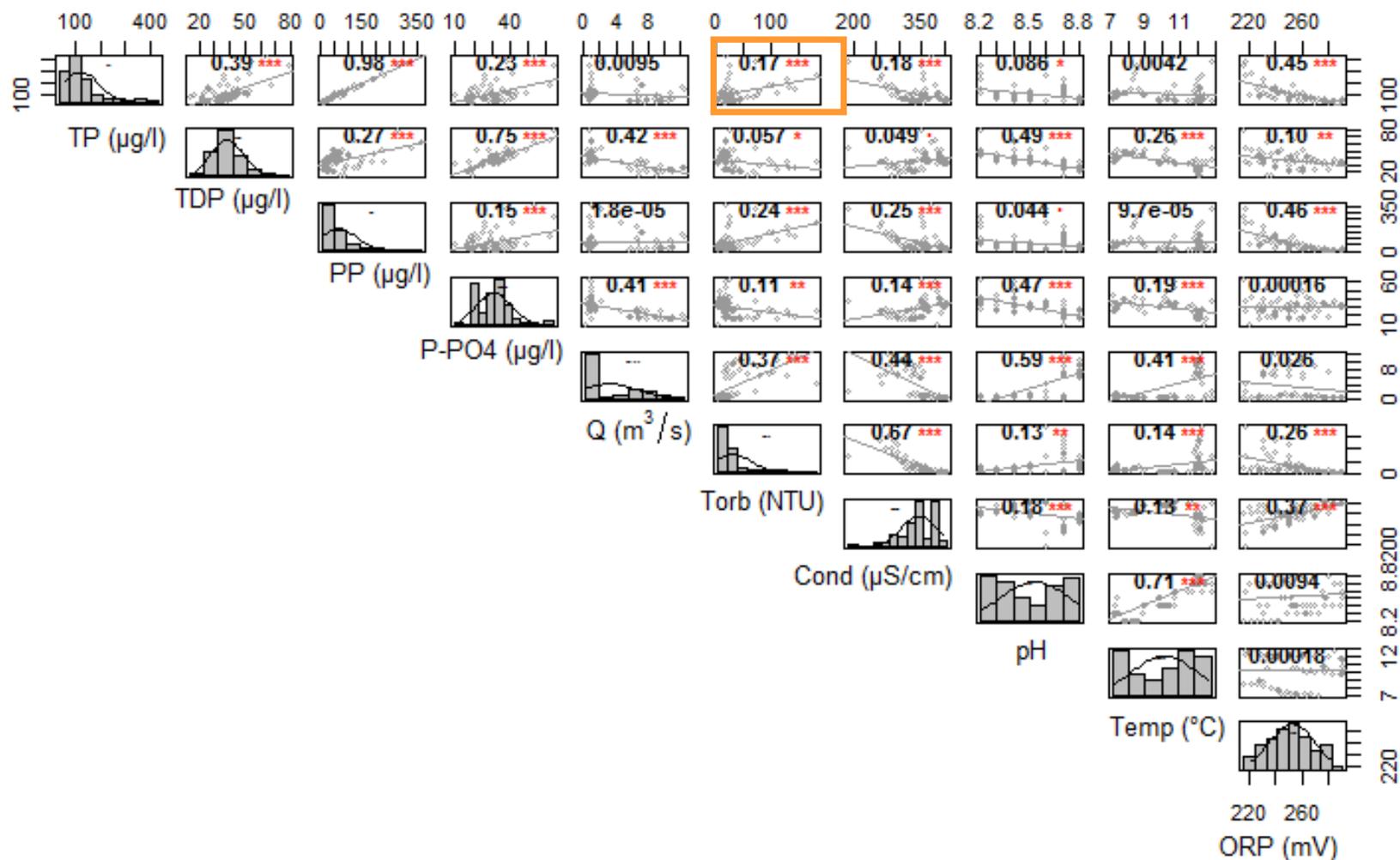


Figura 2.1.62. Matrici di correlazione per il fosforo totale (TP), fosforo totale disciolto (TDP) e particolato (PP), fosforo ortofosfato (P-PO4), portata (Q), torbidità (Torb), conducibilità specifica a 25°C (Cond), pH, temperatura (Temp) e potenziale di ossidoriduzione (ORP) per i tre eventi precipitativi campionati intensivamente. Le stelle indicano la significatività del coefficiente di regressione R^2 (****, 0.001; ***, 0.01; **, 0.05; *, 0.1; ,, 1). Il riquadro arancione individua la relazione tra la concentrazione del TP e la torbidità

Osservando i diagrammi di dispersione di Figura 2.62, per i tre eventi precipitativi, fra tutte le variabili considerate rispetto alle concentrazioni di TP si individua una relazione significativa solo con PP ($R^2=0,98$) e in misura minore con ORP e TDP (R^2 rispettivamente 0,45 e 0,93), laddove con le altre variabili non esiste una relazione univoca in generale, mentre si osserva chiaramente una doppia distribuzione dei dati per alcune variabili (principalmente la portata, torbidità, pH, temperatura). Questo è vero osservando, in particolare, la relazione tra la concentrazione di TP e la variabile che in letteratura è indicata come miglior predittore per la stima delle concentrazioni di fosforo, cioè la torbidità, per cui si individua una doppia relazione data dalla distribuzione doppia dei punti (quadrato arancione nel grafico). Mentre in letteratura numerosi studi riportano l'esistenza di una relazione univoca tra la concentrazione del TP e la torbidità (vari autori tra cui Grayson et al., 1996; Stubblefield et al., 2007; Spackman Jones et al., 2010), nel nostro caso questo è vero solo per il sottobacino del Gajum (vedi par. 2.1.7.1) ma non lo è per il Lambrone, come indicato anche dall' R^2 di 0,17 della regressione lineare tra le due variabili. Verosimilmente questa differenza è spiegabile considerando la differente origine degli apporti di fosforo. Infatti, in letteratura questa relazione univoca è stata trovata per lo più in bacini caratterizzati da un uso del suolo fortemente agricolo, in cui il fosforo derivante dalle fonti antropiche è di origine diffusa; invece nel caso del bacino del Lago di Pusiano, e più nello specifico del Lambrone, dove l'agricoltura è limitata (1%), il fosforo nelle acque derivante da fonte antropica è sia di origine diffusa (derivante dagli abitanti non allacciati al sistema fognario consortile) sia puntiforme (imputabile ai numerosi scolmatori fognari presenti nel bacino) (Salerno, 2005). Grayson et al. (1996) individuano alcuni punti che si discostano dalla relazione univoca tra torbidità e concentrazione di TP e che identificano come outliers, non considerandoli nella regressione individuata; invece nel nostro caso abbiamo individuato (Fig.2.63): *i*) da un lato un'analoga situazione con numerosi punti (verdi e azzurri) aventi concentrazioni di TP variabili tra circa 50-400 $\mu\text{gP L}^{-1}$ ma corrispondenti a valori di torbidità inferiori a 70 NTU, e *ii*) dall'altro punti (rossi) aventi concentrazioni inferiori di TP (sino a 250 $\mu\text{gP L}^{-1}$) ma caratterizzati da una maggior variabilità delle torbidità (da 14-183 NTU).

Per cercare di comprendere il fenomeno e dare una prima interpretazione di questi risultati, una prima valutazione si è basata sul confronto di questo andamento nel Lambrone con la relazione tra la torbidità e la concentrazione di TP individuata per il sotto-bacino del Gajum, in cui l'apporto di fosforo è solamente di origine diffusa, dovuto al dilavamento superficiale. Sebbene tale relazione sia notoriamente sito-specifica (Tomlinson and DeCarlo, 2003), si può osservare in Figura 2.1.63 come la distribuzione dei punti indicati in arancione (tutti i dati del Gajum) segua quella dei punti relativi al campionamento di novembre sul Lambrone (in rosso) (ii), eccetto per un paio di punti (indicati dalle frecce) che sembrano invece distribuirsi più come i punti dei campionamenti di febbraio e marzo (blu e verde) (i). Questo confronto ha indotti, pertanto, a ipotizzare la prevalenza di fosforo di origine diffusa nel caso (ii).

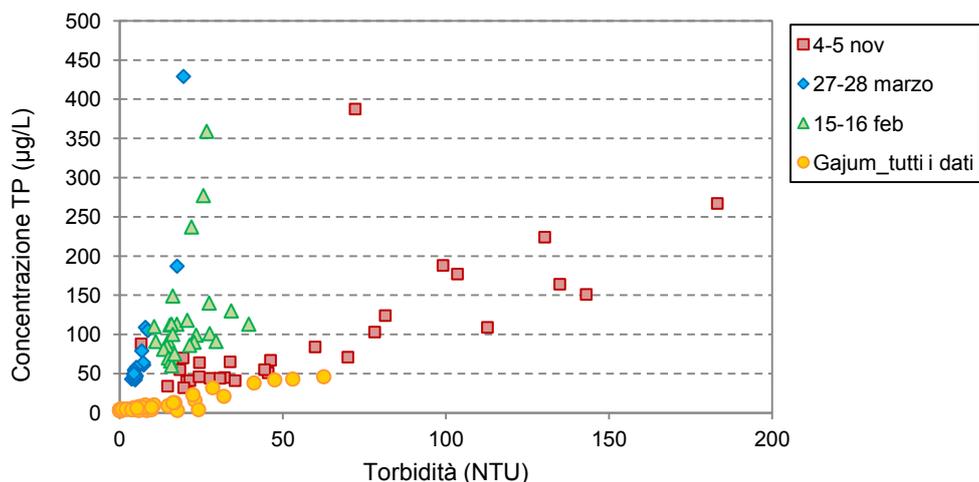
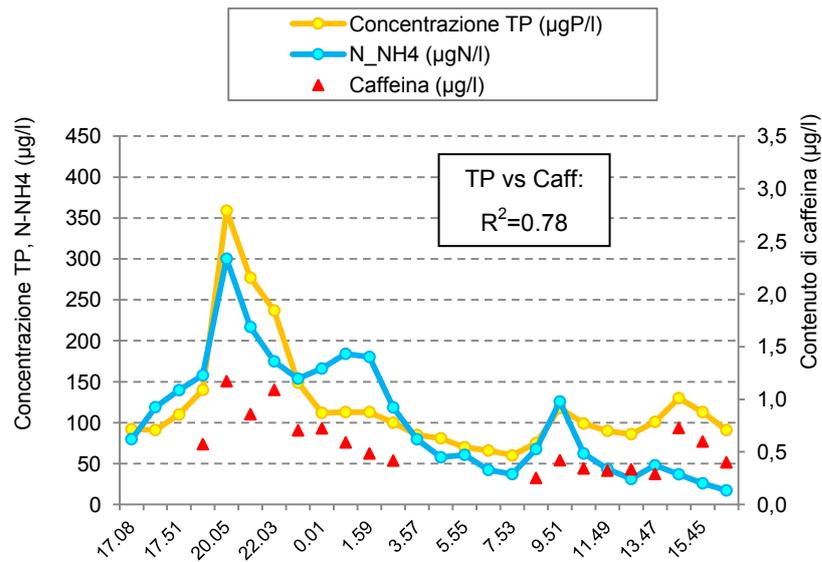


Figura 2.1.63. Relazione tra la concentrazione di TP e la torbidità dei campioni prelevati sul Lambrone (punti blu, verdi, rossi) e sul Gajum (arancioni) durante gli eventi precipitativi monitorati intensivamente. Si noti che la medesima distribuzione dei punti arancioni e rossi (eccetto per i due punti indicati dalle frecce) rispetto a quelli verdi e azzurri, secondo due diversi andamenti.

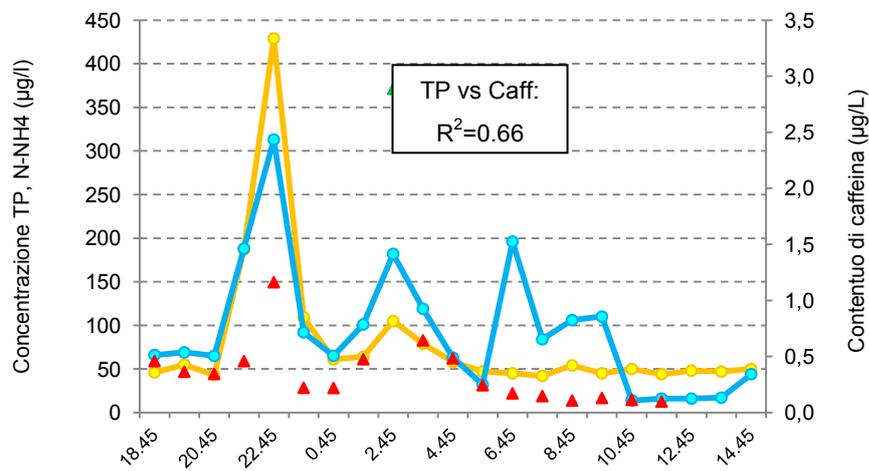
Un'altra valutazione è stata condotta osservando gli andamenti delle concentrazioni di fosforo totale rispetto a quelle di alcune specie chimiche indicatrici della contaminazione recente da attività antropica, quali in particolare l'ammoniaca e la caffeina le cui concentrazioni aumentano in presenza di scarichi fognari riversati dagli scolmatori (Weyrauch et al., 2010; Buerge et al., 2006; Lawler et al., 2006).

La caffeina è un tracciante della contaminazione delle acque superficiali da parte di acque reflue di origine urbana e domestica (Buerge et al., 2006); infatti, la sua presenza è un'indicazione chiara della provenienza da acque reflue domestiche, essendo utilizzata e metabolizzata solo dagli esseri umani. La determinazione del contenuto di caffeina è stata eseguita nei campioni prelevati a febbraio e marzo (Fig. 2.1.64) secondo la metodica analitica descritta sopra per stimare la portata totale scolmata da tutti gli scolmatori fognari all'interno del bacino del Lago di Pusiano. Per l'evento precipitativo di novembre, tuttavia, non si dispone di queste informazioni poiché al momento della presente tesi non è stato ancora possibile concludere le analisi del contenuto di caffeina, ma prossime a essere finalizzate.

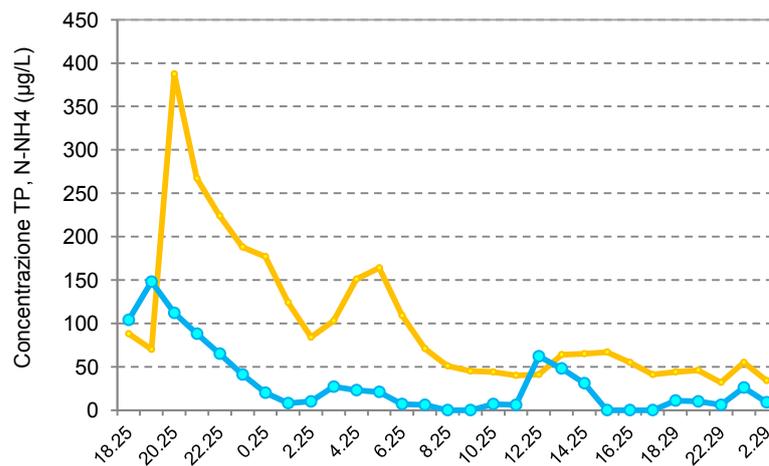
Come si può notare dai grafici di Figura 2.1.64, gli andamenti del contenuto di caffeina rispecchiano abbastanza quelli della concentrazione di TP in entrambe gli eventi, coi valori massimi di caffeina in corrispondenza dei picchi di TP, eccetto per un punto nell'evento di marzo con elevato contenuto di caffeina ($2,9 \mu\text{g L}^{-1}$) ma corrispondente a $100 \mu\text{gP L}^{-1}$ di TP (indicato in verde nel grafico di destra). Non considerando questo possibile outlier, nell'evento di marzo la relazione tra le concentrazioni delle due specie chimiche diviene significativa, con R^2 che da 0,14 diviene 0,66; a febbraio la relazione risulta molto più significativa, con R^2 pari a 0,78.



a)



b)



c)

Figura 2.1.64. Andamento delle concentrazioni di TP, caffeina e ammoniaca misurate nei campioni prelevati durante gli eventi precipitativi di febbraio (a) marzo (b) e novembre (c) 2011, con indicazione dei rispettivi coefficienti di determinazione lineare tra le due variabili. Il punto in verde in b) indica un probabile outlier. Relativamente a novembre (c) non sono disponibili i dati di caffeina.

Quest'analisi del contenuto di caffeina, considerata unitamente ai risultati presentati sull'attivazione degli scolmatori fognari e sulla quota di portata scolmata nei due eventi di febbraio e marzo, conferma la contaminazione delle acque del Lambrone da parte di acque reflue urbane e domestiche.

A questo punto, per poter accertare l'esistenza di due diversi gruppi, si è utilizzato come strumento di discriminazione, l'analisi delle componenti principali o PCA (*Principal Component Analysis*), una tecnica di analisi statistica multivariata, mediante la quale è possibile anche individuare quali sono le variabili che pesano di più su questa distinzione. Mediante questa tecnica sono stati analizzati i dati disponibili per i tre eventi precipitativi in funzione di:

- *concentrazioni di nutrienti e macrocostituenti*: considerando le principali forme di nutrienti (fosforo totale, fosforo totale disciolto e particolato, azoto totale) e specie ioniche (calcio, sodio, potassio, magnesio, cloruri, solfati, azoto nitrico, azoto ammoniacale, bicarbonati) determiniate su tutti i campioni, sono stati identificati i due gruppi o serie (A e B) indicati in verde e arancione in Figura 2.1.65-a.
- *carichi di nutrienti e macrocostituenti*, calcolati moltiplicando per la corrispondente portata le relative concentrazioni misurate nei campioni prelevati: usando i carichi così calcolati è stato possibile osservare la distribuzione delle componenti principali che ha effettivamente indicato la presenza di due serie distinti di dati una prevalente sull'altra (Fig. 2.1.65-b): serie A, in verde (in cui prevale l'impatto da fonti puntiformi = CSO) e serie B, in arancione (in cui prevale l'impatto da fonti diffuse = dilavamento superficiale e abitanti non allacciati alla rete fognaria).

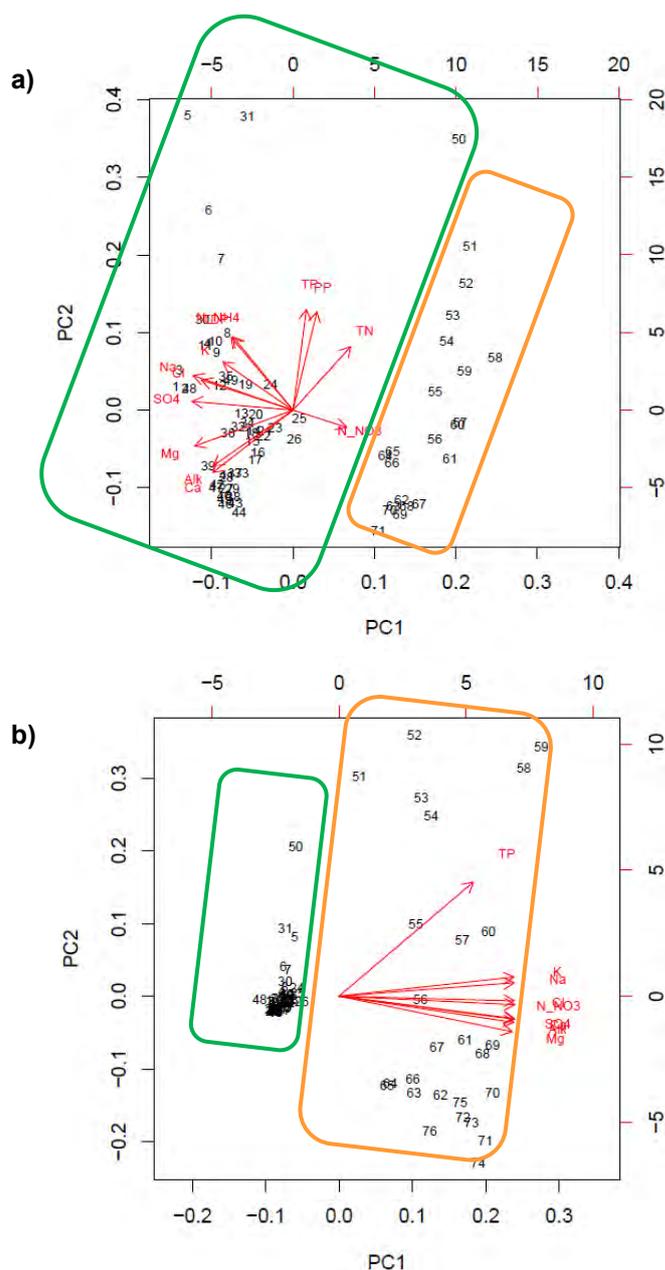


Figura 2.1.65. Risultati relativi all'analisi della PCA considerando le concentrazioni (a) e i carichi (b) delle principali variabili chimiche misurate sui campioni dei tre eventi precipitativi campioni (TP=fosforo totale, TDP= fosforo totale disciolto, PP=fosforo particolato, TN=azoto totale, Ca=calcio, Na=sodio, K=potassio, Mg=magnesio, Cl=cloruri, N-NO₃=azoto nitrico, N-NH₄= azoto ammoniacale, SO₄=solfati, Alk=bicarbonati). Le frecce rosse indicano il peso di ogni variabile rispettivamente nelle due componenti principali (PC1= componente principale 1; PC2= componente principale 2).

In entrambi i casi si osserva come il peso delle diverse variabili rispettivamente alle due componenti principali sia (PC1 e PC2), indicato dalla lunghezza delle frecce rosse, sia simile.

Successivamente si è voluto identificare, mediante la PCA, la variabile discriminante tra quelle monitorate in continuo che mi permetta di identificare i due gruppi individuati. Le variabili chimico-fisiche analizzate sono state in particolare: torbidità, conducibilità specifica a 25°C, potenziale di ossidoriduzione (ORP), temperatura, pH, e portata (derivata dai dati di livello secondo la curva portata/livello descritta in Salerno, 2005). Anche con quest'analisi è stata individuata la suddivisione

delle componenti in due gruppi, indicati in verde e arancione nel seguente grafico (Fig.2.1.66); il peso delle diverse variabili rispettivamente alle due componenti principali (PC1 e PC2) è risultato simile (le frecce rosse hanno all'incirca la stessa lunghezza).

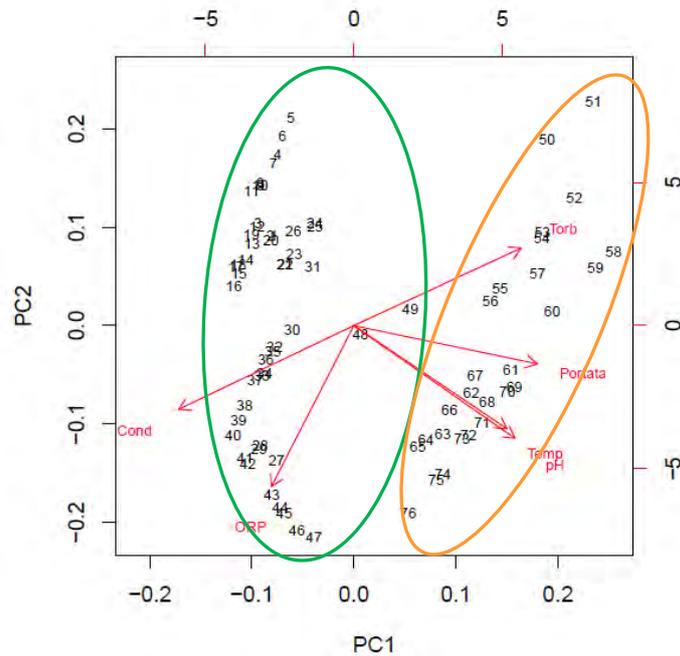


Figura 2.1.66. Risultati relativi all'analisi della PCA considerando le variabili chimico-fisiche monitorate in continuo durante i tre eventi precipitativi campioni (Cond=conducibilità specifica a 25°C, Torb=torbidità, portata, ORP=potenziale di ossidoriduzione, Temp=temperatura, pH). Le frecce rosse indicano il peso di ogni variabile rispettivamente nelle due componenti principali (PC1= componente principale 1; PC2= componente principale 2). I numeri indicano i dati considerati (76).

Un'altra analisi statistica multivariata detta analisi lineare discriminata o LDA (*Linear Discriminant Analysis*), descritta nel è stata condotta allo scopo di voler identificare quali fossero le variabili monitorate in continuo che discriminassero con maggiore accuratezza i due gruppi identificati precedentemente. Utilizzando la funzione "partimat" in ambiente statistico R (libreria "klaR"), la LDA è stata applicata a tutti i dati disponibili per ogni campione (in totale 76) dei tre eventi precipitativi per ogni variabile chimico-fisica monitorata in continuo, associando ad ogni dato la classe di appartenenza (A o B) secondo il risultato ottenuto dalla PCA.

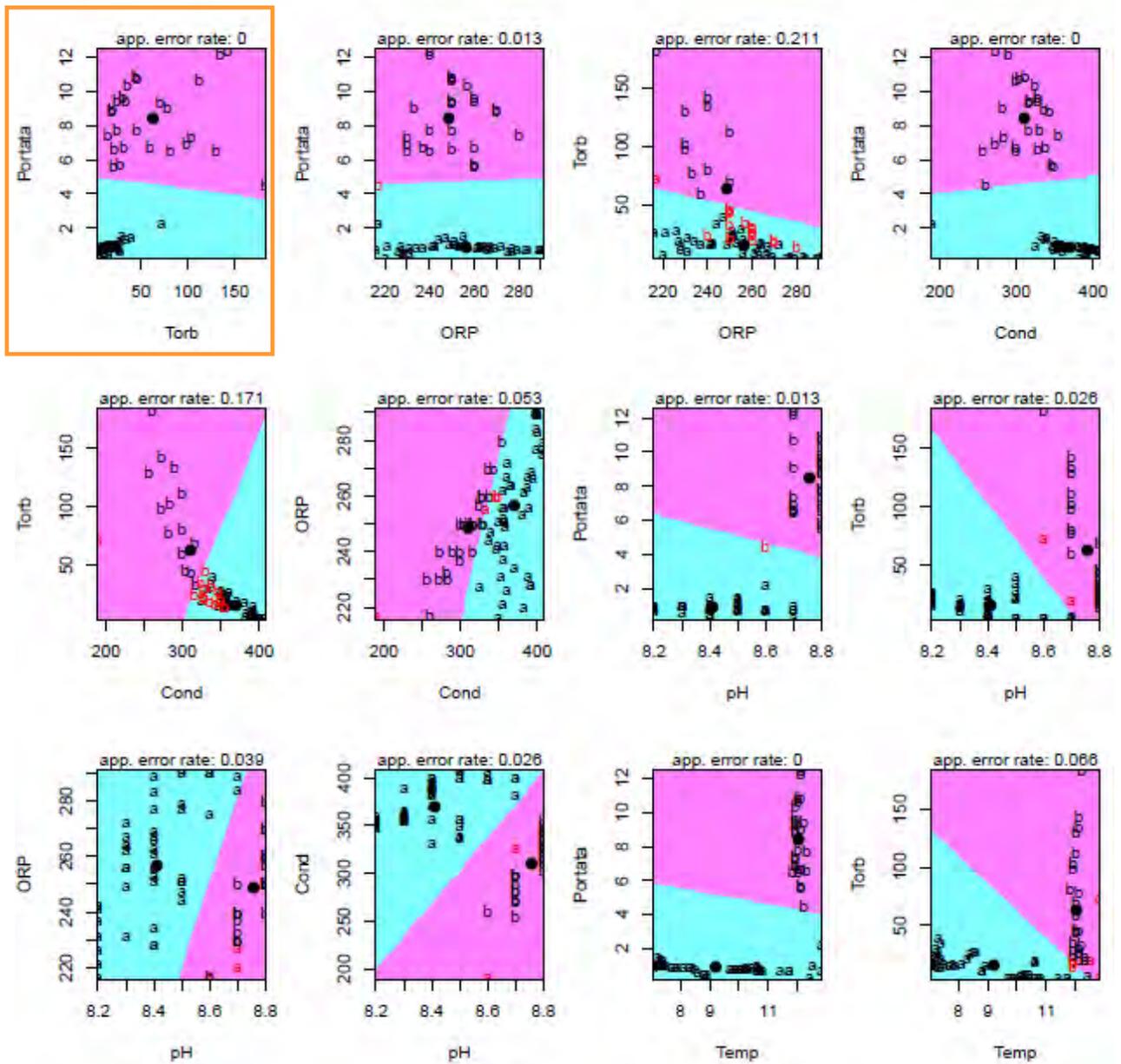


Figura 2.1.67. Diagrammi di partizione (partition plot) ottenuti mediante l'analisi lineare discriminata considerando tutte le variabili chimico-fisiche monitorate in continuo durante i tre eventi precipitativi. Per ogni diagramma è riportato il valore dell'errore di discriminazione del gruppo (pari a 0.013 per ogni punto di un gruppo ricadente nell'altro).

Tra i risultati ottenuti con quest'analisi (Fig.2.1.67), il più semplice da interpretare graficamente e che non ha presentato alcun errore è risultato essere la relazione tra la portata (Q) e la torbidità (plot indicato in arancione), per cui si è individuata anche una "soglia di discriminazione" in grado di discriminare i due gruppi: con $Q < 3 \text{ m}^3/\text{s}$ => gruppo A; con $Q > 3 \text{ m}^3/\text{s}$ => gruppo B (Fig.2.1.68).

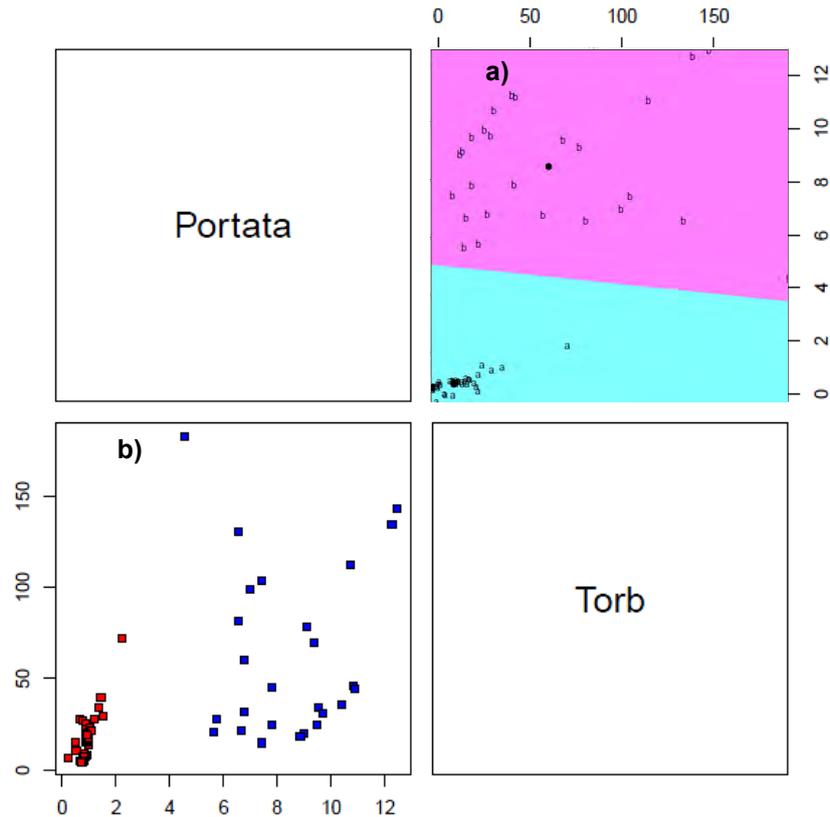


Figura 2.1.68. Diagramma di partizione (partition plot) ottenuto mediante l'analisi lineare discriminata (a) e di dispersione (scatterplot) (b) dei dati di portata e torbidità acquisiti in continuo durante i tre eventi precipitativi.

Tuttavia, non è sufficiente considerare questa relazione solo relativamente ai dati di portata e torbidità dei tre eventi, perché, con una ripartizione effettuata come descritto sopra, si assegnerebbero al gruppo A (prevalenza del carico puntiforme) anche condizioni di portata bassa e torbidità bassa, condizioni che evidentemente non sono rappresentative dell'attivazione degli scolmatori fognari.

Pertanto, successivamente sono stati considerati tutti i dati acquisiti in continuo (per un totale di oltre 6000 dati), applicando la PCA alle seguenti variabili chimico-fisiche: torbidità, conducibilità specifica a 25°C, potenziale di ossidoriduzione (ORP), temperatura, pH, e portata. Quest'analisi però non ha consentito di identificare distintamente la presenza di gruppi diversi.

Quindi si è nuovamente tornati a considerare solamente la relazione tra la portata e la torbidità, analizzando tutti i dati acquisiti in continuo per queste due variabili e ottenendo il grafico di dispersione riportato in Figura 2.1.69, in cui i punti risultano distribuiti secondo due gruppi distinti indicati con A e B.

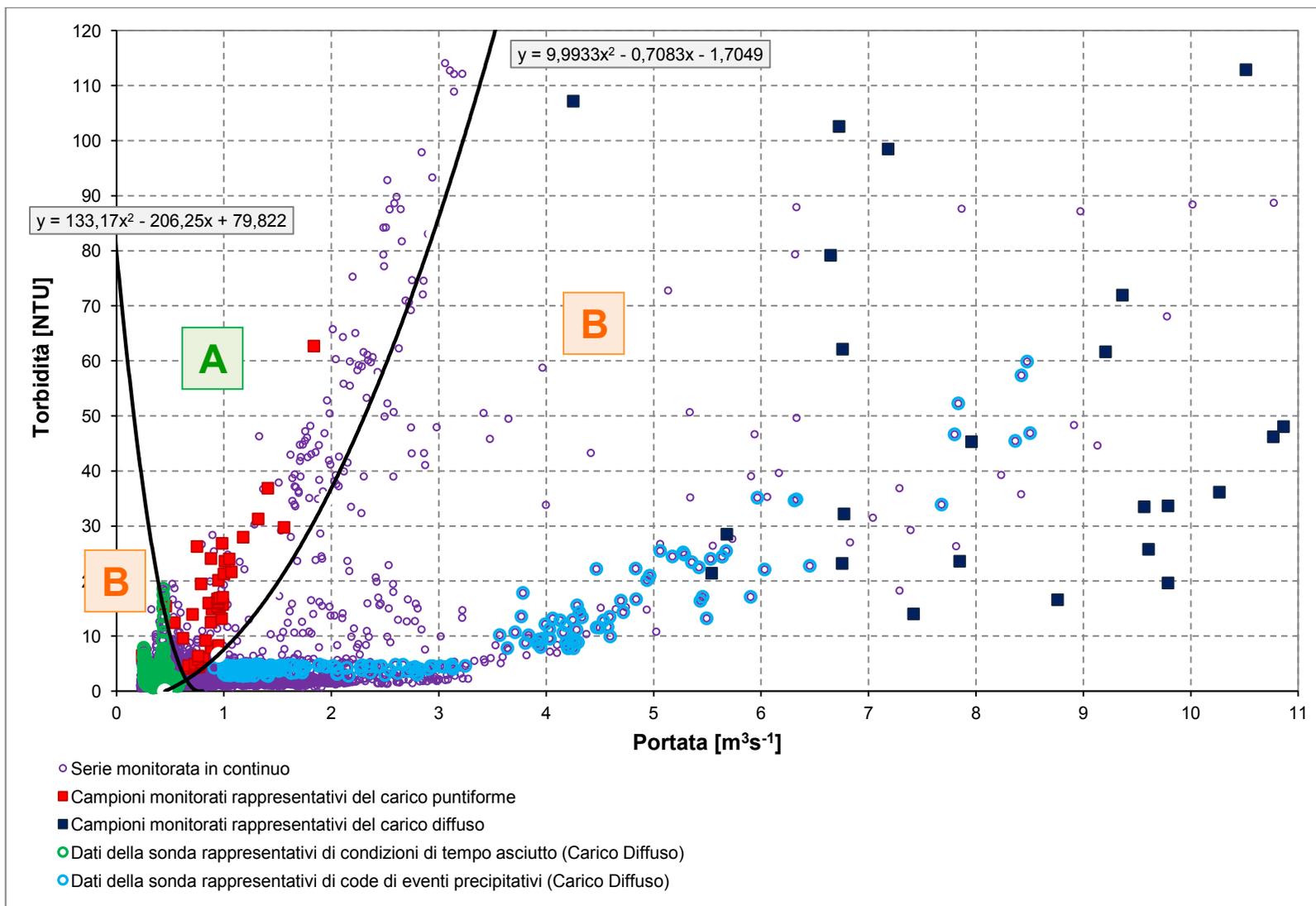


Figura 2.1.69. Grafico di dispersione di tutte le misure di portata e torbidità acquisite in continuo per il periodo aprile 2010-aprile 2011. Le due curve nere indicano le parabole descritte dalle rispettive equazioni polinomiali di 2° grado, che delimitano lo spazio in cui si distribuiscono i dati, che risultano pertanto distinti in due gruppi: gruppo A (internamente alle parabole); gruppo B (nello spazio esterno a quello delimitato dalle parabole).

Nel grafico di Figura 2.1.69 si osserva che lo spazio in cui si disperdono i dati risulta delimitato dall'intersezione di due parabole (descritte dalle equazioni polinomiali di 2° grado indicate in figura), che consentono di identificare due gruppi distinti aventi diversa relazione tra portata e torbidità:

- **gruppo A**, costituito dai punti situati internamente allo spazio delimitato dalle due parabole (quadrati rossi), in cui prevale l'effetto delle sorgenti puntiformi imputabile agli scarichi fognari derivanti dagli scolmatori di piena (come confermato dai dati di caffeina per gli eventi di febbraio e marzo);
- **gruppo B**, costituito dai punti che ricadono esternamente allo spazio delimitato dalle due parabole, che invece è caratterizzato da una prevalenza del carico dovuto a sorgenti diffuse (dilavamento superficiale, abitanti non allacciati al sistema di collettamento fognario). In realtà, in questo gruppo si distinguono ulteriormente 3 tipologie di dati acquisiti in continuo in base alla relazione torbidità/portata che si diversificano per le diverse condizioni pluviometriche e idrologiche:
 1. dati relativi a condizioni in cui prevale il carico di origine diffusa (confermato dal campionamento di novembre 2011);
 2. dati rappresentativi di code degli eventi (cerchi azzurri) (queste ipotesi è stata verificata e validata analizzando l'isteresi nei tre eventi precipitativi, presentati in seguito nella discussione);
 3. dati relativi a condizioni di tempo asciutto (prima dell'evento precipitativo quando non piove).

Dopo aver identificato le due serie di dati distinte sulla base della relazione tra la torbidità e la portata, come appena descritto, per la stima delle concentrazioni di TP utilizzando la torbidità come unico predittore a partire dalle misure acquisite in continuo, si sono utilizzate le due relazioni individuate per le due serie di dati relativi ai tre campionamenti intensivi effettuati sul Lambrone, rappresentati nella Figura 2.70, e descritte dalle seguenti equazioni di regressione lineare:

$$\text{Serie A (prevalenza carico puntiforme):} \quad \text{TP} = 4,61 \cdot \text{Torb} + 37,42 \quad (\text{A})$$

$$(R^2 = 0,42)$$

$$\text{Serie B (prevalenza carico diffuso):} \quad \text{TP} = 1,05 \cdot \text{Torb} + 34 \quad (\text{B})$$

$$(R^2 = 0,83)$$

Si noti che nella equazione di regressione relativa alla serie B, l'intercetta è stata posta pari a 34, affinché a torbidità nulle corrispondano condizioni di concentrazione di TP di $34 \mu\text{gP L}^{-1}$ pari alle concentrazioni di fondo per la sezione del Lambrone in tempo asciutto (Figura 2.1.69 in rosso).

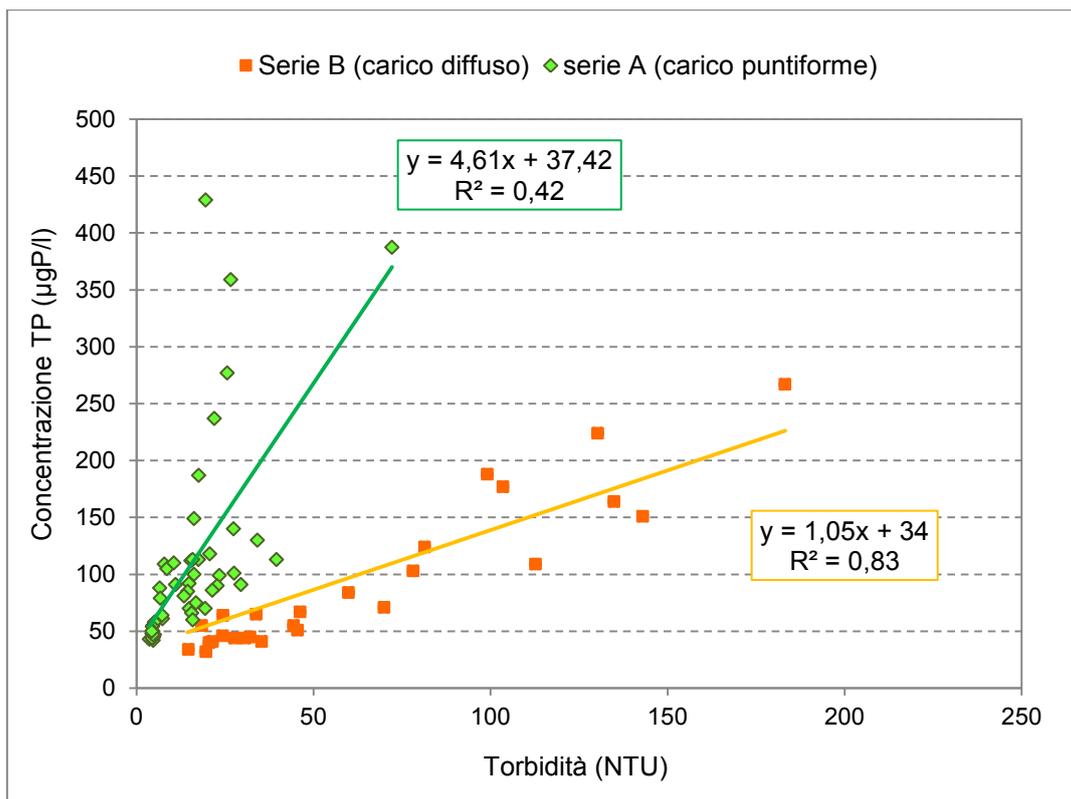


Figura 2.1.70. Relazione tra la concentrazione di TP e la torbidità dei campioni prelevati sul Lambrone durante gli eventi precipitativi monitorati intensivamente, con separazione delle due serie individuate (serie A = punti verdi; serie B = punti arancioni). Per entrambe le serie di dati è mostrata la linea di tendenza e la corrispondente equazione di regressione lineare che descrive la relazione tra le due variabili.

2.1.8.3 I carichi di fosforo di origine diffusa e puntiforme

Per quanto riguarda la sezione del Lambrone, come descritto nel precedente paragrafo, abbiamo identificato, tra i parametri monitorati in continuo, la torbidità come predittore per la stima della concentrazione di fosforo. In particolare, sono state individuate due relazioni tra la torbidità e la concentrazione di TP, una che identifica come predominante la componente diffusa del carico di fosforo, laddove l'altra individua la prevalenza della componente puntuale.

La serie di dati di portata e torbidità monitorati in continuo a scala sub-oraria, a seguito di una opportuna "pulizia" delle serie da eventuali valori anomali (il 67% dei dati sono stati considerati non affetti da particolari anomalie dovute a intasamenti del sensore o assenza di acqua), sono stati aggregati a scala oraria nel periodo che va dal 30 aprile 2010 al 23 novembre 2011, e quindi utilizzati come descritto nel paragrafo precedente per la determinazione della concentrazione oraria di fosforo.

Per determinare la concentrazione totale di fosforo è stata applicata ai dati di torbidità monitorati in continuo la regressione B tra torbidità e concentrazione TP (vedi grafico di Fig. 2.1.70). Associando a tale serie di concentrazioni la serie continua di portata, derivata dalle misure in continuo di livello secondo la curva portata/livello riportata in Salerno (2005), abbiamo definito il carico orario di fosforo per il periodo considerato. In seguito, ai risultati relativi al carico così ottenuti, dove il carico include sia la componente naturale sia diffusa, si è sottratto il contributo del carico naturale (la cui quantificazione

è stata descritta nel paragrafo 2.1.8) ottenendo così un carico di fosforo di origine diffusa, dovuto agli scolmatori fognari attivi anche in tempo asciutto e alla popolazione non allacciata alla rete fognaria pari a 2334 kg.

Per determinare il carico di fosforo di origine puntiforme si sono identificati i dati di torbidità ricadenti nel fuso tra le due parabole identificate in Figura 2.1.69, e ad essi si è applicata la regressione A (predominanza carico puntiforme) individuata tra torbidità e concentrazione di TP. A questo punto a partire dalla serie delle concentrazioni di fosforo e delle corrispondenti portate si è stimato il carico di fosforo di origine puntiforme, imputabile ai soli scolmatori fognari, pari a 1363 kg.

Poiché tali carichi risultano valutati su un campione rappresentativo del 67% dell'intero *dataset* (per un totale di 7142 ore), per definire il carico diffuso nei 572 giorni che corrispondono al periodo complessivo del monitoraggio in continuo effettuato sul Lambrone (pari a 12397 ore), attraverso una proporzione abbiamo pertanto riportato tali carichi all'intero periodo monitorato, ottenendo un carico puntiforme di 2336 Kg e diffuso di 4051 kg. Il carico naturale è invece stato determinato a scala giornaliera attraverso l'implementazione del modello SWAT come descritto nel paragrafo 2.1.7.1, ottenendo un carico totale di fosforo pari a 396 kg che, riportati a 572 giorni come sopra, corrispondono a 687 kg.

Una volta così quantificati i carichi di fosforo di origine naturale, diffusa e puntiforme per i 572 giorni in cui avvenuto il monitoraggio in continuo delle acque del Fiume Lambrone, abbiamo riportato tali carichi ad un carico annuale rappresentativo del periodo di monitoraggio, effettuando delle semplici proporzioni, ottenendo il carico di P di origine naturale, puntiforme e diffuso (ottenuto dal carico complessivo che è stato ridotto del carico naturale che lo andava a comporre) rispettivamente pari a 439, 1509 e 2147 kg anno⁻¹.

Come detto in precedenza, la quantificazione del carico naturale di fosforo è stata ottenuta mediante l'implementazione del modello SWAT su tutto il bacino, ottenendo una serie continua della stima del carico a scala giornaliera. Il carico annuale stimato è stato pari a 0,78 t P anno⁻¹. Per la quantificazione del carico di fosforo diffuso e puntiforme a partire dai dati di torbidità monitorati in continuo secondo i modelli di regressione A e B descritti nel par. 2.1.8.2, bisogna invece tener conto del fatto che le serie di dati sperimentali di torbidità acquisiti nel periodo monitorato presentavano dei dati mancanti a causa di interruzioni accidentali della misura, intasamento del sensore, mancanza di acqua nel fiume, ecc, pertanto la serie risulta parzialmente incompleta: considerando queste anomalie, la completezza della serie dei dati è stata complessivamente del 67%. Pertanto, la quantificazione del carico naturale considerando i giorni in cui dai dati sperimentali di torbidità disponibili (0,4 t P anno⁻¹) è risultata in una sottostima di circa il 45% rispetto al carico ottenuto con la modellizzazione. Considerando in prima approssimazione che questa proporzione sia veritiera anche per il carico puntiforme e diffuso, sebbene tenendo conto che nella quantificazione del puntiforme ciò determina un sottostima del carico stesso, si sono opportunamente stimati nuovamente i carichi riportandoli alla stima del carico naturale. I carichi annuali così stimati sono risultati pertanto: **carico naturale** pari a **0,78 t P anno⁻¹**, **carico diffuso** di **3,82 tP anno⁻¹** e **carico puntiforme** pari a **2,68 tP anno⁻¹**. Il **carico totale annuo di fosforo** rappresentativo di tutti i contributi puntiforme, diffuso e naturale, è risultato pertanto di circa **7,28 tP anno⁻¹**. In Figura 2.1.71 sono rappresentate le

percentuali e le tonnellate annue del carico di fosforo naturale, diffuso e puntiforme, dove per carico diffuso si intende solo la componente di origine antropica (dovuta agli abitanti non allacciati al sistema di collettamento e al contributo degli scolmatori fognari attivi anche in condizioni di tempo asciutto e al dilavamento delle aree urbanizzate).

Dal grafico torta di Figura 2.1.71 si può notare che il carico totale di fosforo veicolato dal Lambrone sia costituito prevalentemente dal carico di origine antropica (89%), sottolineando la forte incidenza sia delle sorgenti puntiformi (37%), confermando le valutazioni fatte nel paragrafo 2.1.8.2 che indicavano una percentuale in tempo di pioggia di carico di origine puntiforme del 42%, sia diffuse (52%) sul carico che viene veicolato dal Fiume Lambrone al Lago di Pusiano.

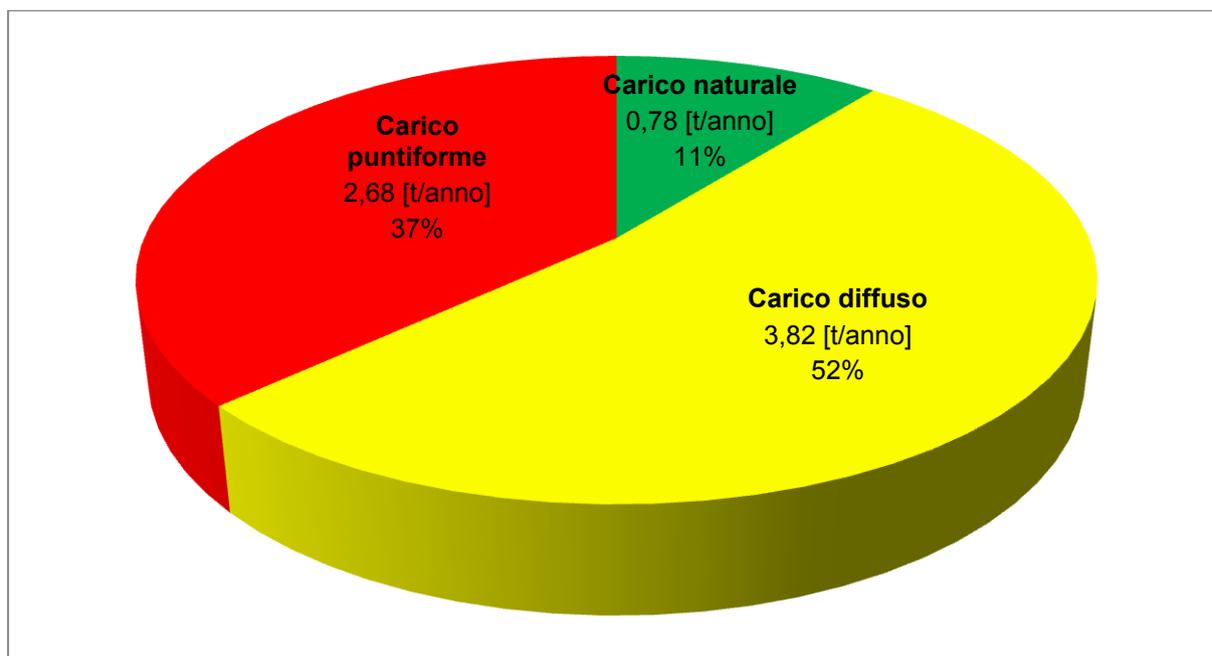


Figura 2.1.71. Distribuzione dei carichi annuali di fosforo veicolati dal Lambrone, con distinzione tra la componente di origine naturale, diffusa e puntiforme.

Analisi dell'andamento dei carichi di fosforo in corrispondenza di eventi precipitativi

Una volta effettuata questa stima su scala annuale delle componenti del carico di fosforo veicolate dal Lambrone al copro lacustre, si è quindi voluto valutare l'andamento delle concentrazioni di fosforo totale e dei rispettivi carichi andando a considerare alcuni eventi precipitativi di diversa intensità. In particolare, sono stati considerati gli andamenti della precipitazione, delle concentrazioni di TP e dei carichi di fosforo a scala oraria nei giorni 24-25 ottobre 2010 e 4-6 novembre 2011.

In Figura 2.1.72-a è rappresentato l'andamento delle piogge durante "evento precipitativo verificatosi il 24-25 ottobre 2010 e delle concentrazioni di TP dovute al carico di origine naturale (curva verde), diffusa (curva gialla) e puntiforme (curva rossa). L'evento di pioggia considerato è stato caratterizzato da una precipitazione cumulata di 52,6 mm, con un'intensità massima raggiunta di 5 mm/h. Si può vedere come sin dalle prime ore dell'evento la concentrazione di fosforo sia di origine

prevalentemente puntiforme, mentre a fine evento predomina la componente diffusa. Ciò è confermato dal grafico in Figura 2.1.72-b in cui è rappresentato l'andamento del carico di fosforo, distinto nelle sue componenti, e della precipitazione. Si può quindi affermare che il carico di fosforo puntiforme risulta predominante per eventi precipitativi non molto intensi, come quello considerato. Confrontando la fase iniziale dell'evento, in entrambi i grafici (Figura 2.1.72), si può notare che le concentrazioni di fosforo totale risultano più alte dei valori dei rispettivi carichi, legati a valori di portata bassa del fiume a inizio evento. Ciò dimostra che, a inizio evento, le concentrazioni di fosforo siano imputabili principalmente a sorgenti di carico puntiforme quando la portata del fiume non ha subito ancora un aumento apprezzabile.

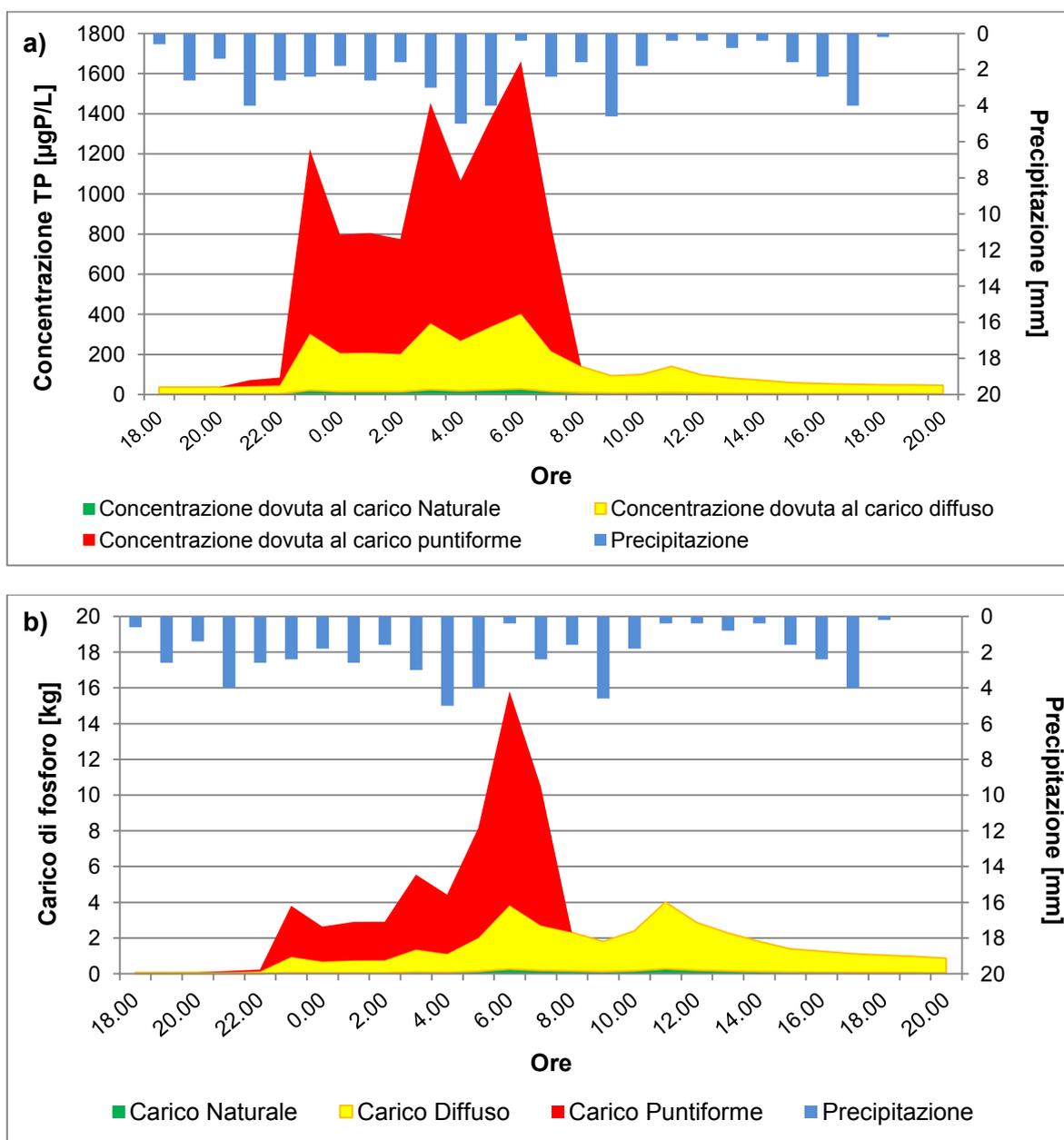


Figura 2.1.72. Andamento della concentrazione (a) e del carico (b) di fosforo tra le ore 18:00 del 24 ottobre 2010 e le 20:00 del 25 ottobre 2010.

In Figura 2.1.73-a è rappresentato l'andamento della pioggia durante l'evento precipitativo del 4-6 novembre 2010 oltre delle concentrazioni di TP dovute al carico di origine naturale, diffusa e puntiforme. Questo evento, che è stato anche campionato intensivamente (a scala oraria) e i cui andamenti del fosforo totale misurato sui campioni prelevati sono stati illustrati nel paragrafo 2.1.8.2, è stato caratterizzato da una precipitazione cumulata di 96,2 mm, con un'intensità massima raggiunta di 14,2 mm/h. Rispetto all'evento del 24-25 ottobre, quello di novembre è stato molto più intenso e quindi risulta utile un confronto tra i due eventi considerati per valutare una possibile differenza nella risposta del sistema a diverse condizioni precipitative.

Nella fase iniziale dell'evento, caratterizzato da un'elevata intensità precipitativa e dal picco di precipitazione che si è registrato tra le 19 e le 20, nel fiume si è riscontrato il fenomeno del first flush imputabile agli scolmatori fognari, come evidenziato dalle alte concentrazioni di TP, il cui andamento è rappresentato dal grafico di Fig. 2.1.72-b. Nella seconda parte dell'evento precipitativo, invece, è risultata predominante la componente diffusa del carico, a seguito della prevalenza del dilavamento superficiale nella composizione del carico di nutrienti, rispetto a quella puntiforme, innescato dalle elevate intensità precipitative che ha caratterizzato questo evento (Fig. 2.1.73).

Come è stato illustrato nel paragrafo 2.1.8.2, le analisi del contenuto di caffeina eseguita sui campioni prelevati negli eventi di pioggia campionati a febbraio e marzo 2011 (vedi Fig. 2.1.64), hanno dimostrato che la predominanza del diffuso, emersa nell'evento di novembre, non implica l'assenza del contributo del carico puntiforme, bensì l'impatto sul corpo idrico dovuto agli scolmatori di piena risulta inferiore per la forte diluizione del refluo scolmato, la cui qualità delle acque risulta accettabile, come è stato anche illustrato nel paragrafo 2.1.5.5

Queste considerazioni spiegano il fatto che si sia riscontrata una sovrastima del carico diffuso e una sottostima del carico puntiforme (vedi paragrafo 2.1.8.3). **La quantificazione del carico di fosforo annuale ha mostrato una sovrastima del diffuso perché risulta predominante rispetto al carico puntuale durante la totalità degli eventi precipitativi analizzati. Inoltre la componente diffusa è anche costituita dal carico di origine puntiforme, soprattutto nel caso di eventi precipitativi di alta intensità. Si evidenzia invece una sottostima del carico puntiforme, perché si manifesta predominante solo nella prima parte dell'evento con concentrazioni alte di TP e un corrispondente carico di fosforo più basso rispetto al resto dell'evento.**

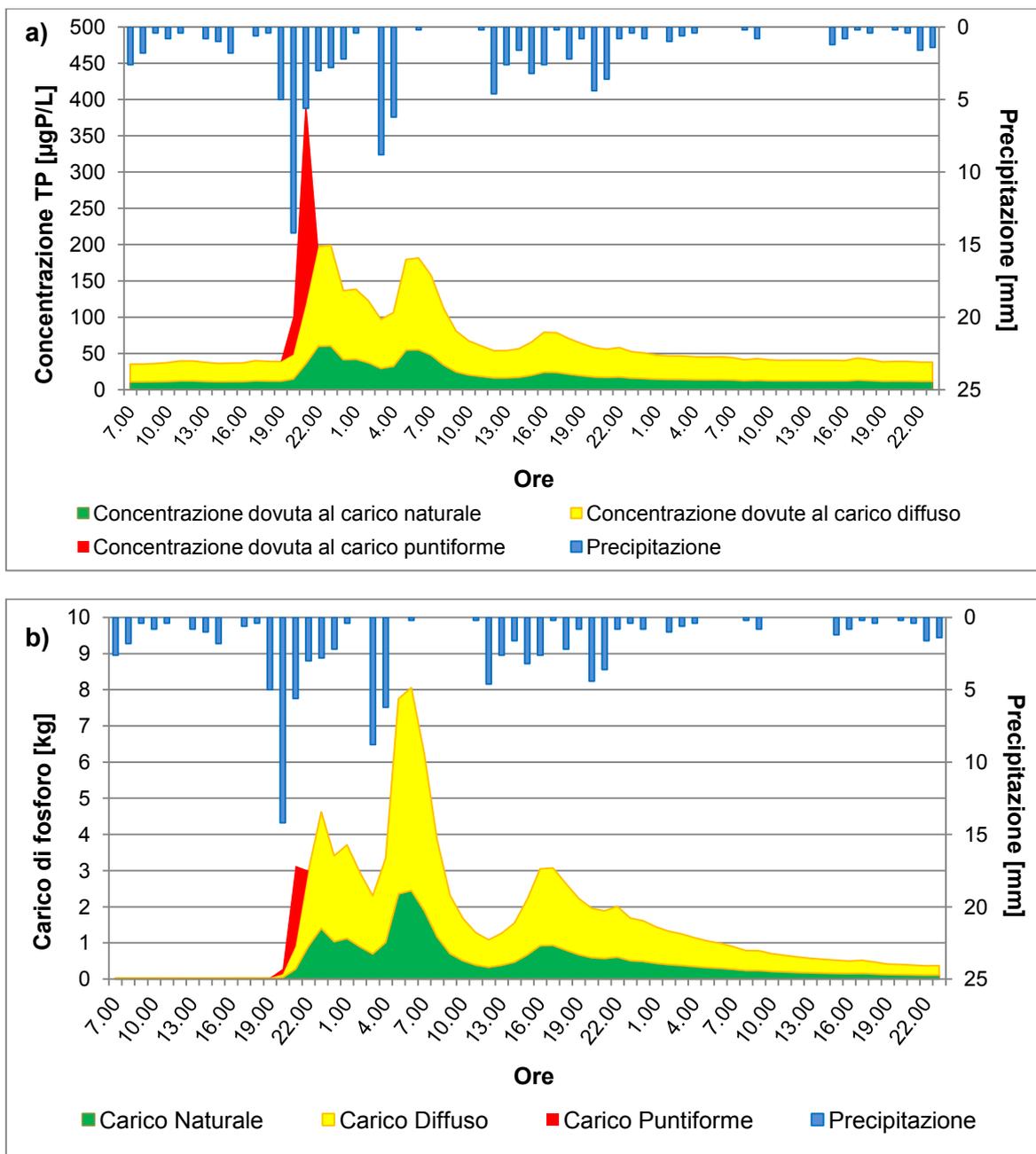


Figura 2.1.73. Andamento della concentrazione (a) e del carico di fosforo (b) tra le ore 7:00 del 04 novembre 2011 e le 23:00 del 06 novembre 2011.

Analisi condotte sulla serie di dati monitorati in continuo, e nella fattispecie su torbidità e portate, hanno permesso di valutare la possibilità che, a partire da una condizione in tempo asciutto (cerchi verdi in Figura 2.74) (gruppo B3 nel paragrafo 2.1.5.2), e in occasione di un evento precipitativo, il campione possa, in una fase iniziale, trovarsi in condizioni di torbidità-portata tali per cui sia predominante il carico puntiforme (gruppo A) e successivamente nel tempo, al proseguire dell'evento precipitativo, si passi in una condizione di prevalenza del carico diffuso (gruppo B1) sul puntiforme e quindi a condizioni di coda dell'evento (gruppo B2) che porteranno poi alle condizioni iniziali.

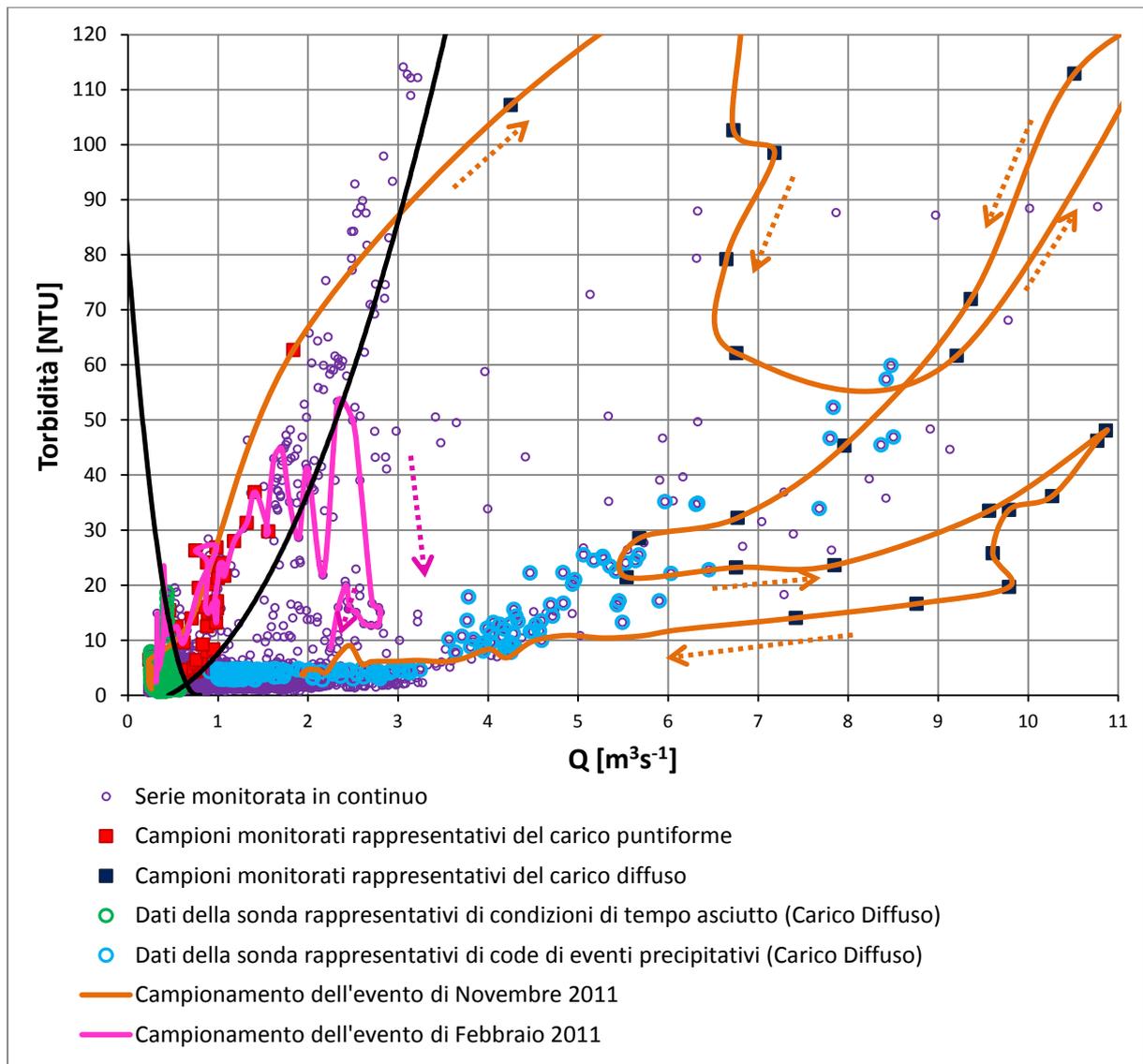


Figura 2.1.74. Torbidità oraria monitorata in continuo e mostrata in relazione della portata e evidenze della risposta della torbidità a tre eventi precipitativi del 2011 mostrandone la sequenza oraria delle misure.

In Figura 2.1.74 si mostra questa dinamica per gli eventi di febbraio e novembre 2011 per i quali si verifica un **processo d'isteresi in senso orario** (o **clockwise hysteresis**). Nella figura non mostriamo l'evento di marzo 2011 poiché i livelli di torbidità e di portata raggiunti sono stati piuttosto bassi a causa delle scarse precipitazioni, collocandosi, sia nella fase iniziale che in quella finale dell'evento, nella parte bassa del gruppo A.

Come descritto in Lawler et. al. (2006) questo comportamento isteretico che percorre l'isteresi in senso orario è comunemente attribuito a effetti di "sediment exhaustion" o a quelli del "first-flush" a scala intra-evento, in cui la limitata disponibilità di solidi sospesi ricchi di fosforo affluiscono al fiume all'inizio dell'evento precipitativo per effetto del *first flush* degli scolmatori fognari (gruppo A) pur non sempre accompagnati da portate e torbidità elevate, lasciando, per la fase successiva dell'evento valori di torbidità più elevati e valori di TP bassi (gruppo B1). In conseguenza, al termine o, comunque,

all'attenuarsi dell'evento precipitativo, il sistema idraulico del fiume tenderà a riportarsi alle condizioni iniziali (gruppo B3), ovvero condizioni di bassa torbidità e bassa portata, percorrendo idealmente una fase di diminuzione delle portate con basse torbidità e basse concentrazioni di fosforo (gruppo B2). Tale analisi ha permesso di rafforzare ulteriormente la tesi della presenza di due differenti gruppi distinti A e B, identificanti due differenti relazioni tra torbidità e concentrazione di TP, in condizioni di presenza di un grande numero di scolmatori fognari (ben 99) all'interno di un bacino idrografico non troppo esteso, come quello considerato nell'ambito di questo studio, in cui, in talune fasi, può predominare la componente puntiforme del carico di nutrienti rispetto alla componente diffusa.

Come è stato illustrato sopra, la metodologia adottata per la stima dei carichi di fosforo veicolati dal Fiume Lambrone verso il Lago di Pusiano ha permesso la distinzione delle componenti naturale ($0,78 \text{ t P anno}^{-1}$), diffusa ($3,82 \text{ t P anno}^{-1}$), e puntiforme ($2,68 \text{ t P anno}^{-1}$). I risultati ottenuti sono stati confrontati a quelli determinati nello studio di Salerno (2005), nonostante la metodologia eseguita sia differente. In Figura 2.1.75 sono rappresentati i valori dei carichi di fosforo veicolati dal Lambrone stimati da Salerno (2005), per gli anni che vanno dal 2000-2003, e il carico di fosforo totale calcolato attraverso la metodologia individuata in questo lavoro di tesi, per il periodo corrispondente al monitoraggio in continuo sul Lambrone (dal 30 aprile 2010 al 23 novembre 2011) e l'andamento delle precipitazioni cumulate nei rispettivi anni considerati. Viene evidenziata con una linea azzurra la media delle precipitazioni cumulate annuali e con una linea arancione la media dei carichi annuali. Si evidenzia come il carico di fosforo stimato sia strettamente legato al regime idrologico e pluviometrico dei periodi monitorati: anni caratterizzati da una precipitazione cumulata più alta, come l'anno 2000 in cui si sono registrati 2130 mm, è stato stimato un carico pari a 12 t P y^{-1} , mentre 2001 e 2003 sono stati anni caratterizzati da un regime pluviometrico inferiore con un carico corrispondente più basso. Si può notare che il periodo monitorato tra il 2010-2011 è stato caratterizzato da un regime pluviometrico di poco superiore (1831 mm) rispetto alla media di precipitazione cumulata annuale verificatasi dal 2000 al 2003 pari a 1808 mm, ottenendo un carico totale di fosforo di $7,28 \text{ t P anno}^{-1}$ confrontabile con la media dei carichi, che risulta pari a $6,54 \text{ t P anno}^{-1}$. Dai grafici a sinistra in Figura 2.1.75 si può notare come complessivamente vi sia una buona correlazione tra i carichi di fosforo nei diversi anni considerati in relazione alla quantità di precipitazione cumulata (a) e ancora di più all'intensità media di pioggia (c), come evidenziano i coefficienti di determinazione (R^2) pari rispettivamente a 0,85 e 0,93, mentre la correlazione risulta inferiore rispetto al numero di giorni di pioggia (b), con R^2 di 0,41. Da queste considerazioni si può affermare che, nonostante le metodologie adottate per la stima del carico di fosforo siano differenti, il carico stimato in questo lavoro di tesi sia paragonabile a quanto riportato in Salerno (2005), la cui media dei carichi tra il 2000-2003 è pari a $6,5 \text{ t P anno}^{-1}$.

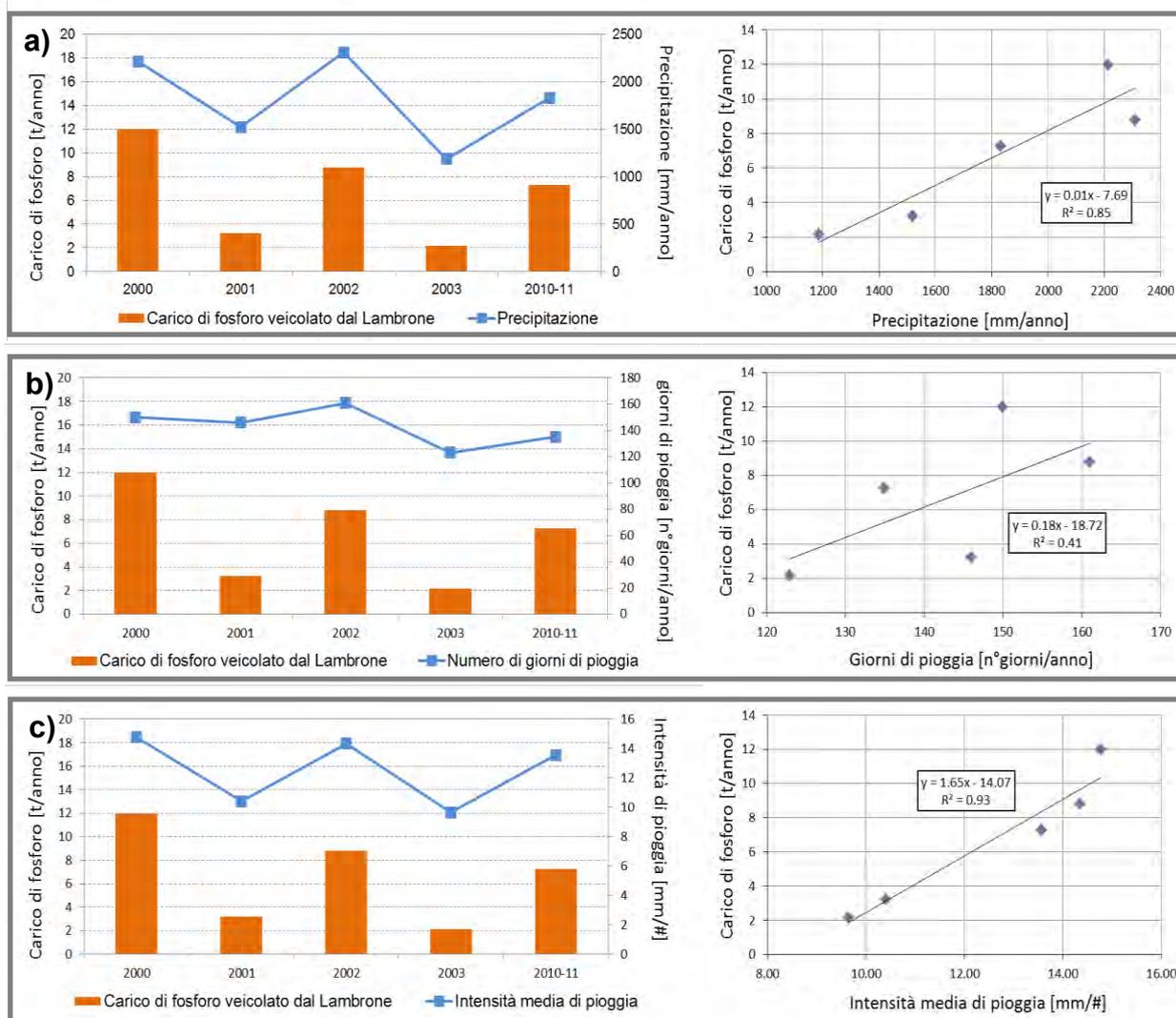


Figura 2.1.75. Sinistra: carichi annui di fosforo veicolati dal Fiume Lambrone stimati per gli anni dal 2000-2003 da Salerno (2005) e per il periodo monitorato in continuo in questo studio tra il 2010-2011, rispetto all'andamento della precipitazione cumulata (a), dei giorni di pioggia (b) e dell'intensità di pioggia (c) nei rispettivi anni considerati. Destra: correlazione tra i carichi annui di fosforo negli anni considerati e la precipitazione cumulata (a), i giorni di pioggia (b) e l'intensità di pioggia (c).

Nella seguente figura è rappresentata invece la ripartizione delle componenti del carico di fosforo stimate dal 2000-2003 e 2010-2011. La metodologia adotta da Salerno (2005) ha stimato un carico di fosforo totale costituito per il 20% dalla componente naturale, 23% dalla componente diffusa e 57% dalla componente puntuale, in cui quest'ultima è risultata la predominante. Per il periodo 2010-2011 monitorato in continuo sul Lambrone, in seguito ai risultati ottenuti e alle considerazioni effettuate si riscontra una equivalenza tra la componente del carico di origine diffusa e puntiforme.

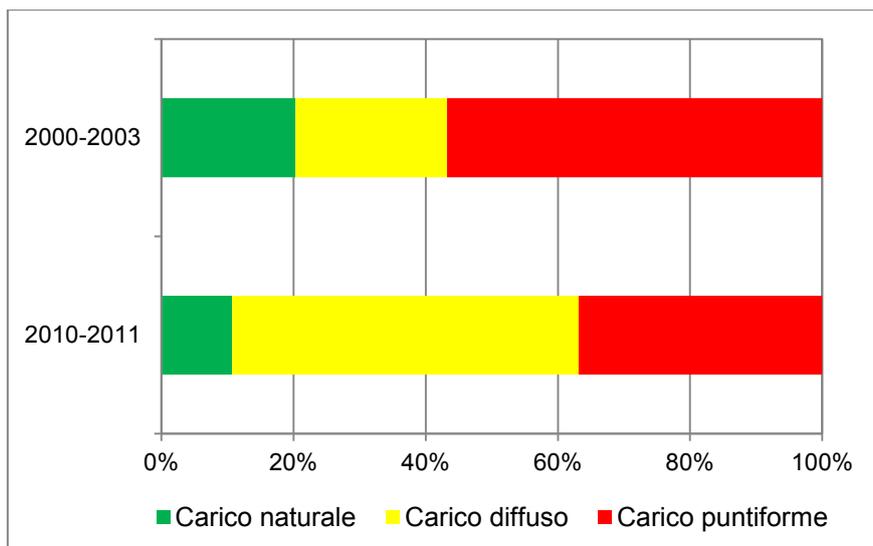


Figura 2.1.76. Rappresentazione delle componenti del carico di fosforo stimato da Salerno (2005) per gli anni dal 2000-2003 e attraverso la metodologia seguita in questo lavoro di tesi per il periodo monitorato in continuo 2010-2011.

2.1.9 Definizione del carico di fosforo di origine diffusa e puntiforme nell'intero bacino del Lago di Pusiano

Come descritto nel paragrafo precedente, con questo studio siamo giunti ad una stima delle componenti del carico di fosforo di origine naturale, diffusa e puntiforme generate nel bacino idrografico del Fiume Lambrone e da questo veicolato al lago, ottenendo rispettivamente 0,78, 3,82 e 2,68 t P/anno, per un carico complessivo di fosforo di 7,28 t P/anno nel periodo monitorato tra il 2010 e il 2011. Ulteriori analisi sono state condotte per determinare anche il carico di fosforo veicolato dall'intero bacino idrografico del Lago di Pusiano (carico totale esterno) considerando quindi tutti i principali apporti superficiali: Fiume Lambrone, Roggia Molinara, Emissario del Segrino, bacino direttamente drenante (Fascia Perilacuale).

Una stima approssimativa del carico esterno di fosforo generato nell'intero bacino idrografico è stata possibile a partire dalla porzione del carico veicolato dal Lambrone stimata in questo studio, pari a 7,28 t/anno. La quantificazione è avvenuta in accordo con quanto riportato in un precedente studio (Salerno, 2005) che stima, nel periodo 2000-2003, i diversi contributi in termini di apporti esterni di fosforo al Lago di Pusiano: 52% dal Lambrone, 13% dalla Roggia Molinara, 13% dall'Emissario del Segrino, e 16% dalla fascia perilacuale. Sulla base di queste informazioni, abbiamo stimato per l'anno 2010/2011, un **carico totale** di fosforo in ingressi al lago di **12,5 t P/anno così ripartito: 7,3 t P/anno dal Lambrone, 1,6 t P/anno dalla Roggia Molinara, 1,6 t P/anno dall'Emissario del Segrino e 2,0 t P/anno dalla fascia perilacuale** (Tabella 2.1.19).

Volendo però approfondire tale analisi abbiamo valutato distintamente le tre componenti del carico (naturale, diffuso e puntiforme) per i quattro bacini indicati. Per quanto concerne il Lambrone la metodologia e i risultati ottenuti per la stima del carico di fosforo nelle sue tre componenti è stato ampiamente descritta nel precedente paragrafo. Di seguito, andiamo ora a descrivere la metodologia per la stima del carico e i relativi risultati ottenuti per quanto riguarda, invece, i bacini della Roggia Molinara, dell'Emissario del Segrino e della fascia perilacuale.

Il carico naturale di fosforo è stato stimato per tutti e tre i bacini mediante l'implementazione del modello SWAT, come descritto nel paragrafo 2.1.7.2, **ottenendo un carico di fosforo nel periodo monitorato pari a 0,78, 0,14, 0,23 e 0,31 t P/anno rispettivamente per Lambrone, Roggia Molinara, Emissario del Segrino e Fascia Perilacuale.**

I carichi di fosforo di origine diffusa, sono stati stimati considerandoli proporzionali, sulla base del carico naturale, al carico diffuso stimato nel Lambrone e verificando che risultassero superiori ai carichi veicolati in tempo asciutto nelle differenti sezioni e monitorati attraverso campioni puntuali rappresentativi dell'intera giornata (0,33 e 0,36 tP/anno rispettivamente per la Roggia Molinara e per l'Emissario del Segrino). Tale verifica non è stata invece effettuata per la fascia perilacuale poiché non riguardano un unico corso d'acqua. **Per il periodo monitorato abbiamo ottenuto valori del carico di fosforo pari a 3,82, 0,68, 1,10 e 1,52 t P/anno rispettivamente per Lambrone, Roggia Molinara, Emissario del Segrino e Fascia Perilacuale.**

I carichi di fosforo di origine puntiforme sono stati invece stimati per i bacini della Roggia Molinara, dell'Emissario del Segrino e della fascia perilacuale andando a valutare le caratteristiche del singolo bacino maggiormente influenzanti il carico, ovvero: Abitanti Equivalenti medi dei sottobacini dei CSO, numero di scolmatori, pendenza media (Sr) dei sottobacini dei CSO, permeabilità media dei sottobacini dei CSO (Tab. 2.1.18).

Tabella 2.1.18. Stima del carico di fosforo di origine puntiforme in ciascun bacino idrografico

| | Lambrone | Roggia Molinara | Emissario Segrino | Fascia perilacuale |
|---|----------|-----------------|-------------------|--------------------|
| Carico di fosforo [t/anno] | 2,68 | 0,79 | 0,26 | 0,17 |
| Abitanti Equivalenti | 21005 | 6220 | 2023 | 1319 |
| Numero di scolmatori | 57 | 19 | 7 | 10 |
| Permeabilità media IMP [scalare] | 0,41 | 0,41 | 0,41 | 0,4 |
| Pendenza media Sr [°] | 4,7 | 3,4 | 4 | 3,2 |

Considerando la scarsa variabilità di parametri quali la permeabilità e la pendenza dei sottobacini dei CSO che ne influenzano la frequenza di attivazione, come dimostrato nel paragrafo 2.1.5.2, e avendo ottenuto una di frequenza di attivazione pari a 0,7 in tutti e quattro i bacini in esame, abbiamo considerato come parametro maggiormente relazionato al carico veicolato il numero di abitanti equivalenti gravanti su ciascun bacino, poiché il carico di fosforo è principalmente veicolato dalla

portata nera transitante nella rete fognaria, la quale è a sua volta strettamente relazionata al numero di abitanti equivalenti.

Sulla base della proporzione tra il carico annuo di fosforo di origine puntiforme e il numero di abitanti equivalenti gravanti sul bacino del Lambrone (Tab. 2.1.19), abbiamo così potuto stimare il carico di fosforo veicolato dagli scolmatori fognari in ciascuno dei quattro bacini ottenendo i valori evidenziati in rosso in Tabella 2.1.20.

Sulla base della stima delle differenti componenti del carico di fosforo per i quattro bacini indicati è stato così possibile stimare un carico totale annuo di fosforo nel periodo di monitoraggio, compreso tra il 2010 e il 2011, pari a 12,5 t P/anno, ripartito come mostrato in Tabella 2.1.19.

Tabella 2.1.19. Carico di fosforo nei differenti bacini idrografici e sua ripartizione per tipologia di origine.

| 2010/2011 | Lambrone | Roggia Molinara | Emissario Segrino | Fascia Perilacuale | TOT | % |
|---------------------|-----------|-----------------|-------------------|--------------------|-------------|-----------|
| Naturale [t/anno] | 0,78 | 0,14 | 0,23 | 0,31 | 1,5 | 12 |
| Puntiforme [t/anno] | 2,68 | 0,79 | 0,26 | 0,17 | 3,9 | 31 |
| Diffuso [t/anno] | 3,82 | 0,68 | 1,10 | 1,52 | 7,1 | 57 |
| TOT [t/anno] | 7,3 | 1,6 | 1,6 | 2,0 | 12,5 | |
| % | 58 | 13 | 13 | 16 | | |

Un'ulteriore analisi è stata condotta per la stima del carico generato in tempo asciutto veicolato al Lago di Pusiano e generato sia dalle utenze non allacciate alla rete fognaria sia dalle attivazioni in tempo asciutto di alcuni scolmatori fognari, riscontrate anche durante le attività sperimentali di censimento. Analogamente a quanto descritto nel paragrafo 2.1.8 per il bacino del Lambrone, è stato valutato il carico totale in tempo asciutto **nei bacini della Roggia Molinara e dell'Emissario del Segrino** a partire dall'analisi di campioni acquosi puntuali raccolti in assenza di precipitazione e rappresentativi dell'intera giornata di campionamento, ottenendo valori rispettivamente di **0,33 e 0,36 t P/anno di fosforo**. Considerando che nel bacino della Roggia Molinara e in quello dell'Emissario del Segrino vi sono rispettivamente ben 370 e 215 utenze non allacciate alla rete fognaria, e avendo stimato nel bacino di Valbrona (paragrafo 2.1.8) il carico giornaliero pro-capite veicolato da ciascuna utenza non allacciata in $0,54 \text{ g P giorno}^{-1} \text{ abitante}^{-1}$, abbiamo potuto ottenere una stima del carico di fosforo dovuto alla popolazione **non allacciata** e veicolato **dalla Roggia Molinara e dall'Emissario del Segrino** rispettivamente di **0,07 e 0,04 t P/anno**. Successivamente, per differenza col carico

totale calcolato in tempo asciutto, si è stimato che il carico di fosforo veicolato dai soli **scolmatori fognari attivi in tempo asciutto** nei due bacino è stato pari a **0,26 e 0,32 t P/anno**.

Tabella 2.1.20. Carichi di fosforo in tempo asciutto per i principali sottobacini gravanti sul Lago di Pusiano.

| | Fiume Lambrone | Roggia Molinara | Emissario Segrino | TOT |
|--|-----------------------|------------------------|--------------------------|-------------|
| Utenze non allacciati | 2290 | 370 | 215 | 2875 |
| Carico sperimentale in tempo asciutto [t/anno] | 0,78 | 0,33 | 0,36 | 1,5 |
| Carico dovuto ai non allacciati [t/anno] | 0,45 | 0,07 | 0,04 | 0,57 |
| Carico dovuto agli scolmatori attivi in tempo asciutto [t/anno] | 0,33 | 0,26 | 0,32 | 0,91 |

