

## SEZIONE 2. ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI

### 2.1 IL BACINO IDROGRAFICO DEL LAGO DI PUSIANO

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo del processo metodologico seguito a scala di bacino nell'ambito del Progetto PIRoGA per la stima dei carichi di fosforo afferenti al lago e delle sue differenti componenti (naturale, diffuso, puntiforme), così da poter valutare le principali criticità ai fini dell'identificazione delle principali proposte gestionali in grado di portare al risanamento del Lago di Pusiano.

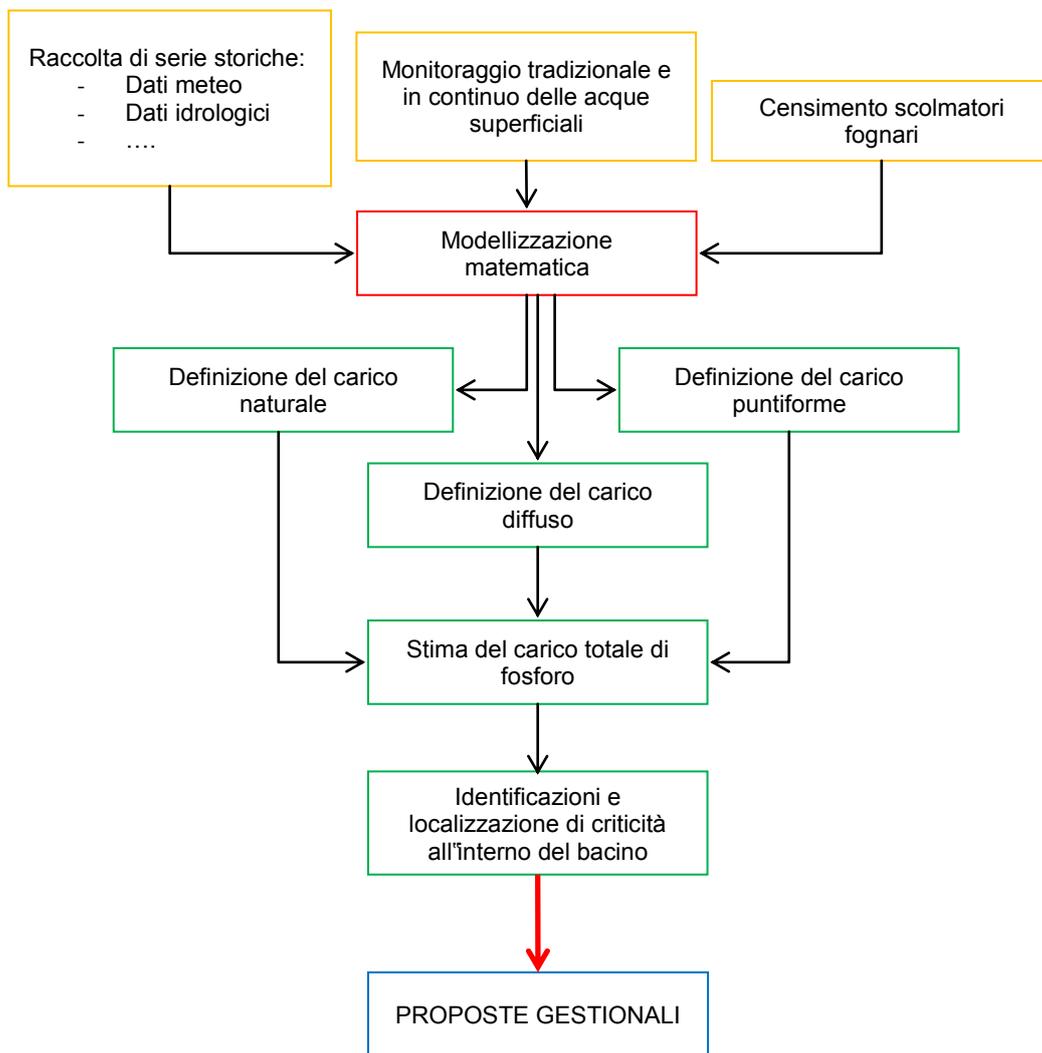


Figura 2.1.1. Metodologia di indagine adottata per stimare il carico di fosforo totale generato a scala di bacino e per conseguire gli obiettivi del Progetto PIRoGA.

Nei riquadri in giallo di Figura 2.1.1 è evidenziata la complessa fase iniziale di acquisizione e raccolta di dati sperimentali, iniziata raccogliendo dapprima tutte le informazioni in possesso degli Enti territoriali per le differenti tipologie di dati necessari allo sviluppo della metodologia (dati idrologici, meteo climatici, di autorizzazione allo scarico di reflui fognari, ecc.) e successivamente impostando una intensa campagna sperimentale (monitoraggio di qualità dei fiumi e censimento di scolmatori fognari presenti nel bacino) tesa a colmare i *data gap* riscontrati. Nei riquadri rossi è indicata la fase modellistica della metodologia, la quale è stata decisamente trasversale alle attività condotte. I riquadri verdi riepilogano i risultati ottenuti a seguito delle elaborazioni modellistiche, che hanno portato complessivamente all'identificazione delle criticità entro il bacino sulla base delle quali, grazie all'intero lavoro sviluppato, si è giunti all'elaborazione di proposte gestionali (riquadro blu), per il risanamento del Lago di Pusiano.

Di seguito si fornisce un approfondimento degli aspetti metodologici per le diverse fasi dell'approccio adottato.

## 2.1.1 Acquisizione di dati storici

### 2.1.1.1 Dati meteorologici

La fase preliminare di studio idrologico è consistita nell'individuazione e nella raccolta dei dati meteorologici registrati sul territorio. Infatti, una buona conoscenza della variabilità spaziale dei parametri meteorologici consente una definizione più approfondita delle dinamiche idrologiche che regolano il sistema. Purtroppo negli ultimi decenni si è verificato un generale disinteresse nella raccolta ed organizzazione sistematica di tali informazioni, causando la perdita di una considerevole quantità di dati e una maggiore difficoltà nella loro organizzazione.

Nella fase iniziale di questo studio, si è proseguita un'attività avviata nell'ambito di un precedente lavoro condotto nel 2002-2004 facendo una ricerca approfondita delle stazioni di misurazione, storiche ed attuali, posizionate all'interno e nelle immediate vicinanze del bacino idrologico del Lago di Pusiano. Una difficoltà da tenere in considerazione è derivata dalle dimensioni ridotte dell'area di interesse (>100 km<sup>2</sup>) e dal grado di dettaglio che si è voluto raggiungere. Questa ricerca ha richiesto uno sforzo non indifferente in termini di tempo, in quanto la rete di monitoraggio è risultata notevolmente frammentata tra i diversi Enti pubblici e privati che operano nel settore del monitoraggio meteorologico. Questa frammentazione della rete di monitoraggio ha anche comportato difficoltà aggiuntive nell'individuazione di differenti metodologie di archiviazione e di elaborazione dei dati.

In generale, per il bacino del Lago di Pusiano solo 8 stazioni delle 26 di cui si sono raccolti i dati ricadono all'intero del territorio. La loro ubicazione risulta molto disomogenea da un punto di vista non solo geografico, ma anche temporale. Fino al 1990 le uniche due stazioni comprese all'interno del bacino, le stazioni di Asso e Magreglio, erano posizionate nella parte settentrionale, lasciando scoperta tutta la porzione meridionale più prossima al lago. L'unica stazione a Sud dell'area studiata risultava esterna al bacino imbrifero e posizionata in località Costa Masnaga. Al contrario, dal 1990 in

poi sono state installate 7 nuove stazioni localizzate quasi unicamente nella parte Sud del bacino del lago. Solo le stazioni di Canzo (dal 1998) e Brenno (dal 2003), hanno caratterizzato la porzione a Nord del bacino. In relazione alle diverse esigenze di ricerca, nei prossimi due paragrafi, si porrà l'accento sull'acquisizione dei dati di precipitazione e temperatura che sono stati successivamente utilizzati nella modellizzazione idrologica.

Allo scopo specifico di implementare il modello SWAT per il bacino del Lago di Pusiano è stato aggiornato il database dei dati meteorologici per tutte le 26 stazioni sopracitate, ma in particolare per cinque stazioni all'interno del bacino (Canzo, Caslino d'Erba, Erba, Longone, Barni) così da effettuare simulazioni dal 1998 al 2011. Per i periodi in cui, per qualcuna di queste stazioni, non vi erano dati disponibili, è stato implementato un modello di ricostruzione delle serie di dati mancanti o *data gap* (Vicente Serrano, 2010) che ha previsto il confronto, per ciascun parametro meteorologico, dei dati misurati dalla stazione che presentava dei *gap* con le altre stazioni per cui in quel periodo erano invece disponibili i dati. La decisione di quale stazione utilizzare per colmare il *data gap* è ricaduta su quella che, per il tal parametro, avesse il maggior  $\tau$ , risultato del test di Kendall. La scelta del metodo di riempimento del *gap* è stata scelta tra:

- q-q plot;
- regressione lineare;
- stazione vicina.

E' stata scelta, per ciascun parametro, la metodologia di riempimento tra le stazioni sopracitate confrontando gli indici *Root Mean Square Error* (RMSE) tra la serie, estraendo casualmente un campione pari al 10% del periodo di sovrapposizione tra le serie.

#### 2.1.1.2 Dati idrologici e chimici

In questo paragrafo si affronta il problema della disponibilità di dati idrologici nel bacino del Lago di Pusiano. Uno dei risultati più importanti che si è ottenuto in questo lavoro, è stato quello di raccogliere, in maniera distribuita sul territorio, una serie di informazioni che hanno permesso di caratterizzare il sistema idrico del lago approfondendo il lavoro iniziato da Salerno (2005) nel 2002. I dati raccolti hanno permesso sia di aumentare le conoscenze idrologiche del sistema sia, da un punto di vista applicativo, di poter implementare il modello SWAT, al fine di conoscere anche i meccanismi di formazione dei flussi per l'intero bacino.

Gli unici dati presenti sul territorio erano quelli riferiti alla sezione di Caslino d'Erba lungo il Fiume Lambrone.

Nello studio pregresso condotto da CNR-IRSA tra il 2002 e il 2004 erano stati raccolti dati idrologici per la sezione di Caslino d'Erba, per la sezione del Lambrone, dell'emissario del Segrino, della Roggia Molinara, della Roggia Gallarana, dei livelli dell'Emissario naturale del Lago di Pusiano, dell'apertura del Cavo Diotti, del livello del lago.

Nell'ambito del Progetto PIRoGA è stato così aggiornato il *database* dei dati idrologici, ed è stata inoltre effettuata una intensa campagna sperimentale di monitoraggio per raccogliere le informazioni mancanti, come descritto di seguito nel paragrafo 1.2.1.3-i.

Per quanto concerne i dati idrochimici, durante lo studio precedente condotto da CNR-IRSA si era effettuata una caratterizzazione della variabilità spazio-temporale delle principali variabili chimico-fisiche di qualità dell'acqua, monitorando diverse sezioni del bacino idrologico lungo l'asta fluviale del Lambrone (Salerno, 2005; Sardi, 2011). La campagna di monitoraggio, iniziata nel 2002 si era conclusa a fine maggio 2004 ed era stata effettuata con un metodo routinario di tipo tradizionale, ossia con prelievo a cadenza mensile di campioni acquosi puntuali, rappresentativi dell'intera giornata. Per ogni punto di campionamento, sui campioni raccolti erano stati determinati analiticamente i principali nutrienti, azoto e fosforo, e i macrocostituenti.

Questa campagna di monitoraggio della qualità delle acque superficiali nel bacino è proseguita nell'ambito del Progetto PIRoGA con l'ausilio di opportuna strumentazione per il monitoraggio in continuo (a scala sub-oraria) e in tempo reale ed il prelievo automatizzato dei campioni acquosi a scala oraria (come descritto nel paragrafo 2.1.2) allo scopo di ottenere una caratterizzazione molto più dettagliata in particolare degli andamenti giornalieri delle concentrazioni dei nutrienti (Jordan et al., 2007; Horsburgh et al., 2010).

#### 2.1.1.3 Reti e scolmatori fognari

Identificati gli scolmatori fognari come una delle principali cause di inquinamento del Lago di Pusiano (Sezione 1, par. 1.2.1.5) e con l'obiettivo di voler valutare l'apporto di nutrienti al corpo lacustre dovuto ad essi, è stato effettuato un censimento di tutti gli scolmatori di piena presenti entro il bacino mediante un'intensa indagine sperimentale di monitoraggio sul territorio. Durante l'attività dedicata al censimento, suddivisibile in cinque fasi presentate nei successivi paragrafi, si è provveduto innanzitutto alla raccolta di informazioni in merito alla loro posizione, alle loro geometrie, alla loro attivazione e al contesto territoriale in cui si inseriscono.

Storicamente, il livello di dettaglio a scala nazionale delle informazioni nel formato GIS derivanti dagli enti territoriali risultava essere molto variabile a causa della scelta delle autonomie locali di adeguarsi o meno alla conversione dal formato cartaceo ad una strutturazione più complessa del dato, di concerto con le altre autorità, esplicitamente richiesta dalla tecnologia GIS: il motivo, poteva essere riferito ad una mancanza di standardizzazione e coordinamento mai stati un punto di forza nella società italiana conseguenza di una questione di origine culturale (Rumor, 1993). Allo scopo di colmare tale *gap*, un altro obiettivo del censimento degli scolmatori fognari è stato lo sviluppo di carte territoriali su supporto GIS associate a database che riassumessero le principali informazioni raccolte sulla rete e sugli scolmatori fognari.

Nella prima fase del monitoraggio dedicata al censimento, qui descritta, si è condotta una raccolta di materiale e informazioni, in particolare:

- Numero di abitanti allacciati alla rete per i differenti Comuni;
- *Shapefiles* (.shp) e .dwg delle reti fognarie;
- CTR 1:10000;
- Documentazione per la richiesta di autorizzazione allo scarico;

La documentazione necessaria è stata raccolta presso gli enti territoriali elencati di seguito:

- Provincia di Como e Provincia di Lecco;
- ATO (Ambito Territoriale Ottimale) di Como e ATO di Lecco;
- ASIL S.p.a. (Azienda Servizi Integrati Lambro), gestore del depuratore di Merone;
- Idrolario S.r.l, gestore del depuratore di Valmadrera;
- Regione Lombardia;
- Comune di Cesana Brianza, Rogeno, Longone al Segrino, Proserpio, Ponte Lambro, Magreglio.

Le informazioni raccolte sono quindi state integrate in un database informativo già in possesso di CNR-IRSA e sviluppato nell'ambito della prima fase del Progetto PIRoGA (Salerno et al., 2004). Le successive quattro fasi del censimento verranno sviluppate nel paragrafo 2.1.4.2.

## 2.1.2 Il monitoraggio in continuo delle acque superficiali

Le concentrazioni dei nutrienti nelle acque possono essere estremamente variabili sia in funzione del regime idrologico che dell'intensità e distribuzione spaziale delle precipitazioni. Infatti, le concentrazioni di nutrienti e solidi in sospensione tendono ad essere superiori durante eventi precipitativi significativi per via del dilavamento da fonti diffuse di inquinamento (superfici urbane, agricoltura) (Croke e Jakeman, 2001; Houser et al., 2006; Jordan et al., 2007). Gli eventi di pioggia intensa sono quindi difficilmente caratterizzabili mediante i tradizionali programmi di monitoraggio, mentre il monitoraggio in tempo reale e ad elevata frequenza (sub-oraria), con l'impiego di sensori installati in-situ, offre una serie di vantaggi in quanto permette un'analisi ad una scala temporale di maggior dettaglio e una caratterizzazione degli andamenti giornalieri e stagionali delle concentrazioni dei nutrienti che con il monitoraggio tradizionale periodico (solitamente a scala mensile) non sono sovente possibili (Christensen et al., 2002; Tomlinson and De Carlo, 2003; Kirchner et al., 2004; Jordan et al., 2007; Jones et al., 2009; Horsburgh et al., 2010).

Nell'ambito del Progetto PIRoGA, allo scopo di monitorare in continuo la qualità e il livello delle acque dei principali corpi idrici superficiali del bacino del Lago di Pusiano, sono state installate alcune sonde multiparametriche e diversi idrometri nei punti indicati nella mappa di Figura 2.1.2. La figura mostra la localizzazione delle sonde multiparametriche *Troll9500* (M) e *Aquatroll200* (C), degli idrometri *Instrument Service* (I) e della stazione meteorologica "La Geretta" (S).



**LEGENDA**

- |  |                      |                       |                        |
|--|----------------------|-----------------------|------------------------|
|  | Fiumi                | <b>Strumentazione</b> |                        |
|  | Laghi                |                       | Idrometro              |
|  | Profilo Bacino       |                       | Sonda di Conducibilità |
|  | Direzione del flusso |                       | Sonda Multiparametrica |
|  | Bypass               |                       | Stazione Meteorologica |
|  | Troppo Pieno         |                       |                        |

Figura 2.1.2. Localizzazione della strumentazione in campo che ha acquisito dati in continuo del livello idrologico e dei principali parametri chimico-fisici di qualità delle acque dei corpi idrici superficiali afferenti al Lago di Pusiano.

**LEGENDA**

- |                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
|                                  | FIUMI                   |
|                                  | LAGHI                   |
|                                  | BACINO GAJUM            |
|                                  | BACINO PUSIANO          |
| <b>USO DEL SUOLO (DUSAF 2.1)</b> |                         |
|                                  | AREE AGRICOLE           |
|                                  | AREE BOSCHIVE           |
|                                  | AREE UMIDE              |
|                                  | CORPI IDRICI PRINCIPALI |
|                                  | PRATI                   |
|                                  | URBANO                  |

### a) Sonde multiparametriche In-Situ® Troll9500 e Aquatroll200

Per l'acquisizione di dati sperimentali in continuo a scala sub-oraria (ogni 15 minuti), sono state installate due sonde multiparametriche *In-Situ® Troll9500* e una sonda *Aquatroll200* su cui non ci soffermeremo nella descrizione perché il principio di funzionamento dei sensori è il medesimo nelle due sonde.

Una sonda multiparametrica MP TROLL9500 (Figura 2.1.3) è stata installata il 29 aprile 2010 sul Fiume Lambrone nel Comune di Erba (CO), in un luogo riparato sotto il ponte della rotonda tra via Lecco e via Milano (Figura 2.1.4) (Coordinate piane UTM 5073154 N. 518245 E), dove si trova tuttora installata, (Fig.xxx) mentre l'altra è stata collocata sul Torrente Ravella nel sottobacino del Gajum, poco prima di un ponticello, a partire da fine aprile 2011 e sino a metà giugno 2011.. Entrambe le sonde sono state fissate ad un argine in muratura mediante un telaio metallico, per evitare che portate elevate o grossi detriti avessero potuto impattare il corpo della sonda, e sono state protette pochi centimetri a monte da una griglia a maglia media per evitare la deposizione di materiale trasportato dal fiume (rami, sterpaglie, stacci, ecc.) che può ostruire o danneggiare i sensori (Wagner et al., 2006), inficiando così la misura dei parametri monitorati. Questo tipo di sonda acquisisce dati in continuo ad un intervallo di tempo prefissato (ogni 15 minuti), che vengono memorizzati in un datalogger interno. E" quindi necessario recarsi sul campo periodicamente sia per assicurare la corretta manutenzione della sonda (pulizia dei sensori, sostituzione delle batterie, ecc.) sia per effettuare l'acquisizione dei dati tramite il software *Win-Situ*; si tratta di un programma semplice, intuitivo e completo, che permette tra l'altro di vedere e graficare in tempo reale i parametri monitorati.



Figura 2.1.3. Localizzazione del sito d'installazione della sonda multiparametrica sul Fiume Lambrone nel Comune di Erba (CO) (Fonte: Google Maps), con dettaglio della sonda.

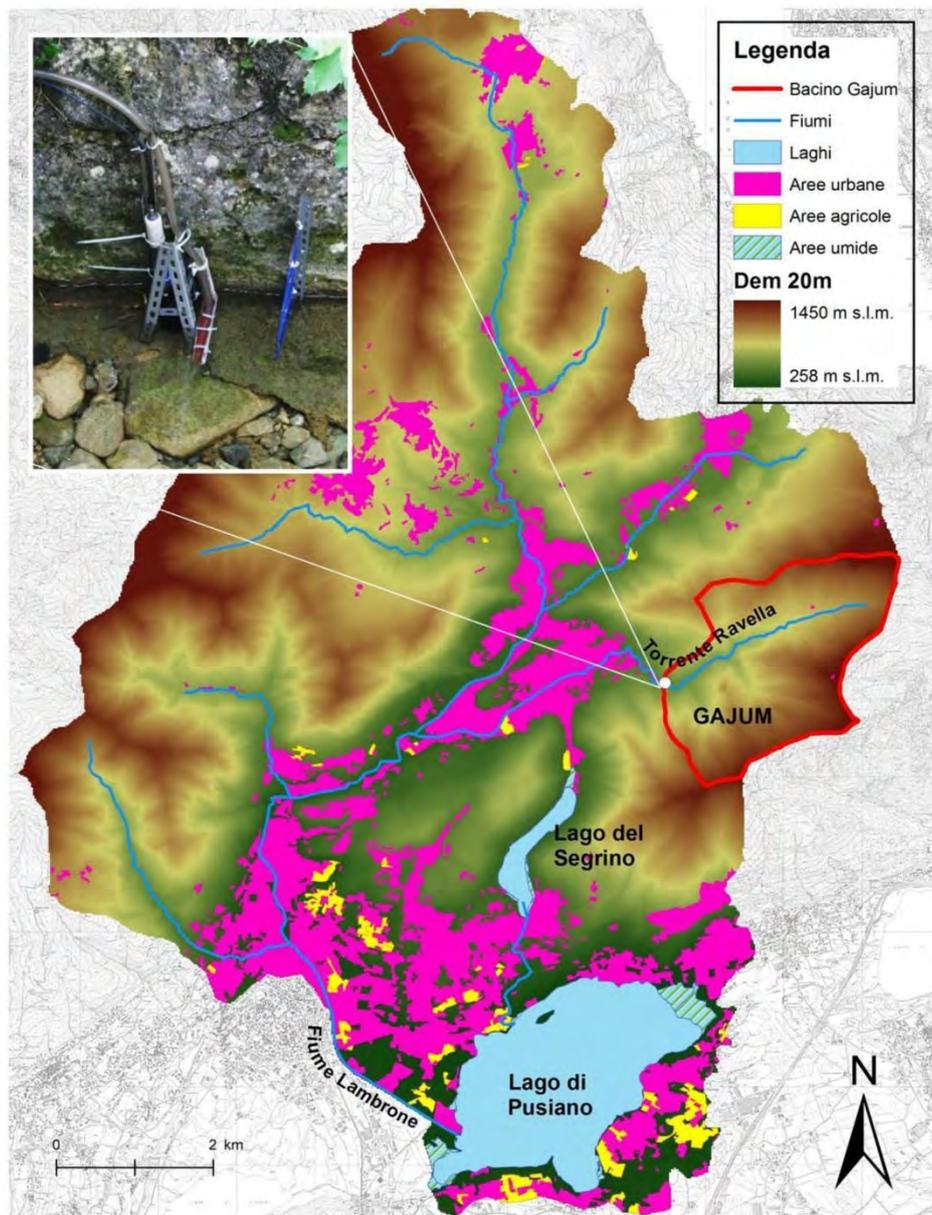


Figura 2.1.4. Mappa del bacino idrografico del Lago di Pusiano (linea nera), con indicazione delle tipologie d'uso del suolo, del sottobacino del Gajum (linea rossa) e della localizzazione della sonda multiparametrica Troll9500 by In-Situ INC. con dettaglio del punto di installazione sul Gajum (riquadro a destra) e sul Lambrone (riquadro a sinistra)

La sonda multiparametrica utilizzata permette l'acquisizione in continuo di numerosi parametri indicatori della qualità delle acque, grazie alla dotazione di 5 connettori predisposti per 7 sensori differenti, montabili in base alle esigenze dell'applicazione. (Figura 2.1.5) I parametri rilevabili sono:

- Temperatura;

- pH;
- Conducibilità elettrica;
- Torbidità;
- Pressione barometrica (livello dell'acqua);
- Ossigeno disciolto (Optical Dissolved Oxygen - RDO®);
- Potenziale redox (ORP).

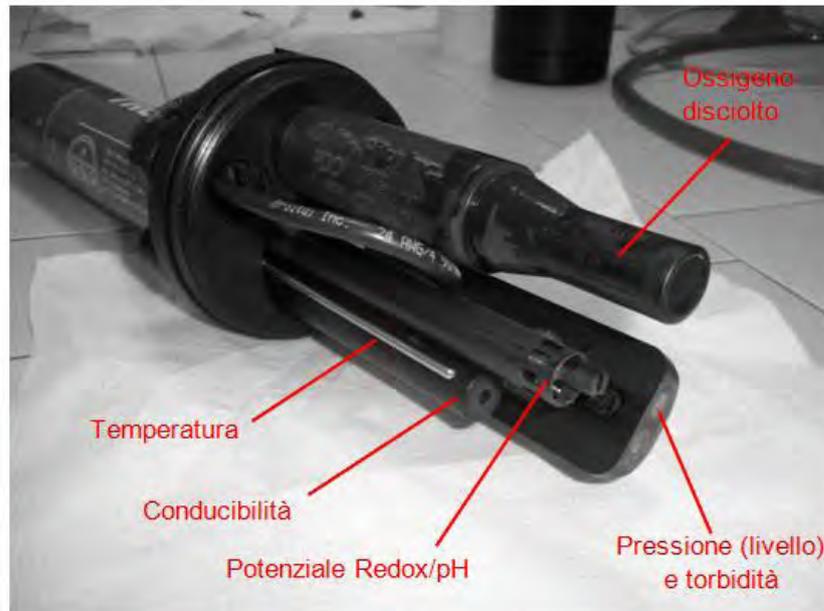


Figura 2.1.5. Dettaglio dei sensori installati sulla sonda multiparametrica MP TROLL 9500.

La sonda multiparametrica TROLL9500 risulta un sistema compatto e modulare in grado di adattarsi a differenti applicazioni e modi di utilizzo. Essa è composta da materiali impermeabili e resistenti all'azione dell'acqua e della corrente, come PVC, Titanio, Viton®, e altri materiali specifici. Può resistere a temperature comprese tra i  $-5^{\circ}\text{C}$  e i  $50^{\circ}\text{C}$ . I cavi di cui è dotata sono molto resistenti: sopportano infatti sforzi di trazione pari a 135 kg (300 lb). Ogni cavo è corredato da un cappuccio, con attacco Twist-Lock, contenente gel di silice, per evitare che entri umidità nei cavi o nel corpo sonda, proteggendo così l'elettronica del dispositivo da fenomeni di condensazione. Il gel di silice è dotato di un indicatore colorimetrico che segnala quando è attiva l'azione essiccatrice (blu) e quando non lo è più (rosa), quindi prima che tutto il volume viri alla colorazione rosa, è necessario cambiare la silice per evitare la perdita di efficacia di rilevazione dei parametri.

Verranno ora illustrati i principali sensori utilizzati nel presente caso di studio, per la raccolta di dati in continuo dei parametri chimico-fisici di qualità delle acque del Lambrone.

#### *i. Livello dell'acqua*

Il monitoraggio del livello delle acque superficiali permette, da un lato, di studiare le dinamiche idrologiche che caratterizzano il bacino del corso d'acqua monitorato, dall'altro, attraverso opportune correlazioni, di individuare la dipendenza di alcuni parametri indicativi dello stato di qualità delle

acque, dal regime idrologico. Queste informazioni risultano la base utile per intraprendere adeguate azioni di pianificazione, salvaguardia e gestione della risorsa idrica. La sonda multiparametrica rileva il livello dell'acqua a partire dalla misura della pressione che la corrente esercita su un sensore di pressione.

Un trasduttore rileva i cambiamenti di pressione, misurata in forza per unità di superficie al quadrato, esercitata da una colonna d'acqua su di un sensore di pressione.

Il sensore installato sulla sonda è di tipo "vented" (ventilato o calibrato). Esso è dotato di un'estremità del cavo di uno sfiato, in base al quale il sensore è in grado di rilevare la pressione atmosferica. In base alla differenza tra la misura della pressione assoluta (azione diretta dell'acqua sul sensore che include la pressione atmosferica) e la pressione atmosferica stessa, è possibile ottenere la misura della pressione reale esercitata unicamente dalla colonna d'acqua sul sensore. Il software di cui è dotata la sonda, converte istantaneamente il dato di pressione (in psi) in dati di livello (cm) in base all'unità di misura selezionata dall'operatore e compensando la pressione rilevata rispetto alla densità del fluido, all'altitudine e latitudine. Se è stata selezionata una modalità di visualizzazione a livello, verrà richiesto di inserire un livello di riferimento. Tale valore è arbitrariamente scelto dall'utente in base al punto di partenza da cui si vorrà visualizzare il livello.

#### *ii. Pressione barometrica*

Tale sensore è montato su ogni sonda e risulta utile per valutare gli effetti della variazione di pressione barometrica sul sistema acqua. Essa infatti è necessaria per il calcolo della percentuale di saturazione del DO.

Un record di dati di pressione barometrica registrato durante un test, può essere utilizzato per correggere le misure di livello dell'acqua realizzate con un sensore di pressione assoluta allo scopo di individuare gli effetti delle fluttuazioni di pressione barometrica. Per misurare la pressione barometrica, la sonda deve essere ventilata verso l'atmosfera tramite un apposito sfiato del cavo. La funzione primaria del sensore di pressione atmosferica è di calibrazione e di misurazione di parametri che dipendono da essa, quali l'ossigeno disciolto. Può anche essere utilizzato per compensare le misurazioni di pressione del fluido effettuate con un sensore di pressione assoluta. Il sensore di pressione è attivo in un range di pressione pari a 0-16,5 psia (854 mm Hg, 33,6 in Hg), con un'accuratezza di  $\pm 0,3\%$  FS (2,54 mm Hg, 0,1 in Hg) e una risoluzione di 0,1 mm Hg, 0,01 in Hg.

#### *iii. Conducibilità elettrica*

La conducibilità o conduttanza elettrica  $G$  risulta il reciproco della resistenza, misurata in ohm, attraverso due elettrodi opposti di  $1 \text{ cm}^3$  ad una temperatura:  $G = 1 / R$

L'unità di  $R$  è il Ohm e l'unità di  $G$  è la Siemens (mhos). La conduttanza è moltiplicata per la costante di cella in modo da ottenere la conducibilità in Siemens per centimetro (S/cm). Le costanti di cella sono determinate per ciascun sensore tramite una soluzione standard di conduttività nota. La costante

di cella dipende dalla superficie degli elettrodi e dalla distanza tra gli stessi. Le misurazioni possono essere visualizzate in microsiemens per centimetro ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) o milliSiemens per centimetro ( $\text{mS}/\text{cm}$ ).

Il software effettua la stima della conducibilità a  $25^\circ\text{C}$  per permettere un confronto tra le misurazioni effettuate a temperature diverse. La conversione richiede un coefficiente di riferimento per la temperatura della soluzione da misurare. Per convenzione, il coefficiente di temperatura standard di taratura utilizzato è quello per il potassio cloruro (KCl).

Il sensore di conducibilità è operativo all'interno di due range:

- Low Range sensor tra  $5 \mu\text{S}/\text{cm}$  e  $20000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- High Range sensor tra  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$  e  $112000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

L'accuratezza della misura è per il *Low Range sensor* di  $\pm 0,5\%$  o  $2 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mentre quella per l'*High Range sensor* varia tra  $\pm 0,5\%$  e  $+ 2 \mu\text{S}/\text{cm}$  e  $150 \mu\text{S}/\text{cm}$  and  $112,000 \mu\text{S}/\text{cm}$  quando calibrato nella regione d'interesse. Il range di temperatura varia dai  $-5^\circ\text{C}$  ai  $50^\circ\text{C}$ .

#### iv. Torbidità

La torbidità è una misura indiretta della chiarezza e trasparenza delle acque, ed è quindi un indicatore importante della sua produttività. Causata da sostanze in sospensione e organismi microscopici, la torbidità è in funzione della diffusione e dell'assorbimento di luce (Eaton et al, 2005). Torbidità non è quindi una misura diretta di chiarezza, né del colore, né dei solidi in sospensione. È una misura della loro capacità di riflettere la luce.

Il sensore di torbidità installato con la sonda, è in conformità con la torbidità standard imposta dall'ISO 7027 che specifica l'utilizzo di una luce diffusa a  $90^\circ$ . I moderni turbidimetri misurano la perdita d'intensità di un fascio di luce che passa attraverso una soluzione contenente particelle sospese e disciolte, di dimensioni tali da disperdere la luce. Il metodo è basato sul confronto tra l'intensità della luce riflessa dal campione e l'intensità della luce dispersa da una sospensione standard di riferimento. Il nefelometro è un particolare tipo di turbidimetro che misura l'intensità della luce riflessa ad un angolo retto ( $90^\circ$ ) rispetto alla luce incidente. Il sensore di torbidità è composto da una coppia emettitore-rilevatore abbinati, posizionati ad angolo retto. La sorgente di luce è un LED ad infrarossi, ottimizzato per il funzionamento a 870 nanometri (nm). Le finestre ottiche del rivelatore (*foto diodo*) e dell'emettitore (LED) sono di zaffiro, resistente ai graffi. La norma ISO 7027 ha stabilito un angolo di rilevamento di  $90^\circ$  e una lunghezza d'onda pari a 860 nm. Il sensore è un nefelometro elettronico che mette a confronto l'intensità della luce diffusa dal fluido ambientale con intensità di luce diffusa da una sospensione di riferimento standard. Più alta è l'intensità della luce diffusa, misurata in NTU, più alto è il valore di torbidità. Questa misura prevede in generale una correlazione molto buona con la concentrazione di particelle in acqua che interessano la trasparenza dell'acqua. Tuttavia, le misurazioni di luce diffusa non possono essere direttamente collegate ad un parametro gravimetrico, come ad esempio il carico di sedimenti in sospensione (TSS), a meno che non sia stata precedentemente creata un'opportuna curva per mettere in relazione le due grandezze. Il sensore opera nel campo 0 - 2000 NTU, con un'accuratezza di  $\pm 5\%$  o 2 NTU ed una risoluzione di 0,1 NTU.

### **b) Autocampionatore WaterSam**

L'autocampionatore WaterSam è stato installato sul Fiume Lambrone, circa 1 km a valle della sonda multiparametrica In-Situ Troll9500 in occasione di eventi di pioggia nei mesi di febbraio, marzo e novembre 2011 e sul Gajum durante gli eventi piovosi monitorati nei mesi di maggio, giugno e settembre 2011. Si compone di 3 parti (Fig. 2.1.6): una centralina per il controllo e la programmazione del funzionamento del sistema, un sistema per il pompaggio e il prelievo del campione e un comparto refrigerato per il mantenimento dei campioni in 24 bottiglie da un litro.



*Figura 2.1.6. Dettaglio dell'autocampionatore WaterSam.*

Il sistema di dosaggio Water Sam utilizza una pompa speciale dotata di sistema a pressione/sottovuoto per il prelievo automatico di campioni di acqua fino ad un'altezza di 6 m. Per il controllo e il comando delle sue funzionalità, il campionatore utilizza un microprocessore, che può essere programmato dall'operatore per funzionare a specifici intervalli di tempo.

A condizione che il campionatore sia fornito di un sensore di pressione, può essere programmato per attivarsi solo nel momento in cui l'acqua raggiunge un determinato livello. Una volta che il sensore di pressione ha registrato il superamento del livello soglia, il campionatore si attiva in modo automatico, prelevando aliquote d'acqua ad intervalli di tempo e corrispondenti ad un volume, programmati dall'operatore. La pompa (mostrata in Figura 2.1.7), per evitare sollecitazioni ed eccessiva usura, è dotata di un sistema di monitoraggio automatico che ne controlla il funzionamento.

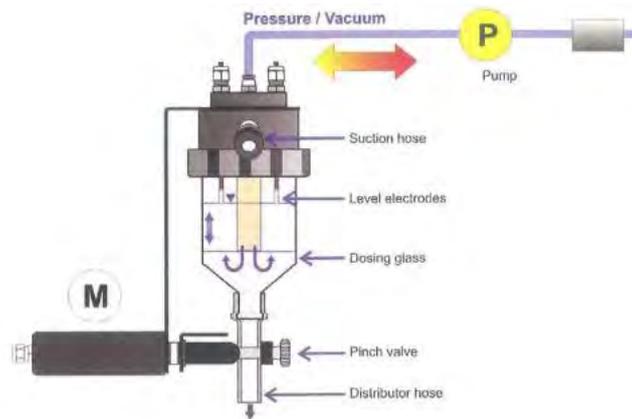


Figura 2.1.7. Dettaglio della pompa a pressione/sottovuoto.

La valvola sotto il vaso di dosaggio funziona con un comando a motore. La pompa fornisce inizialmente aria compressa in modo da pulire il tubo flessibile del recipiente di dosaggio e rimuovere eventuali residui di acqua e materiale in sospensione. Successivamente la pompa procura il vuoto per permettere il prelievo dell'acqua. Una valvola sigilla il vetro di dosaggio durante il prelievo, al termine del quale si apre per rilasciare il volume di campione prelevato nella rispettiva bottiglia. Il sistema è illustrato in Figura 2.1.8. L'autocampionatore è dotato infatti di un contenitore per la raccolta dei campioni in 24 bottiglie da un litro ciascuna. Attraverso un distributore automatico, ogni bottiglia viene riempita in ordine progressivo fino al termine del campionamento. A causa della necessità di mantenere i campioni ad una temperatura compresa tra 0°C e 4°C per evitare il deterioramento delle proprietà chimico-fisiche dell'acqua, il campionatore è stato dotato di un sistema di refrigerazione alimentata a batterie. Infine, il sistema completo è stato protetto mediante l'installazione di un cassone metallico.

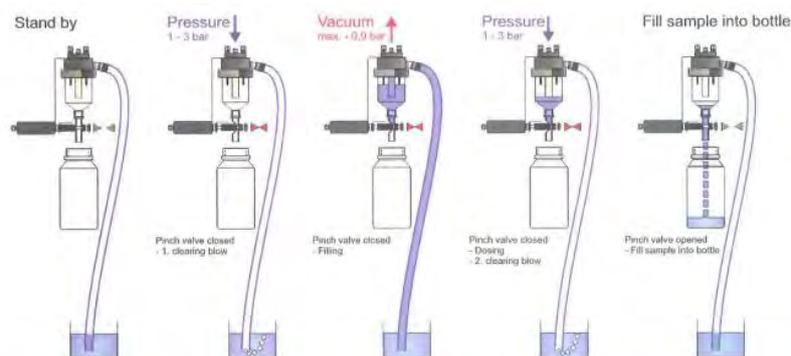


Figura 2.1.8. Meccanismo di prelievo.

I campioni prelievi sono stati conservati in borse termiche per il trasporto in sede di analisi e, successivamente, in laboratorio sono stati conservati in una cella frigorifera a 4°C e al buio, per evitare che alcuni componenti come ammoniaca, azoto e fosforo totali subissero fenomeni di

alterazione e fossero metabolizzati dai popolamenti algali e microbici presenti naturalmente nel campione. In seguito a filtrazione, ciascun campione di acqua è stato trasferito in bottiglie di polietilene e conservati in camera fredda a 4°C.

### **c) Idrometri Instrument Service**

L'idrometro (DipperIII by SEBA Hydrometrie GmbH), mostrato in Figura xxx a) e b), è costituito da:

- un sensore, costituito da un diaframma in ceramica, localizzato all'estremità di un contenitore, in grado di misurare il livello dell'acqua in base al principio di trasduzione. La misura della pressione idrostatica esercitata della colonna d'acqua, sovrastante il sensore di livello (che è completamente immerso nel liquido), viene tradotta, attraverso l'utilizzo di un opportuno software (WBedien32 versione 1.43 by SEBA Hydrometrie GmbH), in una misura piezometrica. Il trasduttore di pressione ha un range di misura compreso tra 0 e 5 metri garantito ad una temperatura tra 0 e 30 °C. Nel sensore di livello è integrato un datalogger che consente la registrazione dei dati con data e ora;
- un sensore semiconduttore che permette di misurare la temperatura dell'acqua;
- un contenitore cilindrico (camicia) in acciaio inossidabile che presenta uno spinotto di collegamento con tubicino di compensazione atmosferica contenente resine (Fig. 2.1.9). La presenza di questo tubicino è fondamentale perché in questo modo, durante la misurazione del livello, il sensore non risente delle variazioni della pressione atmosferica;
- un cavo che permette il trasferimento dei dati raccolti nel datalogger al computer.



*Figure 2.1.9. L'idrometro DipperIII composto da un contenitore cilindrico (a) collegato tramite uno spinotto ad un tubicino contenente resine.*

### Procedure di Quality Assurance Quality Control (QA-QC)

Dovendo stimare un costituente non direttamente misurabile in continuo (concentrazione di fosforo totale), di fondamentale importanza è l'applicazione di adeguate procedure standardizzate per valutare la precisione e l'accuratezza della misurazioni in modo da correggere gli errori e assicurare la rimozione di eventuali valori anomali e spuri dalla serie di dati sperimentali acquisiti in continuo

(Mourad and Bertrand-Krajewski, 2002), in particolare per quelle variabili utilizzate come predittori, quali la torbidità, ed effettuare le opportune correzioni (Horsburgh et al., 2010). Inoltre, i sensori installati *in-situ* e utilizzati nel monitoraggio in continuo occasionalmente possono avere malfunzionamenti e sporcarsi, anche per via delle condizioni ambientali circostanti, oppure essere soggetti a deriva (Wagner et al., 2006).

Le *procedure QC* in genere includono correzione dei valori fuori dal range di misura del sensore dedicato, correzioni della deriva del sensore e di valori sovrastimati dovuti a sporcizia del sensore, correzione di valori anomali, e per correggere ogni altro tipo di errore sistematico nei dati misurati dal sensore. La correzione dei dati sperimentali e l'eliminazione di eventuali errori sistematici è avvenuta grazie alla taratura dei sensori (in particolare sensore di torbidità e di conducibilità), effettuata utilizzando opportune soluzioni di riferimento, come verrà spiegato di seguito.

Le *procedure QA* includono invece: un'accurata e precisa documentazione delle informazioni di campo (ad es., informazioni sui periodici interventi di manutenzione e pulizia degli strumenti registrate su un apposito log book dello strumento, informazioni sulle condizioni ambientali di monitoraggio, sull'acquisizione dei dati misurati, ecc.) in formato cartaceo e/o elettronico; l'utilizzo di procedure standardizzate per assicurare l'integrità e accuratezza dei dati sperimentali; attività di training degli operatori per le tecniche di misurazione, l'acquisizione dei dati, la manutenzione della strumentazione di campo (Wilde, 2008).

Pertanto, prima dell'utilizzo in campo delle sonde, sono stati condotti in laboratorio dei test per la taratura dei sensori di conducibilità e torbidità: per la prima variabile la taratura è stata eseguita utilizzando sei soluzioni standard a concentrazione crescente di cloruro di potassio misurate alla temperatura di riferimento (APHA, AWWA & WEF, 1995), mentre per la seconda sono state utilizzate sette sospensioni di riferimento di formazina (concentrate e diluite) a diversa torbidità (APAT e CNR-IRSA, 2003). Successivamente l'accoppiamento di misure in continuo e di campionamenti automatici di acqua ha permesso di effettuare opportuni controlli di qualità anche valutando le condizioni in situ.

La completezza della serie dei dati di acquisiti in continuo è stata valutata come percentuale del rapporto tra il numero delle misurazioni effettuate dallo strumento secondo una scala temporale di 15 minuti, secondo quanto riportato in Cassidy e Jordan (2011). Anche se in alcuni punti le due serie di dati misurati in continuo nei due siti (Lambrone e Gajum) non è del tutto completa, ad es. in concomitanza delle operazioni manutenzione della sonda (momentaneamente rimossa dalla sede per consentire le operazioni di pulizia, sostituzione batterie, ecc.) oppure per interruzioni di misura dovute a occasionale malfunzionamento dello strumento, complessivamente la percentuale di completezza delle due serie è risultata molto elevata in entrambe i siti, pari rispettivamente a 98% nel sottobacino del Gajum e 67% per il Lambrone.

Per una descrizione più esaustiva delle procedure QA/QC adottate si rimanda a Manfredi et al (2012) e Viali (2012).

### 2.1.3 Il bilancio idrologico del Lago di Pusiano

#### Il modello SWAT

Il modello SWAT fu sviluppato per predire l'impatto delle diverse pratiche nella gestione del suolo, come i cambi di vegetazione, la gestione di bacini artificiali, trasferimenti d'acqua, il rilascio di sedimenti e nutrienti in bacini idrologici di medie e grosse dimensioni. Tenendo in considerazione differenti usi del suolo, tipi di suolo e aree a differente gestione, suddivide il bacino idrografico in sottobacini omogenei. Il modello usa un passo giornaliero ed elabora simulazioni in continuo da 1 a 100 anni. SWAT simula l'idrologia, i pesticidi, il ciclo di nutrienti, l'erosione e il trasporto di sedimenti.

SWAT è l'acronimo di "**S**oil and **W**ater **A**ssessment **T**ool", è un modello a scala di bacino sviluppato dall'Agricultural Research Service USDA (United States Department of Agriculture), Temple, Texas. È un modello di pubblico dominio scaricabile al sito web: <http://www.brc.tamus.edu/swat/>

SWAT è un *modello fisicamente basato*: non incorpora funzioni di regressione che descrivono la correlazione tra le variabili in ingresso e quelle in uscita, ma vengono richieste specifiche informazioni riguardanti la meteorologia, la pedologia, la topografia, la vegetazione e le pratiche di gestione del terreno. Di conseguenza, i processi fisici associati al movimento dell'acqua, al movimento delle particelle terrose, alla crescita delle colture e al ciclo dei nutrienti sono modellati direttamente da SWAT utilizzando i dati in ingresso.

SWAT è un *modello a simulazione continua*: riproduce i fenomeni idrologici e di trasporto nella loro interezza; non è stato progettato per simulare singoli eventi di portata.

È importante sottolineare che SWAT, ai fini della modellizzazione, opera spazialmente una disaggregazione su tre livelli differenti:

- 1) bacino;
- 2) sottobacino;
- 3) HRUs (Hydrologic Response Units) o idrotopi, ovvero unità elementari di territorio, all'interno di un sottobacino, caratterizzate dall'aver la stessa classe di uso del suolo, la stessa tipologia di suolo, uguali pratiche di gestione e perciò simili dal punto di vista del comportamento idrologico.

SWAT infatti viene definito come un modello semi-distribuito in quanto analizza la variabilità spaziale dei dati ed effettua le elaborazioni a scala di HRU, ma riaggrega i dati a scala di sottobacino per effettuare le calibrazioni.

La definizione del bilancio idrologico del Lago di Pusiano ha avuto lo scopo di stimare la portata in ingresso al lago, la cui stima accurata è fondamentale per la determinazione dei carichi esterni dei nutrienti che giungono al corpo lacustre sulla base delle loro concentrazioni. Il bilancio idrologico, è dato dalla differenza tra i flussi in entrata (INFLOW) e i flussi in uscita (OUTFLOW) ed è stato calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$\frac{dV}{dt} = P + a + a_s + a_r - E - u - d - d_s$$

dove:

P: Precipitazione	E: Evaporazione
a: flussi in entrata	d: flussi in uscita
ar: flussi diretti al lago	ds: flussi delle acque sotterranee in uscita
as: flussi delle acque sotterranee in entrata	i: infiltrazione
u: flussi antropici in uscita	ET: evapotraspirazione

Gli apporti in termini di portata al Lago di Pusiano considerati sono:

- il Fiume Lambrone, il cui contributo viene sottratto per due flussi in uscita, l'infiltrazione e quello rappresentato dalla derivazione della Roggia Molinara in località Pontelambro;
- l'Emissario del Segrino;
- la Roggia Molinara (in località Geretta);
- la Roggia Gallarana;
- l'Emissario Naturale, considerato perché si comporta anche da immissario al variare del livello del lago: infatti, per livelli molto bassi del lago, si ha un'inversione di pendenza e si può osservare un innalzamento del livello dell'emissario, ovvero il flusso d'acqua in esso si inverte, ossia l'emissario diventa un immissario;
- le acque sotterranee (falda acquifera);
- le acque drenate dalla fascia perilacuale, che si definisce come la fascia di bacino che si estende attorno al lago con ampiezza definita e che assolve diverse funzioni ecologiche, tra le quali la regolazione dei flussi idrici e dei nutrienti, provenienti dal territorio circostante, espletata dalla vegetazione perilacuale (Malanson, 1993b; Naiman et al., 1993); in questa porzione di territorio, non vi sono dei corsi superficiali, sufficientemente grandi e con un flusso costante, che possano essere considerati collettori delle acque di drenaggio di questo territorio.

Un altro apporto fondamentale al lago sono le precipitazioni che precipitano direttamente sulla superficie del lago.

Invece, i flussi in uscita in termini di portata dal lago sono rappresentati principalmente da:

- l'Emissario Naturale, quando si comporta da emissario;
- il Cavo Diotti che regola il deflusso delle acque del Lago di Pusiano.

Oltre a questi, altri due fattori da considerare in uscita sono l'evaporazione e l'emunzione di acqua da parte della vicina ditta Holcim S.p.A. per i processi produttivi.

Gli INFLOW sono stati simulati in continuo dal 2000 al 2011 mediante l'utilizzo del modello SWAT, fatta eccezione per la precipitazione e le acque sotterranee. Per quanto riguarda SWAT, il modello idrologico del bacino del Lago di Pusiano è stato calibrato e validato per due sezioni di chiusura

distinte del Lambrone, che rappresentano due porzioni di territorio con una maggiore disponibilità di dati:

- ❖ Caslino d'Erba, zona in cui si ha una circolazione idrica fortemente dipendente dalla natura carsica del substrato che si evidenzia con l'emergenza di numerose risorgive;
- ❖ Erba nella sezione in cui è stata installata la sonda multiparametrica, che fornisce valori ad alta frequenza di livello (vedi Fig. 2.1.2 e Fig. 2.1.5, Capitolo 2.1.2).

A partire da dati di livello monitorati in continuo nelle sezioni considerate e utilizzando le relative scale di deflusso livello/portata per entrambe le stazioni determinate in uno studio pregresso (Salerno, 2005), è stato possibile definire le portate e disporre di una serie di dati osservati per calibrare il modello per ciascuna sezione nei periodi monitorati. La calibrazione per la sezione di chiusura a Caslino d'Erba è stata eseguita per un intervallo temporale che va dal 01/01/2001 al 30/04/2004, mentre la successiva validazione è stata effettuata su un arco temporale di un anno, dal 01/01/2010 al 14/01/2011. Invece, per la sezione di Erba la calibrazione ha interessato i dati dal 22/02/2004 al 14/06/2004, in relazione alla disponibilità dei livelli idrometrici per questo periodo, mentre la validazione è stata condotta per il periodo compreso tra il 29/04/2010 e il 14/01/2011. Gli indici statistici utilizzati che permettono di valutare la bontà delle simulazioni al Lambrone nelle due sezioni di chiusura sono illustrati in Tabella 2.1.1. Per entrambe le sezioni considerate si può notare che si è ottenuta una buona significatività sia per la calibrazione che per la validazione del modello.

*Tabella 2.1.1. Indici statistici per valutare la bontà della simulazione (Cal = calibrazione, Val = validazione).*

<b>Lambrone (Caslino d'Erba)</b>	<b>E<sub>ns</sub></b>	<b>ER</b>	<b>EA</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Cal (01/01/2001 - 30/04/2004)	0,64	-0,08	0,4	2,2	0,67
Val (01/01/2010 - 31/01/2011)	0,47	0,01	0,5	2,7	0,67
<b>Lambrone (Sonda)</b>	<b>E<sub>ns</sub></b>	<b>ER</b>	<b>EA</b>	<b>RMSE</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Cal (22/02/2004 - 14/06/2004)	0,44	0	0,32	4	0,52
Val (29/04/2010 - 14/01/2011)	0,56	0,13	0,5	3	0,60

In particolare, per la sezione di Caslino d'Erba il coefficiente di correlazione  $R^2$  ha presentato un valore di 0,67, sia per la calibrazione che per la validazione; valutando invece l'indice di Nash-Sutcliffe  $E_{ns}$  il valore ottenuto è stato solo di poco inferiore nel caso della calibrazione, pari a 0,64, mentre è stato ben più basso in fase di validazione (0,47). L'errore relativo (ER), che presenta nella fase di validazione un valore prossimo allo zero indicando una buona coincidenza della simulazione, nella calibrazione presenta una sottostima per le portate elevate. Per la sezione di chiusura di Erba è risultato un  $R^2$  pari a 0,52 per la calibrazione e 0,60 per la validazione, con un relativo miglioramento anche per l'indice di Nash-Sutcliffe  $E_{ns}$  da 0,44 a 0,56. L'indice di Nash-Sutcliffe è più rappresentativo per verificare l'efficienza delle simulazioni, come descritto in ASCE (1993), poichè considera anche che venga rispettato il rapporto degli ordini di grandezza delle serie confrontate, mentre l'indice di determinazione tiene conto esclusivamente di quanto i dati sono correlati tra loro rispetto ad una

determinata funzione. I risultati ottenuti possono essere definiti accettabili, si può quindi affermare che la bontà del modello di simulare il flusso nel Lambrone è stata garantita per entrambe le sezioni. Una volta terminata la fase di calibrazione e di validazione del modello SWAT è stato applicato il modello a tutto il bacino. Sono stati considerati come flussi in entrata al lago la serie di dati in continuo delle portate a scala giornaliera dal 1998 al 2011 simulati con SWAT, tranne i dati di precipitazione inseriti come dati misurati e i dati di *Inflow* da acqua sotterranea stimati mentre per i flussi in uscita sono stati stimati come in Salerno (2005). Poiché non si avevano a disposizione serie in continuo dei flussi in uscita, al contrario dei flussi in entrata, per la calibrazione e validazione sono stati considerati i periodi in cui si avevano tutti i dati ed è stata calcolata la variazione del volume nel lago nel tempo, espressa come  $dV/dt$ , data dalla differenza tra i flussi in entrata,  $I$  (*Inflow*), e i flussi in uscita,  $O$  (*Outflow*) a scala settimanale secondo l'equazione:

$$\frac{dV}{dt} = I - O$$

La variazione del volume nel lago nel tempo simulata  $dV/dt$  SIM, così ottenuta, è stata confrontata con la variazione del volume nel lago nel tempo misurata  $dV/dt$ , MIS, per valutare la bontà della simulazione idrologica.

Il bilancio idrologico così definito è un bilancio idrologico a scala settimanale. Conoscendo i flussi in entrata  $I$  e la variazione del volume nel lago nel tempo  $dV/dt$ , è stato possibile simulare i flussi in uscita settimanali, indicati come  $O_{\text{Settimanali}}$ , come illustrato nell'equazione:

$$I - \frac{dV}{dt} = O_{\text{Settimanali}}$$

Una volta che sono stati calcolati i flussi in uscita settimanali,  $O_{\text{Settimanali}}$ , per passare dalla scala settimanale a giornaliera è stata eseguita una interpolazione lineare definendo i volumi in uscita giornalieri. Sulla base delle analisi condotte si è provveduto a redigere il bilancio idrologico complessivo del Lago di Pusiano dal 1 gennaio 2002 al 31 dicembre 2011, illustrato in tabella xxx. Un'importante caratteristica di questo bilancio è che nessuna delle sue componenti è in funzione delle altre. Tutte le variabili sono state analizzate indipendentemente. Inoltre è stato studiato con una cadenza temporale giornaliera: infatti tutti gli apporti e i deflussi sono stati analizzati a questa scala temporale. Si può notare che il Fiume Lambrone rappresenta il 51% degli afflussi superficiali, laddove gli altri apporti superficiali sono singolarmente tutti al di sotto del 10%. La seconda voce per importanza è l'apporto sotterraneo che rappresenta quasi il 20%, mentre l'Emissario del Segrino apporta il 7%. Trascurabile è invece l'apporto dall'Emissario naturale in quanto, nelle condizioni idrologiche medie del lago, riconferma la sua funzione di vero emissario. Gli apporti meteorici diretti rappresentano la frazione del 6%. In generale, nel considerare gli afflussi al lago, gli apporti superficiali sono i più importanti (75%), ma va considerato che il 19% del contributo in ingresso è rappresentato dalla falda. Per quanto riguarda invece i deflussi, nel periodo considerato la maggior parte è avvenuta dall'emissario artificiale del lago: il Cavo Diotti.

Tabella 2.1.2. Bilancio idrologico del Lago di Pusiano dal 1 gennaio 2002 al 31 dicembre 2010.

<b>Apporti</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>%</b>	<b>Deflussi</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>%</b>
<b>Apporti superficiali</b>	<b>2,07</b>	<b>75%</b>			
Lambrone	1,41	51%			
Segrino	0,19	7%			
Molinara e Gallarana	0,17	6%			
Perilacuale	0,17	6%			
Emissario naturale	0,14	5%			
<b>Apporti meteorici</b>	<b>0,17</b>	<b>6%</b>			
Pioggia sul lago	0,17	6%			
<b>Apporti sotterranei</b>	<b>0,51</b>	<b>19%</b>			
Falda	0,51	19%			
<b>Apporti</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>%</b>	<b>Deflussi</b>	<b>m<sup>3</sup>/s</b>	<b>%</b>
<b>Totale</b>	<b>2,75</b>		<b>Totale</b>	<b>2,74</b>	
			Variazioni lago	<b>0,01</b>	
<b>A pareggio</b>	<b>2,75</b>	<b>100%</b>	<b>A pareggio</b>	<b>2,75</b>	<b>100%</b>

L'importanza di quantificare correttamente il bilancio idrologico sta nella necessità di definire in maniera attendibile i flussi che entrano ed escono nel sistema lago – bacino, necessari per una buona stima dei carichi di nutrienti, in particolare fosforo, provenienti dal bacino.

## 2.1.4 Il censimento degli scolmatori fognari

### 2.1.4.1 Dati pluviometrici

La principale forzante al deflusso urbano (*urban runoff*) risulta essere, la precipitazione meteorica. Per questo motivo è stata di fondamentale importanza l'attività di manutenzione e di gestione di una stazione meteo con risoluzione temporale 15 minuti. La stazione meteorologica utilizzata è una stazione di proprietà di CNR-IRSA e installata nel territorio comunale di Eupilio tra le due cave dell'Azienda Agricola "La Geretta" (Figura 2.1.10).

Tale stazione ha fornito informazioni in continuo su precipitazione, temperatura atmosferica, radiazione solare, umidità relativa, pressione, velocità e direzione del vento.



*Figura 2.1.10. Stazione meteorologica localizzata nel territorio comunale di Eupilio tra le due cave dell'Azienda Agricola "La Geretta".*

#### 2.1.4.2 Il censimento degli scolmatori fognari

Una fase iniziale del censimento degli scolmatori fognari è stata quella della raccolta dei dati e delle cartografie in possesso di differenti enti territoriali nonché la loro organizzazione in un database che includesse tali informazioni con quelle raccolte da CNR-IRSA in uno studio pregresso (Salerno et al., 2004), già descritta nel paragrafo 2.1.1.3. Nella seconda fase del monitoraggio si è reso necessario pianificare una serie di ricognizioni sul campo: a seguito della localizzazione in sito dei singoli scolmatori è stato organizzato un completo archivio fotografico di immagini dei manufatti riguardanti cameretta (Fig 2.1.11) e/o scarico (Fig.2.1.12), compresi talvolta eventi di scolmo (Fig.2.1.13).



*Figura 2.1.11. Esempi di camerette dei rispettivi scolmatori: Lasnigo1C2 (in alto a sinistra), Asso1 (in alto a destra), Caglio\_Curva\_Stradetta (in basso a sinistra) e Bosisio\_Via\_Parini (in basso a destra).*



*Figura 2.1.12. Esempi di camerette e scarico dei rispettivi scolmatori: Canzo1C1 (a sinistra) e Proserpio\_SBS (a destra).*



Figura 2.1.13. Esempi di eventi di scollo per Ponte\_Lambro\_Via\_Geret (a sinistra) e Canzo2C1 (a destra).

Le informazioni acquisite in campo in merito alla posizione, alle geometrie, alla localizzazione e al funzionamento degli scolmatori fognari, sono state registrate su apposite schede di campagna predisposte da CNR-IRSA (Fig.2.1.14). Tutte le schede di campagna prodotte per ogni scolmatore censito presente nel bacino, e successivamente digitalizzate, sono riportate nell'Allegato 2.

**Progetto PIRoG-A**  
SCHEDA DI CAMPAGNA PER CENSIMENTO SCOLMATORI

OPERATORE Ricchiuti Michele, Gastino Viviano		DATA 14/4/2010
COMUNE ASSO	VIA (OPZIONALE) Loc. Brazzova	
CODICE PIROGA 10	CODICE ENTE PUBBLICO 1C1	
PROVENIENZA DATO: <input type="radio"/> Asil <input checked="" type="checkbox"/> Provincia (specificare): 38428 <input type="radio"/> Comune <input type="radio"/> Rilievo in sito <input type="radio"/> Altro (specificare):	COORDINATE ENTE LAT.: LONG.:	
	NUOVE COORDINATE LAT.: 519401 LONG.: 5079986	
TIPOLOGIA RETE (OPZIONALE): <input checked="" type="checkbox"/> Mista <input type="checkbox"/> Nera	MARK:	

RECAPITO:  
 Lago  
 Fiume Lambro  
 Altro corpo superficiale (specificare): Torrente Fola  
 Suolo  
 Altro:

NOTE SULLA LOCALIZZAZIONE:  
In ASIL 2003 risulta uno scarico in prossimità della freccia rossa nella mappa.

NOTE TECNICHE SULLO SCOLMATORE:  
In ASIL 2003 risulta uno scarico in prossimità della freccia rossa nella mappa.

NOTE SULL'ATTIVAZIONE DELLO SCOLMATORE:

FOTOGRAFIA DEL MANUFATTO

LOCALIZZAZIONE DELLO SCARICO

BACINO DRENANTE LO SCOLMATORE

STATISTICHE RELATIVE AL BACINO

AREA (m <sup>2</sup> )	SUPERFICIE (%)		ABITANTI EQUIVALENTI ASSEGNATI (Numero)			
	PERMEABILE	IMPERMEABILE	RESIDENTI	FLUTTUANTI	INDUSTRIALI	TOTALI
38428	51	49	55	3	0	51

Figura 2.1.14. Scheda di campagna utilizzata per il censimento degli scolmatori di piena.

I dati riportati sulle schede includono:

- Operatore: nome/i e cognome/i dell'operatore/degli operatori presenti all'atto della compilazione;
- Data: data nel formato gg/mm/aaaa all'atto della compilazione;
- Comune: nome del Comune a cui appartiene lo scolmatore da censire;
- Via: specificare la via/piazza/corso nel quale è situata la cameretta (in tal caso annotare la sigla "CAM") e/o nei pressi dello scarico (in tal caso annotare la sigla "SC"). La scrittura OPZIONALE tra parentesi indica che il campo è facoltativo;
- Codice PIRoGA: indicare il numero identificativo dello scarico dello scolmatore, assegnato nella prima fase durante la raccolta del materiale dagli enti competenti;
- Codice Ente Pubblico: indicare il numero identificativo dello scarico dello scolmatore e/o della cameretta (applicando le sigle "SC" e "CAM" come prefisso) assegnato dagli enti competenti;
- Provenienza Dato: indicare la provenienza del dato ufficiale spuntando la casella dell'ente corrispondente. Specificare dove espressamente richiesto. La casella "Rilievo in sito" indica l'eventuale ritrovamento di scarichi abusivi, o comunque non pervenuti all'CNIR-IRSA nella prima fase, da segnalare agli enti competenti;
- Coordinate Ente: coordinate geografiche ( $u$  = latitudine, "LAT" sulla scheda e  $\lambda$  = longitudine, "LONG" sulla scheda) espresse in [gradi sessagesimali] oppure coordinate cartesiane (facendo corrispondere "LAT" = X e "LONG" = Y) in [metri] nei sistemi di riferimento ROMA40 o ED50 (da specificare accanto al titolo del campo) del dato ufficiale;
- Nuove Coordinate: coordinate cartesiane (facendo corrispondere "LAT" = X e "LONG" = Y) in [metri] nel sistema di riferimento ED50 (da specificare accanto al titolo del campo) dello scarico dello scolmatore, rilevate in sito mediante GPS;
- Tipologia Rete: indicare la tipologia di rete, predominante in termini di lunghezza, tra unitaria (mista) o separata (in tal caso è specificata la nera) spuntando la casella corrispondente;
- Mark: annotare il numero assegnato dal GPS nella rilevazione delle coordinate;
- Recapito: indicare la destinazione delle acque scaricate dallo scolmatore spuntando la casella dell'ente corrispondente. Specificare dove espressamente richiesto;
- Note sulla Locazione: indicare eventuali peculiarità del territorio utili alla localizzazione dello scarico;
- Note Tecniche sullo Scolmatore: indicare le principali caratteristiche geometriche dello scarico, in particolare il diametro della condotta di scarico;
- Note sull'Attivazione dello Scolmatore: indicare se lo scolmatore risulta attivo o meno riferendosi anche alla presenza di residui (stracci, rigagnoli d'acqua, ecc.) in prossimità dello sbocco dello scarico, oppure se si hanno dubbi indicare la possibilità di immissione del tracciante. In prospettiva dell'ultima fase del censimento, indicare la possibilità o meno di installazione di sensori per monitorarne l'attivazione.

- Eventuale Schema: nell'apposito spazio disegnare eventuali schemi riguardanti la posizione dello scolmatore e/o lo scorrimento dei flussi nella cameretta che aiutino a comprendere meglio il funzionamento dell'opera idraulica;
- Locazione: nell'apposito spazio inserire una mappa su come raggiungere lo scolmatore.

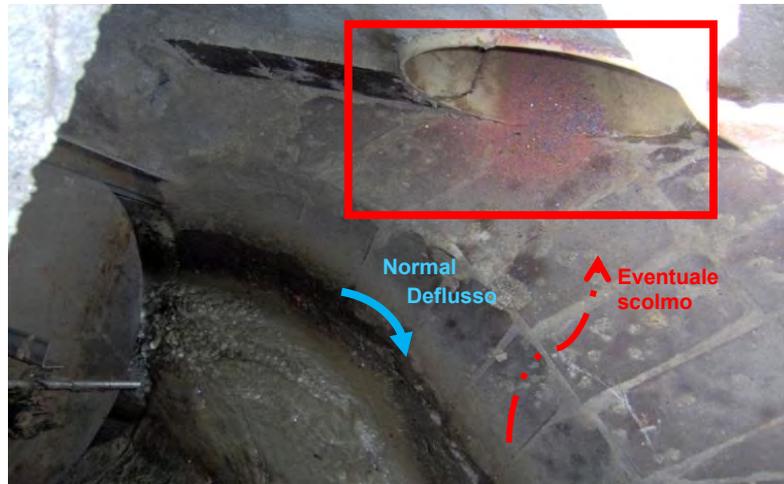


Figura 2.1.15. Posizionamento del tracciante (riquadro rosso) nello scolmatore denominato Asso4C1, vengono anche indicati direzione di normal deflusso e di scolmo delle acque di scarico.

La terza fase del monitoraggio ha previsto un secondo ciclo di uscite sul bacino allo scopo di identificare il funzionamento degli scaricatori di piena per i quali sono emersi dubbi durante la prima ispezione: il metodo scelto consiste nel posizionamento di un tracciante colorato (Fig.2.1.15 e Fig.2.1.16) in prossimità dello sfioratore di modo che un'eventuale attivazione dello stesso comportasse la scomparsa più o meno accentuata del tracciante, verificata nei successivi sopralluoghi.



Figura 2.1.16. Altri esempi di posizionamento del tracciante per Asso\_Scarena (a sinistra) e Sormano1C2 (a destra).



*Figura 2.1.17. Apparecchiatura livellostato (riquadro blu) – datalogger (riquadro rosso) nello scolmatore di Ponte Lambro in via Geret.*

La quarta fase del censimento ha riguardato l'installazione di sensori in alcuni scolmatori con l'obiettivo di monitorare in continuo l'attivazione degli stessi. La tecnologia utilizzata per il monitoraggio in continuo è composta da due dispositivi collegati mediante cablaggio elettrico: il primo, denominato livellostato, è il sensore vero e proprio costituito da un galleggiante e un contatto elettrico. Nel galleggiante è inserito un magnete che con la salita del livello permette la chiusura del contatto determinando un segnale in uscita del tipo ON/OFF: lo stato ON corrisponde al passaggio di acqua nel condotto e lo stato OFF indica l'assenza di acqua. Il secondo dispositivo costituisce la memoria: il datalogger registra il cambiamento di stato con passo temporale del minuto. In Figura 2.1.17 viene mostrata l'apparecchiatura assemblata e installata con opportuni accorgimenti tecnici volti alla protezione delle componenti elettriche, da sforzi meccanici dovuti all'acqua e ai detriti e dalle intemperie meteorologiche.

**Il risultato dell'indagine ha visto l'identificazione di 99 scolmatori.**

L'attività di monitoraggio qualitativo con tracciante si è conclusa con la verifica di 18 scolmatori attivi su 22 monitorati con la conseguenza che 4 sono risultati inattivi, questi ultimi sono: lo scolmatore di via Appiani in Bosisio Parini, lo scolmatore di Eupilio denominato 1C1 che comunque insiste sul lago del Segrino, lo scolmatore di Erba in Via Manzoni e lo scolmatore di Caglio in Via Roma. Gli scolmatori non censiti sono stati considerati, in termini cautelativi, come attivi nel prosieguo del progetto anche se vengono comunque distinti con la dicitura "NON CENSITI".

L'ultima fase del censimento ha riguardato la scelta di un certo numero di manufatti da monitorare con i livellostati, dispositivi già introdotti sopra: questa tecnica di monitoraggio in continuo si colloca a metà strada tra un'osservazione di tipo qualitativo (del quale fa parte il metodo del tracciante) e un'osservazione di tipo quantitativo nella quale può classificarsi ad esempio l'acquisizione del livello del flusso d'acqua rilevabile mediante idrometro; il livellostato infatti rileva la presenza (con almeno un livello pari 1,5 cm) o l'assenza di acqua mediante la chiusura/apertura di un contatto elettrico

comandato da un galleggiante e registra mediante datalogger, con passo temporale minimo di un secondo, il segnale (registrando valore 1) o il non segnale (registrando valore 0) rispettivamente per passaggio e non passaggio dell'acqua. Una argomentazione più specifica del metodo livellostato - datalogger prescinde dagli obiettivi dell'attività di censimento perciò non verrà trattata in questo documento. Si mette in evidenza per questa ultima fase, la scelta di 22 scolmatori monitorati mediante livellostato: la decisione di valutare più approfonditamente soltanto 22 scolmatori su 95 (escludendo quelli inattivi) è stata dettata perlopiù dalla fattibilità di installazione dello strumento nello scarico o in cameretta e dalla agevolazione nello scarico dei dati, inoltre si è cercato di dare una priorità agli scarichi che presentavano un numero di abitanti equivalenti elevato e ottenuto dalla documentazione di autorizzazione allo scarico dove disponibile.

In Figura 2.1.18 vengono mostrati gli scolmatori attivi monitorati e non monitorati con livellostato, i non attivi e i non censiti, nonché le aree urbanizzate ottenute dal DUSAF 2007 al fine di contestualizzare meglio i manufatti.

Il censimento è stato seguito dall'elaborazione dei risultati e l'organizzazione delle informazioni ottenute in un apposito database.

La diretta prosecuzione dei lavori dopo la parte dedicata al censimento ha riguardato la delimitazione dei bacini direttamente afferenti gli scolmatori con lo scopo di stimare l'area contribuente sottesa da questi ultimi in termini di acqua potenzialmente drenabile, nonché giungere ad una stima dei rispettivi abitanti equivalenti: a tale proposito si è cercato di giungere ad un compromesso compatibile con la non completezza delle informazioni riguardanti le reti fognarie e la univocità di criterio adottabile per tutti gli scolmatori; la scelta operata in quest'ottica ha comportato la configurazione di "pseudo-bacini idrografici" che ripercorrono il bacino idrografico approssimabile fino all'interfaccia tra zona permeabile e urbanizzato che si estende su una linea, poi proseguono tenendo conto dell'urbanizzato sotteso dalla rete o dalla parte di rete riconducibile allo scolmatore (i versi di scorrimento delle acque sono stati dedotti dal Digital Elevation Model 10x10 metri): un esempio riassunto nel bacino dello scolmatore di Canzo denominato 2C1 si mostra in Figura 2.1.19.

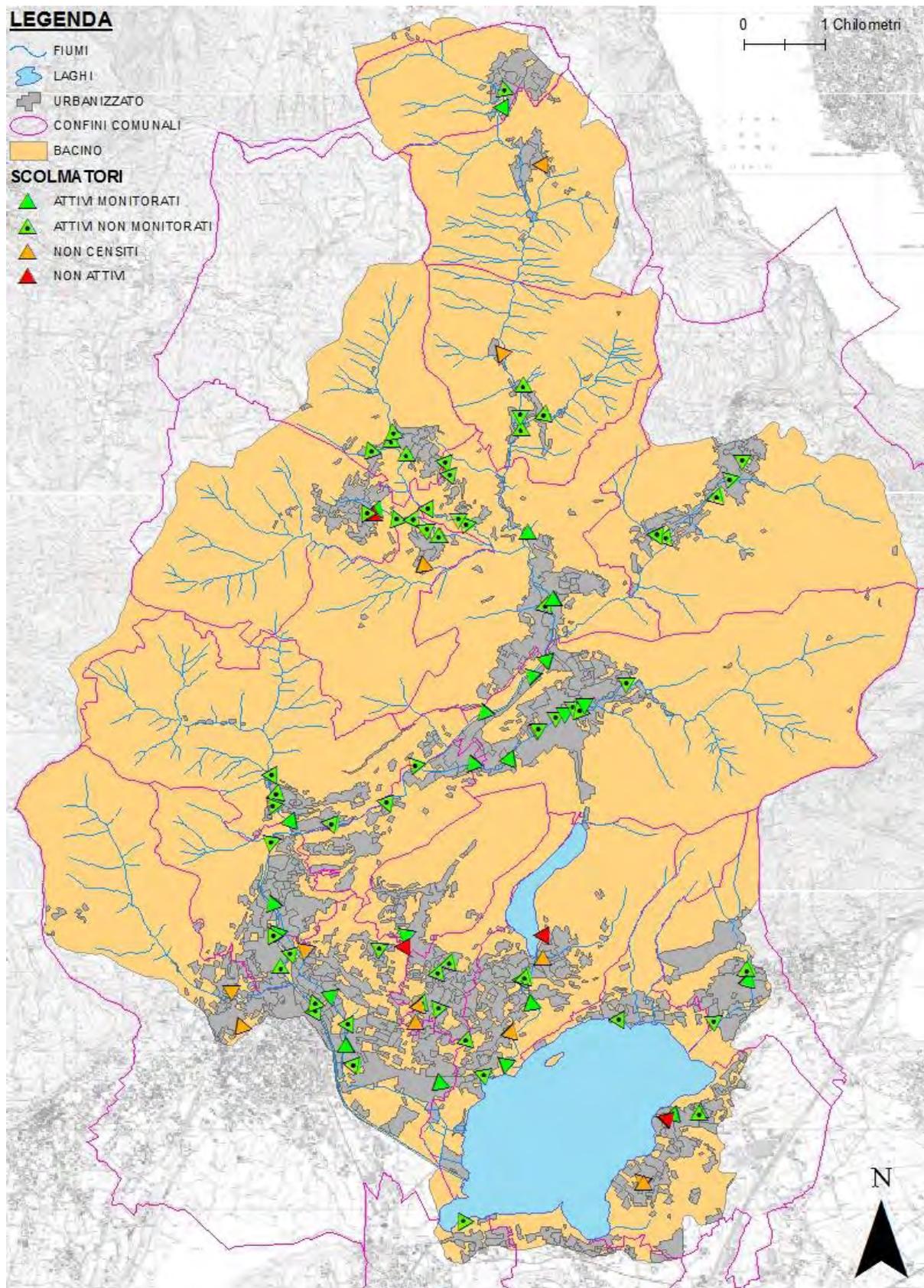


Figura 2.1.18. Localizzazione degli scarichi dei rispettivi scolmatori: vengono evidenziati gli attivi monitorati e non monitorati con livellostato, quelli non localizzati e quelli non attivi.

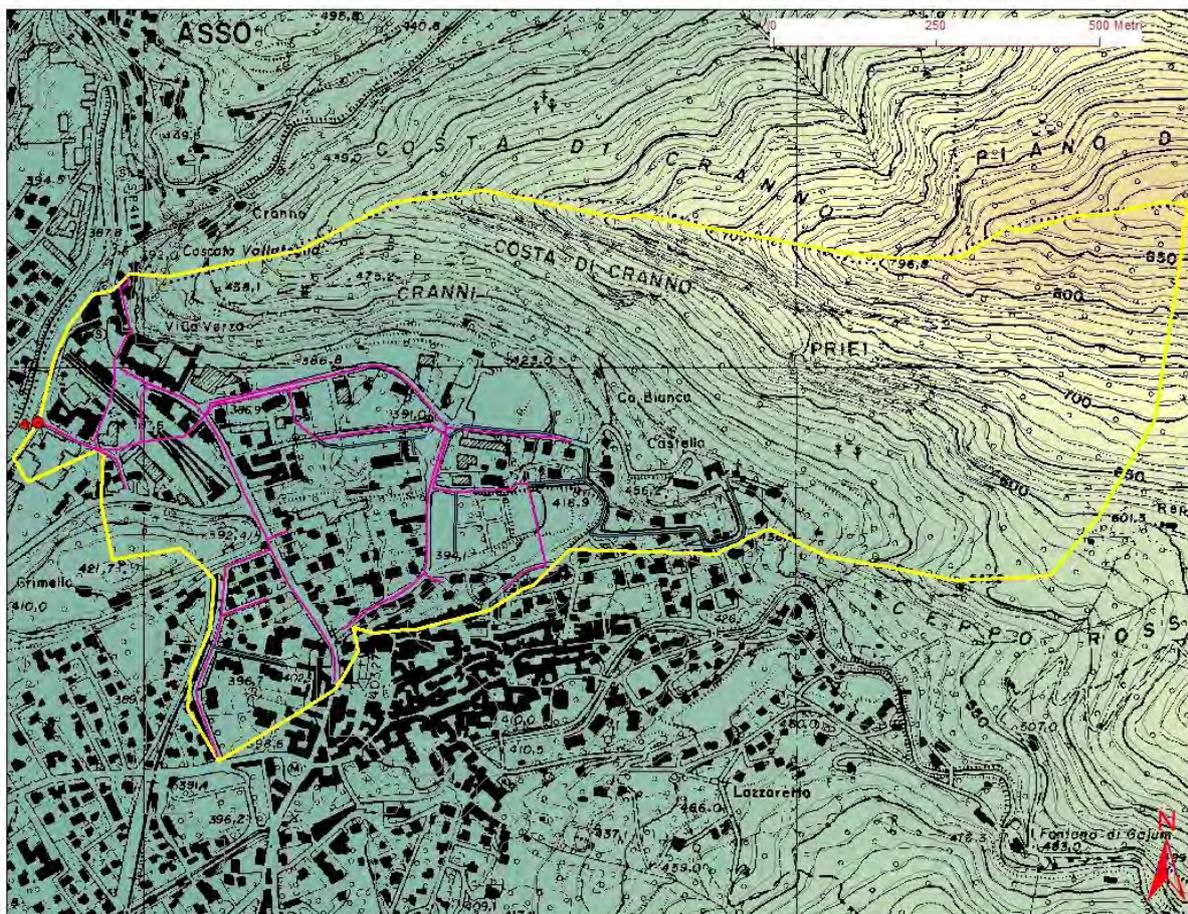
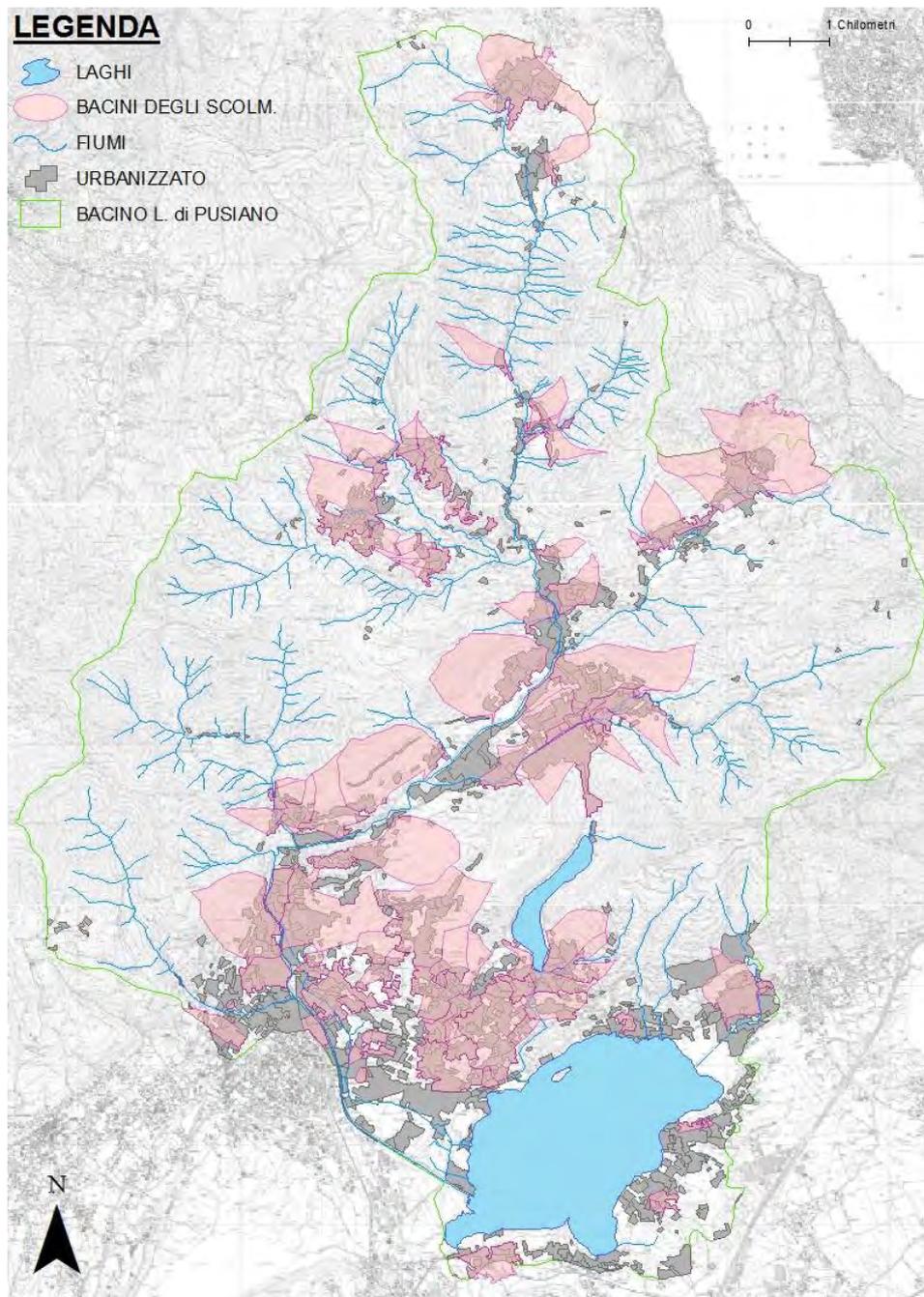


Figura 2.1.19 Il contorno giallo mostra il bacino delineato per Canzo 2C1 visibile sulla sinistra con un cerchio rosso e un triangolo ad indicare lo scarico. L'urbanizzato è distinguibile dai poligoni neri ricavati dalla CTR al 10000. Il tratto color lilla definisce la rete mista (rete unitaria), mentre i tratti che si collegano ad essa in blu e in nero definiscono rispettivamente la rete bianca e nera (reti separate).

Lo stesso criterio è stato utilizzato per la definizione degli altri bacini (Fig.2.1.20): i bacini totali delineati sono 91 invece di 95 in quanto quattro casi riguardanti scolmatori di alleggerimento (scolmatori a valle di uno più a monte facenti parte della stessa rete), il bacino è il medesimo perché gli scolmatori sono molto prossimi tra loro e scaricano nello stesso punto. I bacini proposti nella mappa sono quelli direttamente sottesi dai singoli scolmatori e vengono considerati nella successiva analisi come indipendenti l'uno dall'altro come facenti parte di reti fognarie a sé stanti.



*Figura 2.1.20. Delineazione dei bacini di 95 scolmatori. Il bacino di Canzo 2C1 viene indicato dalla freccia rossa.*

Il passo successivo è stato la stima degli abitanti equivalenti (AE) da assegnare ad ogni singolo bacino. La metodologia adottata è la seguente:

- Sovrapposizione della mappa riguardante i bacini con la mappa di copertura del suolo (DUSAF 2007) pubblicata dalla Regione Lombardia al fine di ottenere l'estensione di urbanizzato per ogni sottobacino;

- Raccolta del dato riguardante gli abitanti residenti al 2009 per i Comuni del bacino (Fonte ISTAT);
- Raccolta del dato riguardante i fluttuanti (Fonte ASIL): calcolato come 1,5% degli abitanti residenti per i Comuni non turistici e come il 75% della media giornaliera della popolazione nella settimana di punta per i Comuni turistici.
- Elaborazione del dato sugli scarichi delle industrie che hanno fornito la richiesta di autorizzazione alla Provincia e sono presenti nei bacini, trasformato in abitanti equivalenti secondo il coefficiente di  $54 \text{ g BOD}_5 / (\text{ab} \cdot \text{d})$  ottenuto da metodologia dell'IRSA (Quaderno IRSA n°120 del 2003);
- Estrapolazione dell'indicatore densità abitativa netta (Abitanti/superficie di urbanizzato) in modo da distribuire gli abitanti per tutto il Comune relativo e moltiplicazione della superficie di urbanizzato sottesa dal singolo bacino. La procedura è stata ripetuta sostituendo agli abitanti il numero di fluttuanti.
- Somma degli abitanti equivalenti, dei fluttuanti e degli AE industriali in modo da ottenere gli AE totali per ogni singolo bacino. Il risultato di tale operazione viene mostrato in Figura 2.1.21.

Come già accennato in precedenza, in prima analisi tutti i bacini vengono considerati come se fossero indipendenti, quindi non si tiene conto dell'aliquota aggiuntiva che una stessa rete apporterebbe agli scolmatori di alleggerimento più a valle nei casi dove questi siano presenti: questa situazione fornisce dunque un'idea sulle situazioni già critiche senza ancora considerare carichi aggiuntivi dovuti alla struttura delle reti. I bacini ad impatto maggiore sono quelli colorati in rosso e arancione in Figura 2.1.21 che si possono ricondurre ai Comuni di Magreglio, Valbrona, Caglio, Ponte Lambro, una parte a nord di Erba, Proserpio ed Eupilio; a seguire si distinguono i bacini in giallo con una situazione intermedia, poi quelli in verde chiaro e in verde come i meno critici. Si può notare che i bacini a maggiore impatto sono tra i bacini più estesi ma fanno anche parte di Comuni considerati turistici (tranne Erba e Ponte Lambro), inoltre il dato stimato è coerente con la realtà in quanto gli scolmatori afferenti ai bacini critici presentano diametri tra i più elevati secondo le informazioni ricavate dall'attività di censimento: ad esempio si riportano l'unico scolmatore di Proserpio in via San Bernardino con circa 1 metro di diametro (freccia blu in Fig.2.1.21), Canzo 2C1 con circa 1,20 metri (freccia rossa in Fig.2.1.21), Ponte Lambro via Geret con circa 1 metro (freccia nera in Fig.2.21) e Eupilio 1C7 con circa 0,60 metri (freccia viola in Fig.2.1.1); il fatto che i diametri siano già elevati in fase di progetto è indice del fatto che sia già stata prevista una consistente portata d'acqua da scolmare. Risulta inoltre evidente che gli scolmatori più prossimi al Lago di Pusiano avranno un impatto più rilevante in quanto meno soggetti alle dinamiche fluviali e quindi ai processi autodepurativi di un fiume. Un passo successivo del Progetto PIRoGA è stato quello di stimare portate e carichi di nutrienti veicolati dai vari scaricatori di piena, in modo da indicare ai soggetti decisori su quale fonte prestare prioritariamente attenzione in ottica di interventi mitigativi atti al miglioramento della salute del Lago di Pusiano.

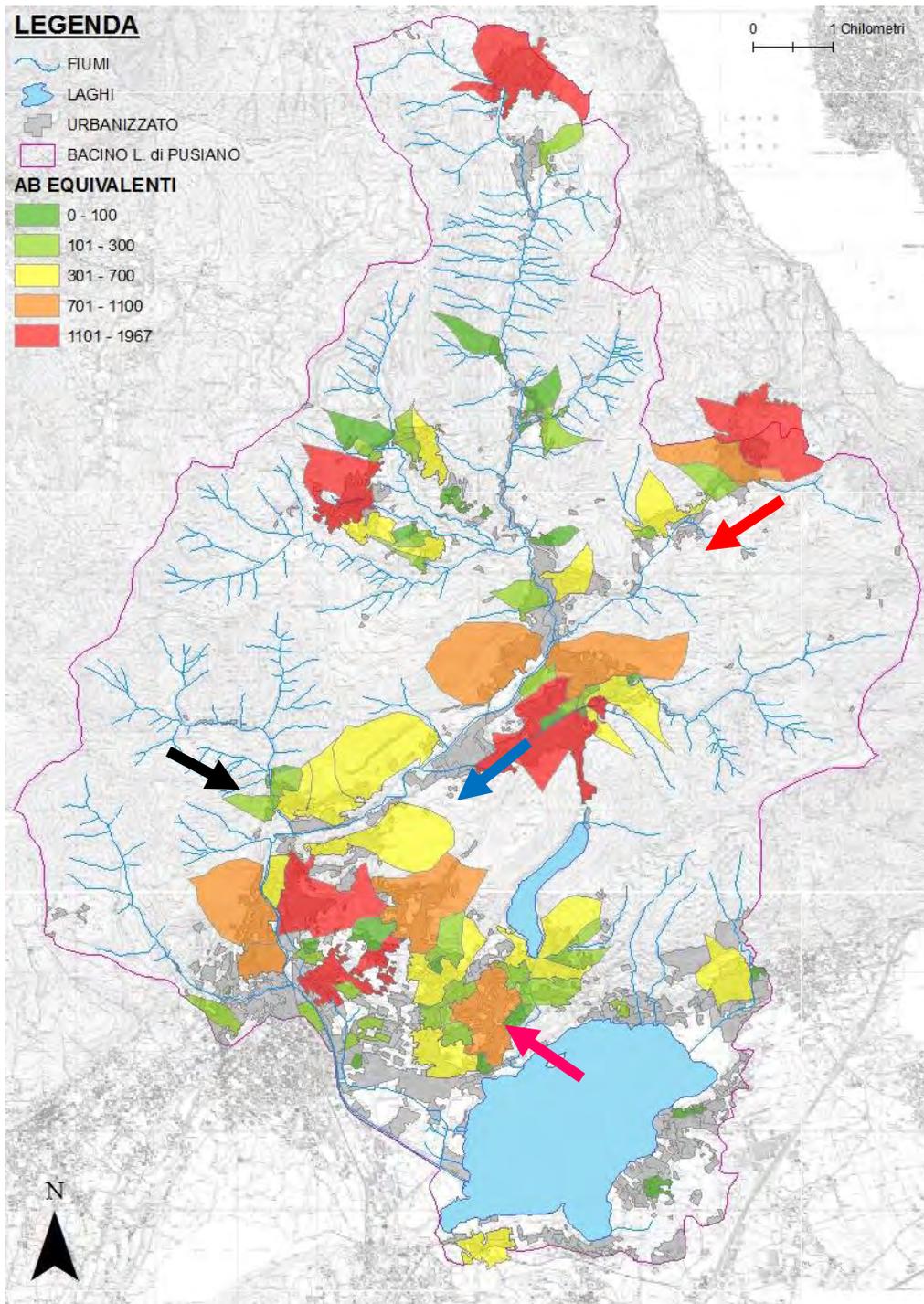


Figura 2.1.21. Impatto in termini di AE derivante da sorgenti puntiformi.

#### 2.1.4.3 Caratterizzazione di uno scolmatore campione

Sulla base dell'attività di censimento degli scolmatori fognari presenti entro il bacino del Lago di Pusiano, è stato possibile individuare uno scolmatore rappresentativo, ossia campione, dell'intero sistema fognario, considerando i seguenti aspetti:

- lo scaricatore di piena deve sottendere un bacino piuttosto vasto, con un numero di abitanti equivalenti significativo (maggiore rappresentatività dei dati sperimentali acquisiti);
- deve essere rappresentativo della tipologia d'uso del suolo "media" dei bacini che insistono sugli scaricatori del Lambrone a monte del Lago di Pusiano fondamentale ai fini dell'estensione delle simulazioni agli altri bacini del sistema in esame);
- si devono possedere informazioni quanto più possibile precise e dettagliate sul bacino gravante sullo scarico (AE, superficie, rapporto di impermeabilizzazione, ecc.) e sulla sua rete fognaria (per la simulazione corretta degli idrogrammi di piena);
- deve essere ben nota la geometria del manufatto di sfioro (per individuare per ogni evento di pioggia l'aliquota dell'idrogramma di piena scaricata nel ricettore e quella conferita alla depurazione);
- siccome da studi pregressi è stato segnalato il problema dell'infiltrazione di acque bianche all'interno della rete fognaria, si è pensato di condurre l'indagine sperimentale in un bacino in cui questo fenomeno si manifestasse.

Per le condizioni di cui sopra, la scelta è ricaduta sullo scolmatore di piena denominato CANZO 2C1 (Fig.2.1.22) di coordinate 5078087N e 520862E (UTM ED1950) situato entro il bacino di Canzo (CO), che rappresenta infatti una condizione media in termini di abitanti equivalenti rispetto agli scolmatori censiti, di tipologia di manufatto e di estensione del bacino sotteso.



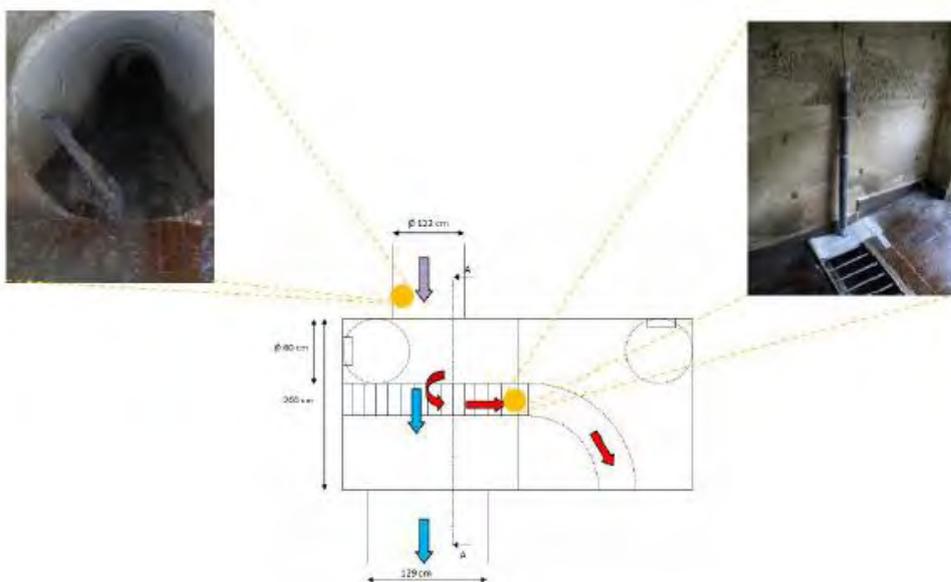


Figure 2.1.23 Posizione dell'idrometro (a sinistra) e della sonda multiparametrica (a destra) nella cameretta dello scolmatore CANZO 2C1. Nello schema centrale, la freccia di colore viola indica l'acqua in arrivo dalla rete fognaria, le frecce rosse indicano la derivazione al collettore mentre quelle azzurre la direzione dell'acqua in eccesso verso il Fiume Lambrone. All'uscita della cameretta, verso il fiume, è stato anche posizionato un livellostato.

I dati acquisiti durante i primi mesi del monitoraggio dello scolmatore oggetto d'indagine (dal 28 maggio al 28 agosto 2010) hanno consentito una buona caratterizzazione qualitativa delle acque in tempo asciutto e una altrettanto buona descrizione delle acque reflue defluite in tempo di pioggia.

Le informazioni così acquisite sono state utilizzate per la calibrazione e la validazione di un modello afflussi/deflussi utilizzato per la stima della portata transitante nella rete fognaria in tutti i 95 scolmatori attivi identificati, secondo la metodologia descritta nel paragrafo successivo.

## 2.1.5 Stima della portata scolmata dagli scolmatori fognari

### 2.1.5.1 Il modello di trasformazione afflussi/deflussi secondo la teoria dell'invaso lineare

Il metodo dell'invaso lineare costituisce uno dei metodi più comuni per costruire, in modo sintetico, l'idrogramma unitario istantaneo quando non sono disponibili osservazioni e misure sperimentali di deflusso in un bacino idrologico o, nel caso in esame, nella rete fognaria. In linea generale l'IUH si costruisce valutando il picco dell'IUH, il suo tempo di formazione, il tempo di base dell'IUH e la durata della precipitazione efficace che lo ha prodotto.

Il metodo dell'invaso lineare assimila il comportamento del bacino a quello di un serbatoio nel quale entra la portata "p" e dal quale esce, attraverso una luce, la portata "q" (Fig.2.1.24).

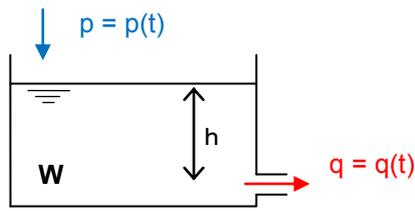


Figura 2.1.24. Serbatoio con luce a battente

La portata entrante  $p$ , generalmente variabile nel tempo secondo una legge  $p = p(t)$ , rappresenta la precipitazione meteorica che si abbatte sul bacino; la portata uscente  $q$ , anch'essa variabile nel tempo secondo una funzione  $q = q(t)$ , rappresenta la portata che transita nella sezione di chiusura del bacino in seguito all'evento di pioggia. Il serbatoio è provvisto di una propria capacità, indicata con  $W$ , che simula la capacità del bacino, praticamente coincidente con la capacità della rete idrografica.

Scopo del metodo è determinare la legge  $q = q(t)$  ossia l'andamento delle portate nel tempo alla sezione di chiusura del bacino.

Dall'espressione della portata effluente da una luce, ossia:

—

risulta evidente che la portata uscente è funzione, oltre che dell'area  $\sigma$  della luce, anche del carico  $h$  sul baricentro di questa sezione. Poiché il carico dipende dal volume invasato nel serbatoio, si può scrivere sinteticamente:

La relazione che lega il carico al volume, dipende dalla geometria del serbatoio (Fig.2.1.25), quindi, per assegnata geometria del serbatoio, si può scrivere:

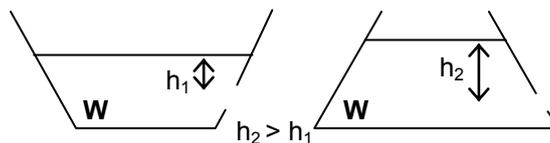


Figura 2.1.25. A parità di volume invasato  $W$  il tirante  $h$  varia in funzione della forma del serbatoio.

Il metodo dell'invaso si basa sull'ipotesi che questa relazione sia del tipo:

$$W(t) = k q(t)$$

Per questo motivo viene detto "metodo dell'invaso lineare". La costante  $k$ , o *costante di invaso*, dipende dalla forma del serbatoio, ossia dalla morfologia della rete idrografica: concettualmente schematizza e ingloba i complessi fenomeni di laminazione e di trasferimento caratteristici del sistema considerato. Essa è dunque il parametro del modello e può essere stimata attraverso formule empiriche o metodi di taratura. La formula empirica più semplice è quella che lega  $k$  al tempo di corrivazione  $t_c$  del bacino:

$$k = 0.7 t_c$$

Quando in una vasca entra un certo volume d'acqua, il pelo libero si innalza in tutti i suoi punti contemporaneamente e di una stessa quantità, pertanto, assimilare il comportamento della rete idrografica a quello del serbatoio, significa ammettere che i diversi rami della rete si riempiono contemporaneamente (**ipotesi di sincronismo**).

Con queste ipotesi, il fenomeno di formazione della piena è simulato attraverso l'equazione di continuità:

$$p(t) dt - q(t) dt = dW \quad (*)$$

Nella relazione (\*)

- $p dt$  è il volume di acqua entrato nell'intervallo di tempo  $dt$ ;
- $q dt$  è il volume di acqua uscito nell'intervallo di tempo  $dt$ ;
- $dW$  è la variazione del volume di acqua contenuto nel serbatoio nello stesso intervallo di tempo. Questa variazione è positiva quando il serbatoio si riempie, e negativa quando si svuota.

Sostituendo nella equazione (\*) la legge di efflusso che governa l'uscita dal serbatoio (\*\*):

$$w \left( \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \curvearrowleft \end{array} \right) = k q \left( \begin{array}{c} \curvearrowright \\ \curvearrowleft \end{array} \right) \quad (**)$$

si ottiene un'equazione differenziale a variabili separabili:

$$p dt - q dt = k dq \quad (***)$$

$$\frac{p}{q} dt - dt = k \frac{dq}{q} \quad (***)$$

Integrando la (\*\*\*) con i limiti di integrazione:

ipotizzando una pioggia costante  $\neq 0$ , l'integrale generale risulta essere:

- -

Esso esprime la risposta del bacino ad una pioggia che dura un tempo infinito.

L'andamento della portata, nel caso di  $q_0 = 0$ , è visibile in Figura 2.1.26. Essa cresce nel tempo e tende asintoticamente a raggiungere il valore della portata meteorica  $p$ .

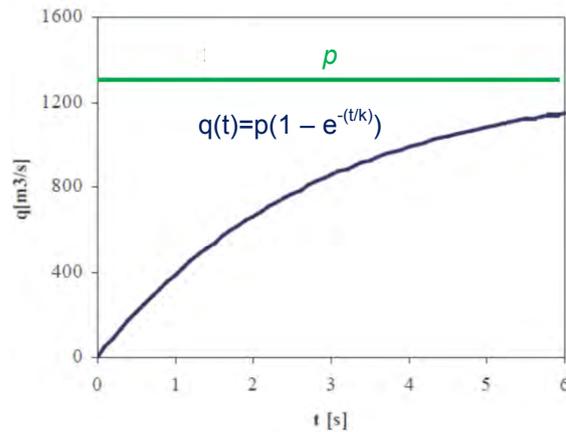


Figura 2.1.26 Andamento della portata nel tempo con una precipitazione costante di durata infinita.

Nella realtà questa curva è valida solo fino al tempo  $t_p$  corrispondente ad una durata finita della pioggia, a cui corrisponde una portata  $q^*$ . Per sapere come prosegue la curva di portata oltre  $t_p$ , basta riscrivere l'equazione (\*\*\*) ponendo  $p = 0$  e integrando con i seguenti estremi:

L'integrale generale diventa così, riassumendo con  $\tau = t - t_p$ :

$$- \quad (****)$$

Si tratta di una curva esponenziale decrescente che tende asintoticamente a zero (Fig.2.1.27).

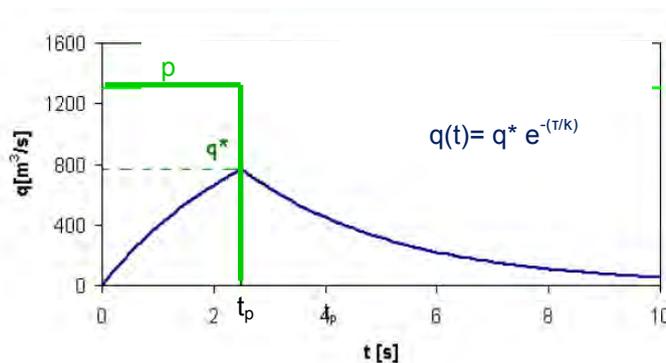


Figura 2.1.27. Onda di piena.

Si può concludere che l'onda di piena, valutata con il metodo dell'invaso, sia costituita da una curva crescente fino ad un valore massimo  $q^*$  che si realizza al tempo  $t = t_p$ , seguita da una curva decrescente che tende asintoticamente a zero.

L'idrogramma unitario istantaneo  $u(t)$  del modello dell'invaso lineare è la risposta ad un apporto impulsivo unitario di durata infinitesima. Poiché l'impulso ha un volume unitario  $S_0 = k q_0 = 1$ , si ottiene applicando la relazione (\*\*\*\*):

- \_ - \_ -

Il valore della costante di invaso, come già accennato in precedenza, può essere stimato, in funzione di alcune grandezze che caratterizzano la morfologia del sistema bacino – rete ed eventualmente anche in relazione all'afflusso meteorico, attraverso relazioni proposte in letteratura (Desbordes, 1975; Ciaponi e Papiri, 1992).

#### I parametri del modello

Il modello di simulazione afflussi/deflussi necessita di alcuni parametri, che vanno definiti in base alle caratteristiche morfologiche dei sistemi bacino-rete ed alle caratteristiche d'uso dei bacini in esame. La definizione dei vari parametri è stata effettuata sulla base di formule di letteratura o applicando valori precedentemente tarati su bacini rappresentativi.

La costante di invaso può essere espressa mediante la relazione di Ciaponi e Papiri (1992):

$$K = 0.5 \frac{S^{0.351} d^{0.358}}{I_m^{0.163} s_r^{0.29}}$$

Tuttavia, in questa sede, ai fini di una valutazione più rigorosa della costante d'invaso, è stata adottata un'espressione che tiene conto sia della variabilità di  $K$  da evento a evento sia della dipendenza della risposta idrologica del bacino dalla morfologia della rete di drenaggio (Ciaponi e Papiri, 1992):

$$K = \frac{2.66 S^{0.352} d^{0.316} Y^{0.528}}{I_m^{0.223} s_r^{0.221} I_{max}^{0.225}}$$

dove

- $K$  è la costante d'invaso [ $min$ ];
- $S$  è la superficie totale del bacino [ $ha$ ];
- $d$  è la densità di drenaggio [ $m/ha$ ];
- $Y$  è un parametro di forma del bacino
- $I_m$  è il rapporto di impermeabilizzazione del bacino;
- $s_r$  è la pendenza media ponderale di tutta la rete di drenaggio [%]
- $I_{max}$  è l'intensità di precipitazione connessa con una durata pari a quella critica [ $mm/ora$ ].

La formula è stata ottenuta analizzando 50 eventi di piena registrati in 13 bacini urbani sperimentali dislocati geograficamente in Europa, USA e Australia e caratterizzati da un'estensione variabile tra 1,74 ha e 253,50 ha; una pendenza media del bacino tra 0,11% e 30,48%; una pendenza media ponderale della rete di drenaggio tra 0,20% e 15,82%; una densità di drenaggio tra 24,8 m/ha e 232,8 m/ha. Si osserva che le caratteristiche del bacino e della rete fognaria di Canzo ricadono all'interno dell'intervallo di applicabilità della formula.

Tutti i parametri componenti la costante di invaso sono stati calcolati mediante software ArcGis 9.3®, in particolare:

- La superficie totale del bacino "S" è stata calcolata elaborando la mappa di copertura del suolo pubblicata dalla Regione Lombardia (DUSAF, 2007): per ogni bacino del singolo scolmatore (si veda il paragrafo 2.1.4.2 per la delineazione) è stata estratta la copertura del suolo ed è stata effettuata una riclassificazione del suolo attribuendo all'urbanizzato la dicitura "IMPERMEABILE" ed alle altre coperture di suolo, comprese le aree destinate a parchi e giardini che nel database compaiono come "urbanizzato", la dicitura "PERMEABILE". Il valore inserito nella formula risulta così essere la superficie denominata impermeabile in quanto principale responsabile del deflusso superficiale.
- La densità di drenaggio "d" è un parametro composto dal rapporto tra la lunghezza della rete sottesa dal singolo scolmatore e l'area direttamente connessa.
- Il parametro Y rappresenta l'ordinata del baricentro dell'area sottesa dalla curva  $S/S_{tot} - L/L_{max}$  con:
  - $S_{tot}$  = superficie totale del bacino sotteso dalla sezione di calcolo;
  - $L_{max}$  = lunghezza del collettore principale (del bacino sotteso dalla sezione di calcolo) inteso come quello che raccoglie la maggior superficie tributaria;
  - L = distanza di una generica sezione X del collettore principale dalla sezione di chiusura del bacino;
  - S = superficie dell'area tributaria che grava sulla generica sezione X.

La curva può essere ottenuta considerando le varie sezioni X in corrispondenza dei pozzetti del collettore principale. Quando il pozzetto è di confluenza, la curva  $S/S_{tot}$  subisce ovviamente una brusca variazione verticale. La variazione di area fra due pozzetti successivi può essere ipotizzata lineare. In Figura 2.1.28 si mostra un esempio grafico che aiuta a spiegare come si ottiene il parametro Y.

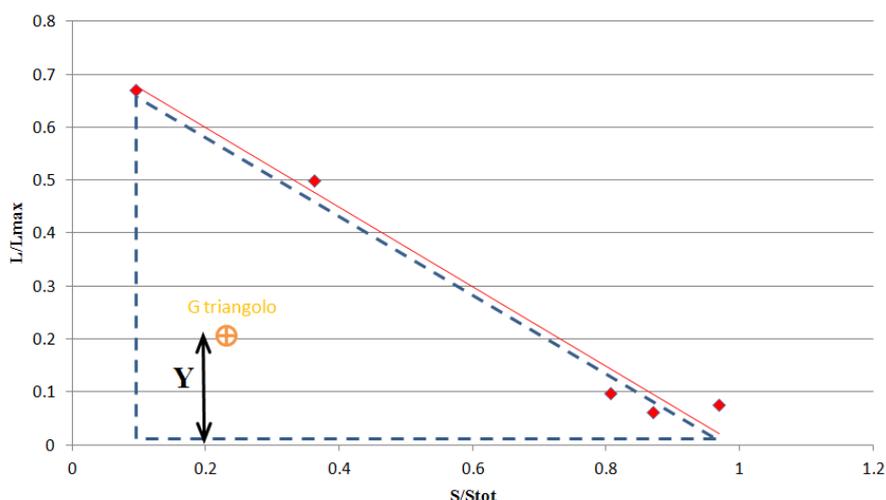


Figura 2.1.28. Significato del parametro  $Y$ . La linea tratteggiata mostra l'area sottesa dalla linea  $S/S_{tot}$  -  $L/L_{max}$ .

- $I_m$  è un rapporto di impermeabilizzazione che è stato ricavato come media pesata sulle aree assegnando alle aree di tipo residenziale il valore 0,4 e alle aree produttive il valore 0,5 (i coefficienti sono stati assunti da manuale).
- $S_r$  è la pendenza media ponderale calcolata come pendenza dei singoli tratti "i" componenti la rete, moltiplicata per la lunghezza del singolo tratto, facendone poi la somma ed infine divisa per la lunghezza totale della rete:

La non disponibilità di informazioni dettagliate sulle pendenze dei singoli tratti di rete ha visto la necessità di utilizzare il DEM 20x20 pubblicato dalla Regione Lombardia come supporto per estrarre le quote delle estremità dei singoli tratti di rete e giungere alle pendenze dei vari tratti.

- $I_{max}$  è l'intensità massima intesa come valore massimo di pioggia al minuto dall'inizio dell'evento ad un tempo corrispondente al tempo di corrivazione ( $t_c$ ) del bacino dello scolmatore (la precipitazione acquisita con  $\Delta t = 10$  min è stata mediata per avere il valore al minuto); il valore di  $I_{max}$  è stato poi trasformato in mm/ora.

Il modello tiene anche conto del valore della frazione di pioggia che costituisce l'afflusso al sistema drenante, ossia la pioggia netta, è calcolato valutando le perdite idrologiche mediante un coefficiente di afflusso,  $\varphi_{imp}$ , ed una perdita iniziale,  $I_{store}$ , dovuta all'accumulo nelle depressioni superficiali del bacino: in particolare il coefficiente di afflusso  $\varphi_{imp}$  è stato calcolato come media pesata sulle aree mediante valori dedotti da manuale e posti uguali a 0.7 per le aree residenziali e 0.8 per le aree produttive.

La Figura 2.1.29 mostra la schermata iniziale del modello in Matlab da dove viene operato il settaggio dei parametri: "KT" corrisponde alla costante di invaso, "AIMP" sintetizza il prodotto tra superficie

connessa e rapporto di impermeabilizzazione, “IMPFI” corrisponde a  $\phi_{imp}$  e “Istore” all’immagazzinamento iniziale.

```

1  % INIZIO TRASFORMAZIONE AFFLUSSI DEFLUSSI
2  % CONSIDERO GLI EVENTI DA METTERE TUTTI ASSIEME IN UNA MATRICE RAIN
3  % INSERIMENTO DEI DATI RELATIVI AL BACINO
4
5  clear all
6  clc
7  close all
8
9  KT=10;
10 NTANK=1; % numero di serbatoi
11
12 AIMP=12.5;% Area connessa da inserire in ha
13 IMPFI=0.72;
14 ISTORE=1.5;
15 % AIMP=A*IMP; IMP nel range 0.50-0.65 in aree residenziali;
16 % IMP nel range 0.70-0.85 in aree produttive
17 % In aree residenziali IMPFI=0.80, in aree produttive IMPFI=0.85
18 % INSERIMENTO DATI RELATIVI AL DILAVAMENTO
19 % ISTORE=2 [mm]

```

Figura 2.1.29. Prospetto della schermata iniziale del modello.

#### Applicazione del modello allo scolmatore campione CANZO 2C1

Mediante il modello concettuale globale di trasformazione afflussi/deflussi descritto sopra sono stati ottenuti gli idrogrammi di piena corrispondenti agli ietogrammi sperimentali. Alle portate di pioggia derivanti dalla simulazione sono state poi sommate le portate nere medie giornaliere civili e industriali indicate nella “Domanda di autorizzazione allo scarico di acque reflue urbane non depurate” fornita dall’Azienda Servizi Integrati Lambro S.p.A. Le simulazioni sono state condotte inizialmente supponendo contributiva una percentuale dell’area impermeabile direttamente connessa al sistema di drenaggio. Inoltre, dato che sovente le osservazioni sperimentali hanno mostrato livelli in fognatura significativamente maggiori rispetto a quelli di tempo asciutto anche nel tempo intercorrente tra due eventi piovosi, per taluni eventi è stata stimata una portata di base connessa al drenaggio naturale del bacino. È infatti verosimile che una parte dei deflussi generati sull’area non urbanizzata in occasione di eventi meteorici riescano a infiltrarsi nel sistema di drenaggio artificiale più a valle: questa portata “parassita”, variabile da evento a evento e probabilmente connessa alle condizioni di pioggia nei giorni precedenti, è stata considerata separatamente rispetto alla portata generata dalla forzante meteorica: inizialmente è stata sottratta dalla portata osservata togliendone il valore minimo, in modo da ottenere una traslazione della curva sull’asse delle ascisse e rendere il processo di calibrazione – validazione il più possibile funzione della portata data dalla precipitazione, da quella media nera civile e industriale, quest’ultime indicate nella autorizzazione allo scarico. La portata cosiddetta infiltrata per il bacino di Canzo2C1, stimata attorno agli  $0,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  è stata riconsiderata nella determinazione della soglia di sfioro e quindi della portata effluente dallo scolmatore. Una peculiarità del metodo dell’invaso lineare è

quella, per sua natura, di non tenere conto di possibili sfasamenti temporali tra idrogrammi simulati e misurati: questi sfasamenti, che comunque non hanno rilevanza ai fini della stima quantitativa dei deflussi, possono essere eliminati introducendo nella modellazione un fattore di ritardo (*time lag*); mediante una procedura di cross – calibrazione questo fattore di ritardo è stato stimato per il CANZO 2C1 e poi applicato agli altri scolmatori del bacino.

In Figura 2.1.30 si mostra un esempio ricostruito per un determinato evento dove si può notare il contributo della portata infiltrata sull'osservata.

In Figura 2.1.31, si può scorgere un lieve anticipo (dell'ordine di una decina di minuti) della curva simulata rispetto alla osservata.

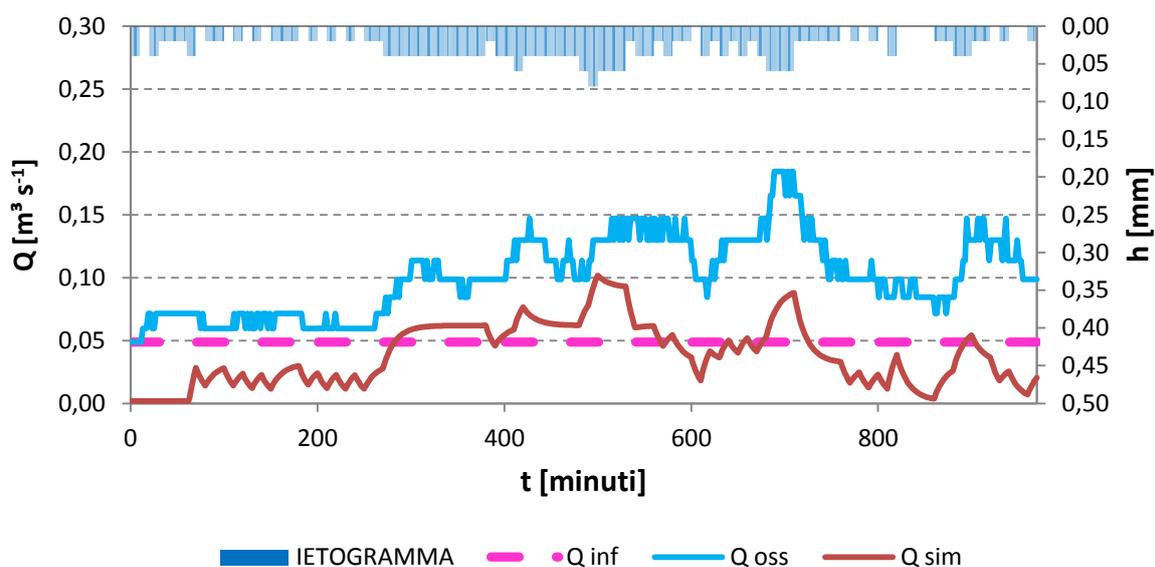


Figura 2.1.30. Simulazione per un determinato evento precipitativo e il contributo di infiltrazione.

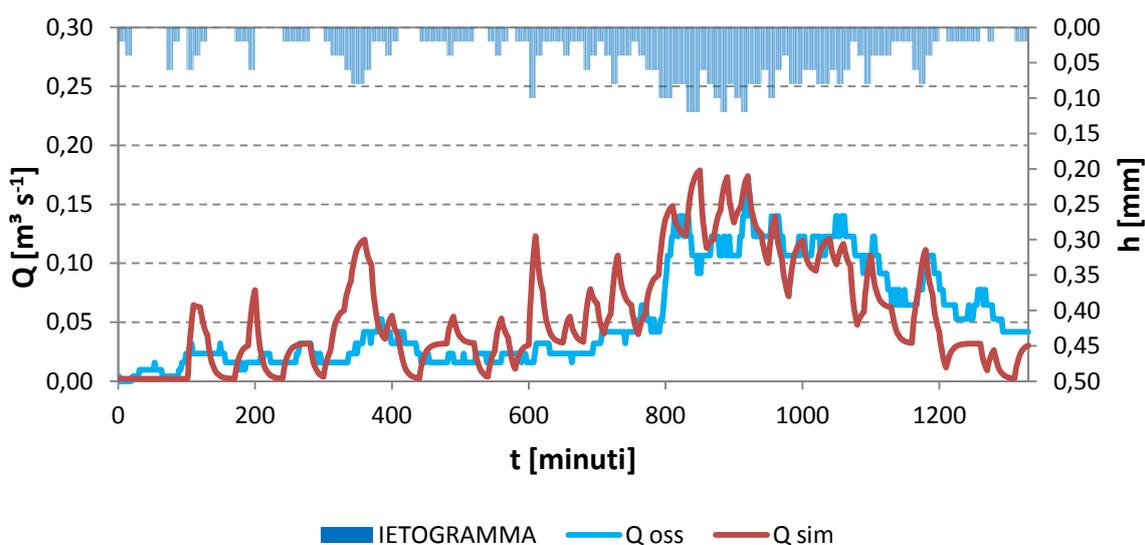


Figura 2.1.31. Simulazione di un secondo evento e il time lag.

L'inizializzazione del modello è stata effettuata settando i parametri descritti sopra come nella seguente tabella.

Tabella 2.1.3. Inizializzazione del modello per lo scolmatore Canzo 2C1

PARAMETRI MODELLO	VALORE
K [min]	vedi par. metodo rigoroso con
	S [ha] = 31
	d [m ha <sup>-1</sup> ] = 195.6
	Y = 0.239
	Im = 0.42
	Sr [%] = 9.72
	Imax [mm h <sup>-1</sup> ] = f (evento)
A IMP [ha]	12.5
IMPFI	0.72
Istore [mm]	1.5

Nelle figure sottostanti (dalla Fig. 2.1.31 alla Fig. 2.1.35) si mostra, per alcuni eventi, il primo *run* effettuato dal modello, senza considerare la portata infiltrata, con l'obiettivo stimare il *time lag*.

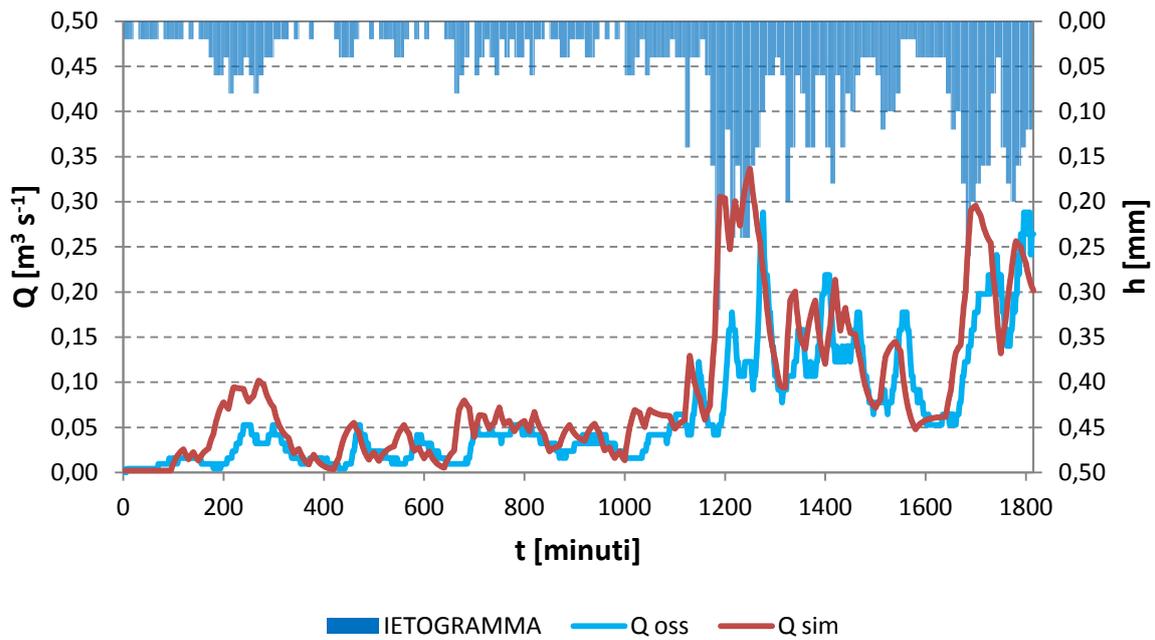


Figura 2.1.31. Simulazione per l'evento 900166 senza time lag.

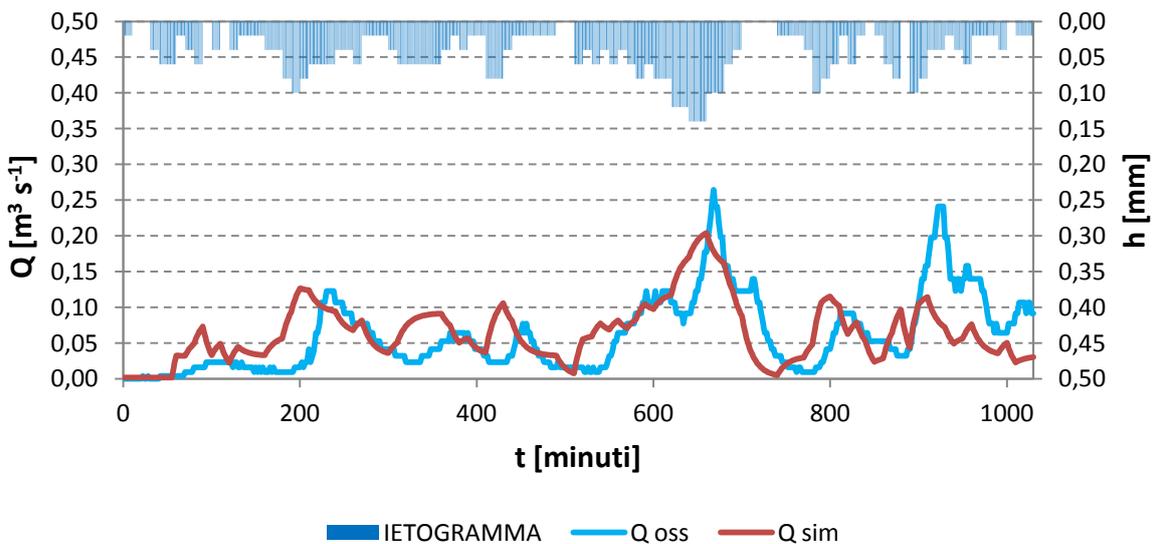


Figura 2.1.32. Simulazione per l'evento 900163 senza time lag.

La simulazione è stata dunque effettuata per i 15 eventi e mettendo in un'unica colonna rispettivamente portata osservata e simulata si sono calcolati gli indici  $R^2$  e  $E_{ns}$  riguardanti l'insieme degli eventi. La cross – calibrazione è un processo che è stato effettuato traslando orizzontalmente, minuto per minuto, la curva simulata sull'osservata in modo da ottenere il migliore adattamento sulla base del massimo valore di  $R^2$  e  $E_{ns}$  considerati in maniera accoppiata. La Tabella 2.1.4 mostra i passi seguiti facendo ricadere la scelta su un *time lag* pari a 13 minuti.

Tabella 2.1.4. Procedura di cross – calibrazione ed identificazione del time lag.

MINUTI	INIZIALIZZAZIONE		CROSSCALIBRAZIONE	
	R <sup>2</sup>	E <sub>ns</sub>	R <sup>2</sup>	E <sub>ns</sub>
0	0.47	0.042		
1			0.47	0.042
2			0.49	0.042
3			0.54	0.042
4			0.57	0.042
5			0.59	0.042
6			0.59	0.042
7			0.62	0.045
8			0.64	0.046
9			0.66	0.047
10			0.68	0.048
11			0.69	0.049
13			0.70	0.051
18			0.65	0.053

Massimizzando R<sup>2</sup> e Ens otteniamo così un time lag di 13 minuti come evidenziato in rosso in Tabella 2.1.4.

Una volta impostato il ritardo temporale si è passati alla calibrazione vera e propria operando delle modifiche ai 4 parametri del modello (K, AIMP, IMPFI, Istore) e confrontando il risultato calcolato sull'insieme degli eventi di precipitazione. In Tabella 2.1.5 si mostra la serie di prove effettuate con le successive modifiche ai parametri, mantenendo volta per volta costanti gli altri.

Tabella 2.1.5. Si mostrano le varie prove di calibrazione effettuate nella prima colonna e, sulle righe, si mostrano le combinazioni dei parametri (il simbolo "=" e le variazioni sono riferite alla riga di inizializzazione): la combinazione migliore di  $R^2$  e  $E_{ns}$  risulta essere il SET 9; in verde si evidenziano i valori dei parametri per il modello calibrato. La differenza così marcata tra l'Ens (nonché di  $R^2$ ) di inizializzazione e quello delle prove successive è dovuta al fatto che, una volta applicato il time lag) si considera in ogni caso il totale degli eventi.

		K	AIMP	IMPFI	Istore		$R^2$	Ens
INIZIALIZZ	no time lag	da GIS, f(evento)	12,5	0,72	1,5		0,47	0,04
SET 1	con time lag	=	=	=	=		0,71	0,51
SET 2		+50%	=	=	=		0,68	0,51
SET 3		-50%	=	=	=		0,69	0,40
SET 4		+25%	=	=	=		0,70	0,51
SET 5		=	=	=	-50%		0,71	0,49
SET 6		=	=	=	+50%		0,71	0,51
SET 7		=	=	-50%	=		0,71	0,47
SET 8		=	=	+50% (=1)	=		0,71	-0,27
SET 9		=	=	-25%	=		0,71	0,63
SET 10		=	=	-15%	=		0,71	0,62
SET 11		=	=	-35%	=		0,71	0,60
SET 12		=	-50%	=	=		0,71	0,28
SET 13		=	+50%	=	=		0,71	0,33
SET 14		=	+25%	=	=		0,71	0,56
SET 15		=	+10%	=	=		0,71	0,62

A titolo di esempio si mostra l'evento 900163 a seguito della calibrazione (Fig.2.1.33).

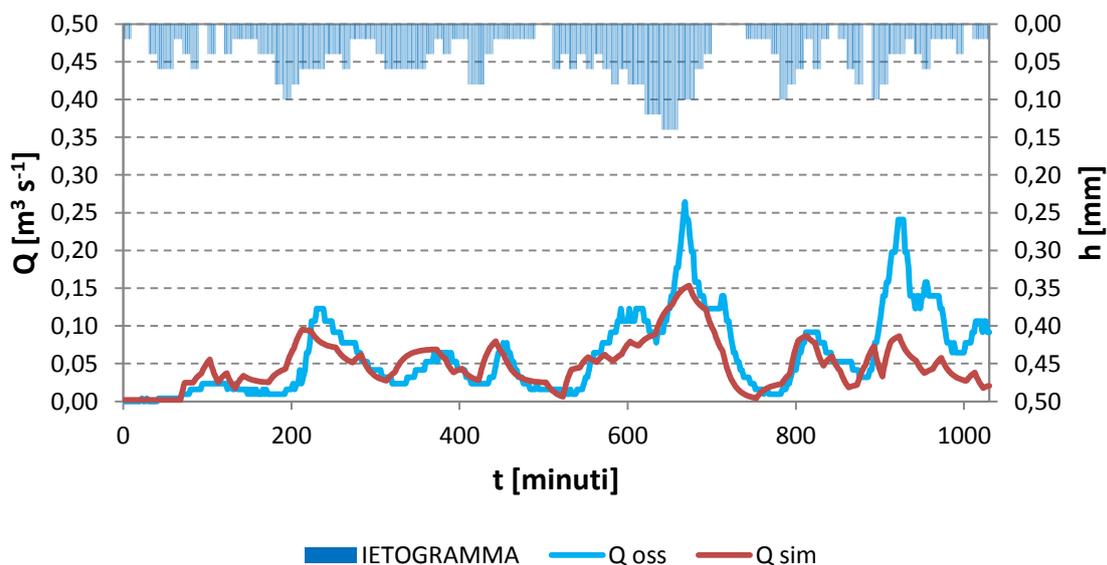


Figura 2.1.33. Simulazione di calibrazione per l'evento 900163.

La procedura di validazione ha fornito dei valori di  $R^2$  e  $E_{ns}$  pari rispettivamente a 0,40 e 0,21. Nelle figure seguenti si mostrano alcuni eventi utilizzati per la validazione, in particolare l'evento 900241 (Fig. 2.1.34), l'evento 900261 (Fig. 2.1.35).

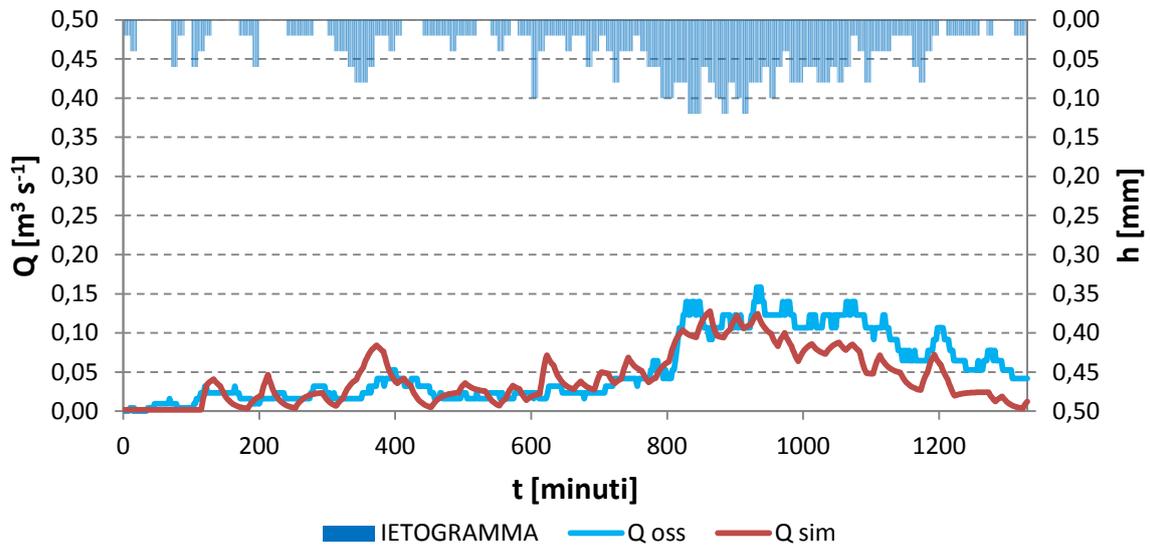


Figura 2.1.34. Simulazione di validazione per l'evento 900241.

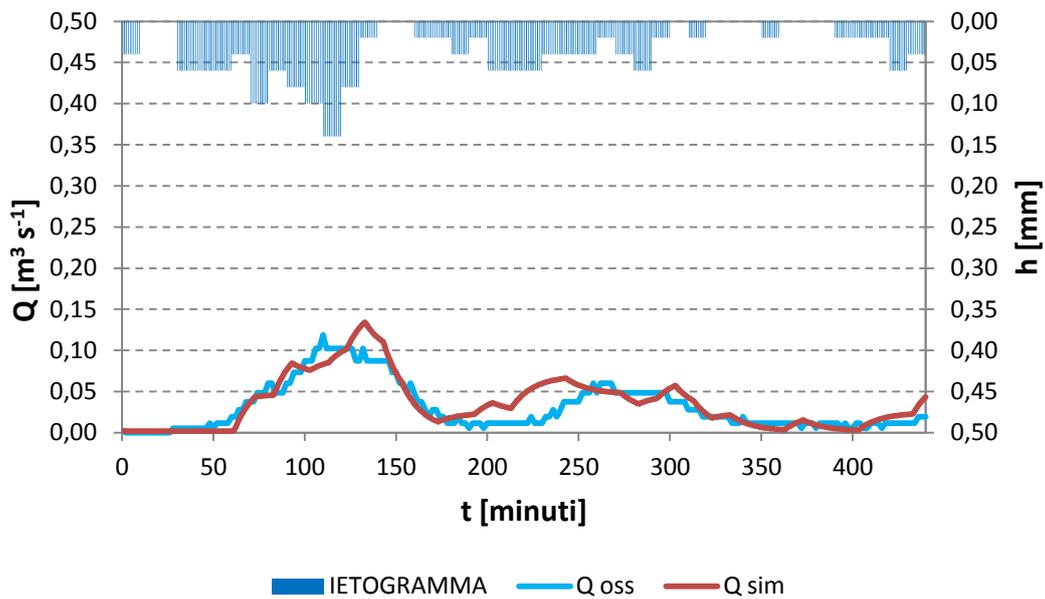


Figura 2.1.35. Simulazione di validazione per l'evento 900261.

Applicazione del modello afflussi/deflussi a tutti i CSO

Il modello calibrato e validato sullo scolmatore CANZO 2C1 è stato poi implementato per gli altri scolmatori censiti sul bacino del Fiume Lambrone. La Tabella 2.1.6 mostra il calcolo dei parametri necessari al modello.

*Tabella 2.1.6. Calcolo dei parametri per gli altri scolmatori di piena nel bacino: su sfondo bianco si mostrano i 62 scolmatori appartenenti al bacino del Lambrone; su sfondo rosso quelli non appartenenti.*

<b>COD PIRoGA</b>	<b>Comune</b>	<b>COD ENTE</b>	<b>IMPFI -25%</b>	<b>Istore [mm]</b>	<b>K</b>	<b>A*IMP</b>
1	Magreglio	01C02	0.53	1.5	21	16.6
2	Magreglio	01C01	-	-	-	-
3	Barni		0.53	1.5	6	1.2
4	Lasnigo	01C03	0.53	1.5	7	0.7
5	Lasnigo	01C02	0.53	1.5	9	0.5
6	Lasnigo	01C01	0.53	1.5	5	2.0
7	Lasnigo	02C01	0.53	1.5	8	0.9
8	Lasnigo	04C01	0.60	1.5	15	1.7
9	Asso	03C01	0.53	1.5	8	0.5
10	Asso	01C01	0.53	1.5	6	0.8
11	Asso	02C01	0.53	1.5	10	0.5
12	Asso	04C01	0.53	1.5	6	1.1
13	Asso	06C01	0.53	1.5	15	5.2
14	Asso	07C01	0.53	1.5	9	2.8
15	Asso	08C01	0.55	1.5	15	10.9
16	Sormano	1	0.53	1.5	24	12.4
18	Sormano	3	0.53	1.5	25	12.4
19	Sormano	01C01	0.53	1.5	24	5.9
20	Sormano	01C02	0.53	1.5	20	3.6
21	Sormano	01C03	0.53	1.5	13	2.3
22	Sormano	01C04	0.53	1.5	5	1.3
25	Caglio		0.53	1.5	15	10.7
26	Caglio		0.53	1.5	14	2.8
27	Rezzago		0.57	1.5	9	0.3
28	Rezzago		0.53	1.5	4	0.8
29	Rezzago		0.53	1.5	11	2.7
30	Rezzago		0.53	1.5	16	1.8
31	Rezzago		0.53	1.5	7	1.1
32	Valbrona	04C01	0.53	1.5	20	11.8
33	Valbrona	04C02	0.53	1.5	24	18.7
34	Valbrona		0.53	1.5	29	21.0
35	Valbrona	02C01	0.53	1.5	12	4.6

36	Valbrona	01C01	0.53	1.5	6	0.9
37	Canzo	02C01	0.54	1.5	15	12.5
38	Canzo	01C01	0.59	1.5	11	2.5
39	Canzo	03C01	0.53	1.5	5	0.2
40	Canzo	03C02	0.53	1.5	12	7.7
41	Canzo	04C01	0.53	1.5	17	0.3
42	Canzo	03C03	0.53	1.5	22	8.9
43	Canzo	03C04	0.53	1.5	16	9.5
44	Canzo	03C05	0.53	1.5	25	9.9
45	Canzo	03C06	0.53	1.5	27	10.9
46	Canzo	03C07	0.53	1.5	27	10.9
47	Canzo	04C02	0.54	1.5	30	16.9
48	Canzo	03C08	0.54	1.5	49	40.2
49	Caslino		0.53	1.5	17	4.1
50	Caslino		0.53	1.5	7	0.1
51	Caslino	01C01	0.53	1.5	18	1.6
52	Caslino	01C02	0.53	1.5	7	0.8
53	Caslino	01C03	0.53	1.5	23	3.9
54	Caslino	02C01	0.53	1.5	19	4.9
55	Castelmarte	1C1	0.53	1.5	7	6.8
56	Proserpio		0.53	1.5	16	13.5
57	Ponte Lambro		0.55	1.5	11	5.9
58	Ponte Lambro		0.54	1.5	19	12.5
59	Ponte Lambro		0.53	1.5	12	9.5
61	Ponte Lambro	Via Cadorna	0.53	1.5	15	6.8
62	Longone al Segrino	21	0.53	1.5	4	0.4
63	Longone al Segrino	36	0.53	1.5	7	2.3
64	Longone al Segrino	86	0.53	1.5	15	9.9
65	Longone al Segrino	92	0.53	1.5	16	10.2
66	Longone al Segrino	112	0.54	1.5	15	5.8
67	Longone al Segrino	159	0.54	1.5	10	3.7
68	Longone al Segrino	228	0.53	1.5	11	2.9

69	Eupilio	02C01	0.53	1.5	3	1.3
70	Eupilio	01C07	0.53	1.5	24	34.0
71	Eupilio	01C06	0.53	1.5	21	22.0
72	Eupilio	01C05	0.53	1.5	18	20.4
73	Eupilio	01C04	0.53	1.5	12	2.7
74	Eupilio	01C03	0.53	1.5	15	12.9
76	Eupilio	1C2	0.53	1.5	6	2.4
77	Erba		0.53	1.5	4	0.5
78	Erba	11C01	0.55	1.5	11	2.2
80	Erba	16C01	0.57	1.5	29	1.7
81	Erba	13C01	0.53	1.5	11	1.6
82	Erba	14	0.53	1.5	36	30.3
83	Erba	23D1	0.54	1.5	31	2.5
84	Erba	7	0.53	1.5	4	0.2
85	Erba	8	0.53	1.5	14	3.7
86	Erba	19C01	0.53	1.5	16	1.6
87	Erba	18C01	0.53	1.5	9	2.2
88	Erba	24C01	0.53	1.5	8	0.8
89	Erba	22C01	0.53	1.5	24	9.8
90	Merone		0.54	1.5	19	8.8
91	Cesana Brianza	2-1	0.53	1.5	9	0.5
92	Cesana Brianza	8-1	0.53	1.5	11	0.3
93	Cesana Brianza	2-2	0.53	1.5	24	7.8
95	Bosisio Parini	1-2	0.53	1.5	13	1.0
96	Bosisio Parini	6-2	0.53	1.5	8	0.1
97	Bosisio Parini	5-2	0.53	1.5	11	0.4
98	Bosisio Parini	4-2	0.53	1.5	10	0.4
99	Bosisio Parini	3-2	0.53	1.5	13	2.2
100	Pusiano		0.54	1.5	7	1.4

Dalla calibrazione si sono calcolati tutti i parametri mediante software ArcGIS® e si è diminuito del 25% il parametro che simula l'area contributiva ai fini del deflusso (IMPF1).

Nel grafico di Figura 2.1.36 si mostra la simulazione effettuata per i due eventi del 15 e 16 febbraio 2011 in concomitanza dei quali è stato effettuato il prelievo di campioni destinati all'analisi di caffeina.

Nel grafico si può distinguere in alto (in colore blu) l'istogramma riguardante gli eventi di pioggia, mentre in basso sono raggruppate le simulazioni delle portate (senza ancora considerare la quota parte aggiuntiva dovuta all'infiltrazione). La linea rossa più marcata rappresenta la portata defluente dallo scolmatore campione CANZO 2C1: come si può facilmente constatare esso rappresenta effettivamente, come era stato ipotizzato nella fase preliminare del monitoraggio, una condizione media in termini di portata del sistema di scolmatori presenti nel bacino. Questa conferma aiuta a giustificare la scelta quasi obbligata, per problemi di costi per attrezzature e personale, di un solo scolmatore rappresentativo da caratterizzare adeguatamente con l'attività di monitoraggio, per poi estendere i risultati agli altri manufatti.

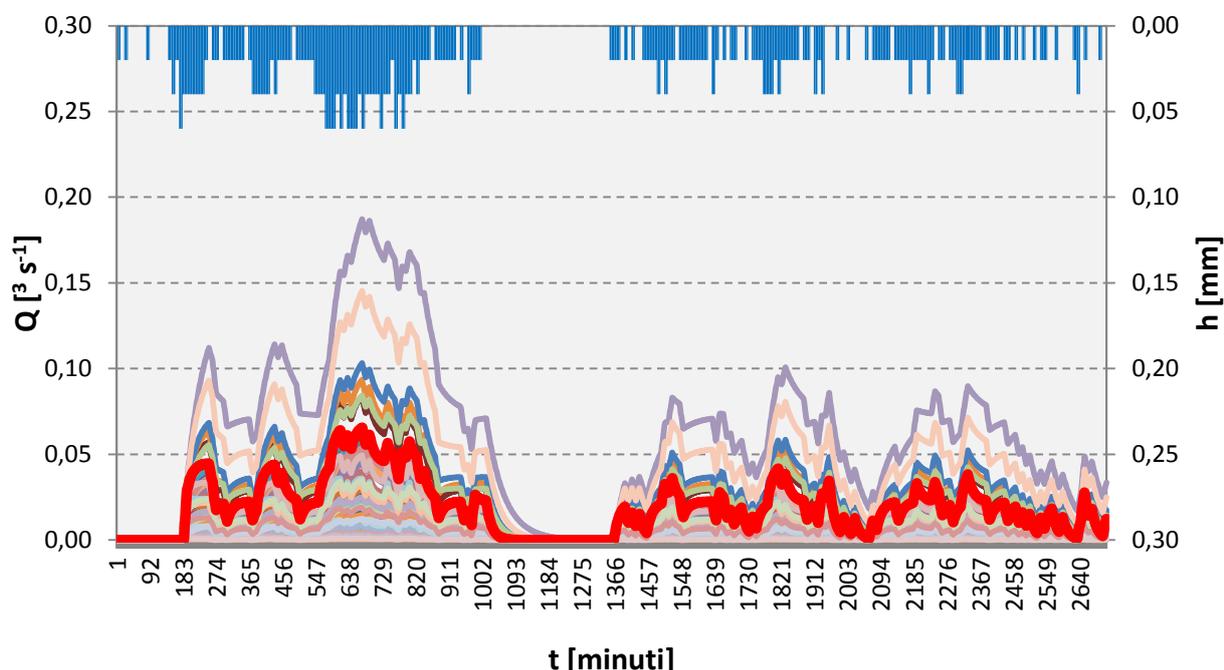


Figura 2.1.36. Portate defluenti dagli scolmatori per gli eventi del 15 e 16 febbraio 2011.

#### 2.1.5.2 Modello multivariato multilivello

Sempre più spesso e in vari ambiti disciplinari (come ad esempio nelle ricerche sociologiche, economiche, demografiche, epidemiologiche, etc.), si analizzano fenomeni con una struttura informativa gerarchica, in cui i dati si presentano a più livelli: individuale, familiare, territoriale, sociale e così via. In particolare, lo studio delle relazioni tra l'individuo e il contesto che lo circonda, può essere ridotto all'analisi di fenomeni a struttura gerarchica. I modelli sviluppati negli ultimi tempi, risultati più idonei al trattamento di dati con struttura di varianza complessa sono denominati *Multilevel Model*.

I *Multilevel Model*, quali metodologie statistiche sicuramente più adatte ad estrapolare al meglio le informazioni presenti all'interno delle strutture gerarchiche, tengono conto, in maniera esaustiva, sia

della presenza di relazioni tra le variabili appartenenti ad ogni livello, sia delle relazioni tra i livelli differenti, considerando in tal modo l'effetto netto sulle unità e le interazioni in esse presenti.

In letteratura sono stati proposti diversi modelli di regressione *multilevel*: *random coefficient model*, *variance component model* e *hierarchical linear model*. Questi modelli, essendo basati su un approccio comune, formano la classe dei *multilevel regression models*. Essi partono dall'assunto che ci sia un dataset strutturato in maniera gerarchica, una sola variabile esplicativa misurata al livello più basso e più variabili esplicative ad ogni livello presente nella struttura. Concettualmente si è soliti immaginare i modelli di regressione *multilevel*, come sistemi gerarchici di equazioni di regressioni. Nel prosieguo di questa trattazione si considerano solitamente due livelli, senza trascurare le possibili generalizzazioni.

La prima grande differenziazione delle tecniche *multilevel* riguarda il caso in cui si considerano i modelli ad intercetta variabile (*random intercept model*), oppure i modelli a coefficienti casuali (*random slopes*). Per entrambi si useranno le nozioni di seguito indicate.

Data una popolazione in gruppi, si definisce con la numerosità del gruppo. Sia  $Y$  la variabile di risposta misurata al livello più basso della gerarchia (rilevata, quindi, per ciascun livello), sia  $X$  una variabile esplicativa misurata sul livello degli individui e sia  $Z$  una variabile esplicativa misurata sul livello dei gruppi.

Il livello degli individui costituisce il primo livello, quello dei gruppi il secondo livello. Sarà utilizzato l'indice per i gruppi ( ) e l'indice per gli individui ( ), i pedici e indicano rispettivamente che la  $Y$  assume valori rispetto ai diversi individui (pedice ) presenti nei diversi gruppi (pedice ). La realizzazione della  $Y$  per un dato individuo ad un dato gruppo sarà indicato con .

Questo modello rappresenta un caso semplice del cosiddetto modello gerarchico lineare, conosciuto anche col nome di *Random Intercept Model* (Snijders & Bosker, 1999). Come nel classico modello di regressione lineare, si è in presenza di una variabile dipendente  $Y$  e di un set di predittori  $X$ , entrambi misurati al livello degli individui. In particolare, la formalizzazione del modello avviene nel seguente modo:

$Y_{ij}$  rappresenta la variabile di risposta con relativo agli individui e relativo alle unità di secondo livello. L'obiettivo del multilevel è quello di stimare il valore atteso di  $Y_{ij}$ , considerando l'effetto del predittore  $X$  sia a livello individuale sia a livello di gruppo. Si ipotizza infatti che la variabile indipendente sia caratterizzata da livelli medi differenti, quindi diversi in ogni gruppo. Tale modello considera l'effetto "gruppo" del predittore attraverso le variazioni dell'intercetta. In altre parole, si stima un modello in cui il coefficiente di regressione è costante nei gruppi e ciò che distingue gli stessi rispetto al predittore è la diversa intercetta. Gli sono invece gli errori al livello degli individui.

L'intercetta variabile a livello di gruppo può essere scomposta in due parti:

dove  $\beta_{0j}$  rappresenta l'intercetta media tra tutti i gruppi, mentre  $\epsilon_{ij}$  rappresenta la parte aleatoria. In altre parole l'intercetta è la somma della media generale e dell'effetto casuale a livello di gruppo, ovvero la misura della sua deviazione intorno alla media.

Sostituendo l'equazione 46 nella 45 si può ottenere il modello completo:

Nel modello così ottenuto, gli  $\beta_{0j}$  possono essere considerati sia come parametri fissi, che come variabili casuali indipendenti ed identicamente distribuite. Il primo caso ha senso quando i gruppi hanno un'interpretazione distinta, riconducendosi all'analisi della covarianza in cui la variabile di raggruppamento è un fattore; nel secondo caso gli  $\beta_{0j}$  sono gli effetti di gruppo non spiegati dalla regressione multilivello. Tale interpretazione porta alla definizione del *Random Intercept Model* in cui l'intercetta varia tra i gruppi in maniera casuale (Fig.2.1.37), poiché i gruppi sono considerati un campione estratto casualmente da una popolazione.

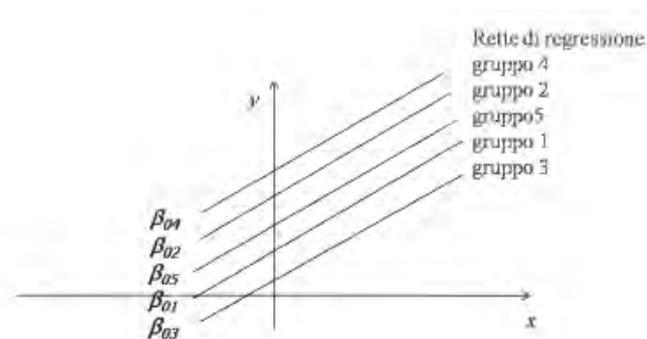


Figura 2.1.37. *Random Intercept Model*.

Per comprendere come si giunge a questo modello, bisogna in realtà partire dal considerare in modello ANOVA ad effetti casuali, in cui le variabili esplicative ( $X$  e  $Z$ ) ai diversi livelli non compaiono (questo modello contiene solo i gruppi casuali e le sue variazioni casuali interne). Questo modello è definito *Empty Model*.

Esso può essere espresso come un modello in cui la variabile dipendente è uguale alla somma della media generale  $\mu$ , dell'effetto casuale a livello di gruppo  $\beta_{0j}$  e dell'effetto casuale a livello individuale  $\epsilon_{ij}$ .

I gruppi con un elevato  $\beta_{0j}$  avranno in media un  $Y$  elevato, mentre i gruppi con un basso  $\beta_{0j}$  avranno in media un  $Y$  basso.

Si può assumere che le variabili casuali  $\epsilon_{ij}$  e  $\epsilon_{i'j}$  abbiano media 0, siano mutuamente indipendenti. Tale modello permette, in questo modo, la partizione base della variabilità dei dati tra i due livelli. Nel modello 47 infatti la varianza totale di  $Y$  può essere scomposta come la somma delle varianze a livello 1 e a livello 2 nel seguente modo:

La covarianza tra due individui ( $i$  e  $i'$  con  $i \neq i'$ ) appartenenti allo stesso gruppo  $j$  è uguale alla varianza condivisa dagli stessi:

e la loro correlazione è:

---

Il parametro  $\rho_j$  è un coefficiente di correlazione interclasse, e indica la correlazione tra due individui dello stesso gruppo o anche la quota di variabilità totale a livello di gruppo. Si può affermare, nell'ipotesi in cui il coefficiente di correlazione è significativamente alto, che ha senso effettuare un'analisi multilevel in quanto buona parte della variabilità è attribuibile ai gruppi, e quindi, il macro livello influenza il micro.

A questo punto il successivo step è l'inclusione nel modello delle variabili esplicative. Come nel classico modello di regressione lineare esse sono usate per spiegare parte della variabilità della  $Y$ ; nel caso specifico si riferisce alla variabilità sia del primo che del secondo livello. Se si considera una sola variabile indipendente  $X$  si ritrova nuovamente il modello 47:

Le assunzioni fondamentali sono che tutti gli errori  $\epsilon_{ij}$  siano mutuamente indipendenti e abbiano medie pari a 0, date dal valore  $X_{ij}$  della variabile esplicativa. Per  $\epsilon_{ij}$  si assume che siano estratti da popolazioni distribuite normalmente e le loro varianze siano ancora  $\sigma^2_{\epsilon_{ij}}$  e  $\sigma^2_{\epsilon_{i'j}}$ . Le variabili casuali  $\epsilon_{ij}$  possono essere viste come errori a livello di gruppo, cioè come effetti di gruppo non spiegati da  $X$ . Dal momento che gli errori casuali contengono quella parte di variabilità della variabile dipendente che non è considerata come funzione di variabili esplicative, si può affermare che questo modello contiene variabilità non spiegata a due livelli annidati. La partizione della variabilità non spiegata sui vari livelli è l'essenza dei modelli gerarchici ad effetti casuali.

All'interno del modello  $\beta_j$  è sempre l'intercetta media dei gruppi e  $\sigma^2$  può essere visto come un coefficiente di regressione non standardizzato come nel suo modo usuale (infatti in tale equazione  $\beta_j = \beta + \alpha_j$ ); cioè l'aumento unitario nei valori di X è associato con l'aumento medio in Y di  $\beta_j$  unità. La varianza residua condizionata al valore di X è:

Mentre la covarianza tra due differenti individui ( $i$  e  $i'$  con  $i \neq i'$ ) nello stesso gruppo è:

La frazione di variabilità residua ascrivibile al livello 1 è data da  $\frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma_j^2}$  e per il livello 2 questa frazione è:  $\frac{\sigma_j^2}{\sigma^2 + \sigma_j^2}$ .

Dalla covarianza o correlazione tra due individui dello stesso gruppo, una parte può essere spiegata dai rispettivi valori di x, mentre l'altra parte non è spiegata. Questa è il coefficiente di correlazione interclasse residuo:

$$\frac{\sigma_j^2}{\sigma^2 + \sigma_j^2}$$

Questo parametro è analogo all'usuale coefficiente di correlazione interclasse, ma ora i parametri  $\beta_j$  e  $\sigma_j^2$  sono riferiti alle varianze del modello 1.4, che include gli effetti della variabile x, mentre prima erano riferiti alle varianze nell'*Empty Model*.

Quando il coefficiente di correlazione interclasse è 0, ad esempio,  $\beta_j = \beta$  è uguale a 0 per tutti i gruppi J, allora il raggruppamento è irrilevante per la variabile Y che condiziona X, e si può usare il normale modello di regressione lineare. Se il coefficiente di correlazione interclasse residuo, o equivalente a  $\frac{\sigma_j^2}{\sigma^2 + \sigma_j^2}$  è significativo, allora il modello lineare gerarchico è un metodo di analisi migliore di quella di regressione *Ordinary Least Squares* (OLS).

In conclusione nel Random Intercept Model, i parametri da stimare sono quattro:

- I coefficienti di regressione  $\beta$  e  $\alpha_j$ ;
- Le componenti della varianza  $\sigma^2$  e  $\sigma_j^2$ .

Ovviamente è possibile generalizzare il modello *Random Intercept Model* a più livelli.

Nel nostro caso l'attivazione degli scolmatori è in funzione in primo luogo delle caratteristiche del singolo manufatto e in secondo luogo delle caratteristiche di ciascun evento di precipitazione. L'approccio utilizzato si è basato sullo sviluppo di 2 modelli separati (ma raggruppati in 2 diversi gruppi) in grado distintamente di predire l'attivazione dello scolmatore.

**Il primo modello (B1)** considera l'attivazione dello scolmatore in funzione dei predittori relativi alle caratteristiche dell'evento (*effetto fisso*), mentre la differenziazione tra i diversi scolmatori monitorati

con livello stato (13) viene considerata come effetto *random*. I dati sono stati pertanto gerarchizzati considerando come **gruppo il codice dello scolmatore**.

Lo studio di questo modello è iniziato considerando tutti i predittori, ossia dal modello più complesso e successive semplificazioni questa volta utilizzando l'ANOVA per discriminare modelli che divergevano per grado di significatività.

Il modello B1 di partenza è stato il seguente:

$$\text{OVERFLOW} = f(\text{ALTEZZA} * \text{INTENSITÁ} * \text{DURATA} * \text{TEMP}) + (1 | \text{CODICE})$$

Effetti fissi

Effetto random

Per CODICE si intende l'insieme delle osservazioni di ciascuno scolmatore raggruppate secondo il suo codice identificativo ("| " vuol dire gruppo di appartenenza; "\*" vuol dire interazione tra i parametri).

In generale un modello di questo tipo prevede per gli effetti fissi un'INTERCETTA e i COEFFICIENTI ANGOLARI dei predittori, mentre solo l'INTERCETTA per ciascun gruppo di osservazioni che fanno capo a uno scolmatore.

La struttura di questo modello consente pertanto di studiare quali sono i parametri relativi all'evento di precipitazione che influenzano l'attivazione degli scolmatori senza considerare le caratteristiche del singolo manufatto.

Attraverso l'analisi tra tutte le possibili combinazioni di predittori il modello più semplice che permetteva di non perdere di significatività è risultato il seguente:

$$\text{OVERFLOW} = f(\text{ALTEZZA} * \text{INTENSITÁ}) + (1 | \text{CODICE})$$

Ossia il modello che meglio rappresenta gli eventi di scolmo considera esclusivamente l'ALTEZZA di pioggia e l'INTENSITÁ dell'evento e la loro interazione.

```

Generalized linear mixed model fit by the Laplace approximation
Formula: OVERFLOW ~ ALTEZZA * INTENSITA + (1 | CODICE)
Data: dati
AIC   BIC logLik deviance
457.9 478.4 -224.0   447.9
Random effects:
Groups Name      Variance Std.Dev.
CODICE (Intercept) 2.25     1.5
Number of obs: 445, groups: CODICE, 13

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)  -1.973220   0.496580  -3.974 7.08e-05 ***
ALTEZZA      0.070663   0.011493   6.148 7.84e-10 ***
INTENSITA    0.271666   0.056793   4.783 1.72e-06 ***
ALTEZZA:INTENSITA -0.004434   0.001111  -3.991 6.58e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

La schermata di R evidenzia che questi tre parametri sono altamente significativi. Notiamo inoltre che ALTEZZA ed INTENSITA sono direttamente proporzionali alla probabilità di attivazione dello scolmatore, mentre la loro interazione risulta inversamente proporzionale.

Nella Figura 2.1.38 si è provveduto invece ad analizzare la **distribuzione dei residui** del modello in modo da valutare se il modello sviluppato segue una distribuzione normale. Notiamo che la loro distribuzione risulta simmetrica e quindi il nostro modello rispetta il requisito di normalità delle predizioni.

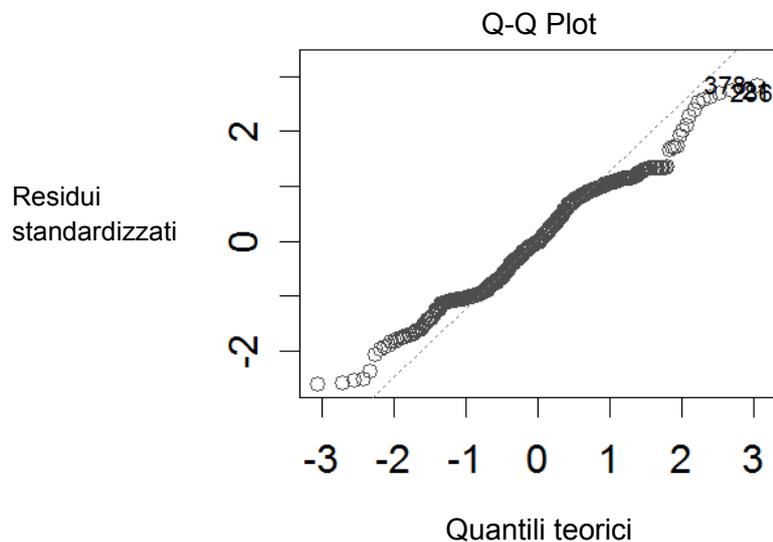


Figura 2.1.38. Quantile-Quantile (Q-Q) distribuzione dei residui del modello B1.

Anche per questo modello, come in precedenza invece di utilizzare lo pseudo- $R^2$  che non consente di effettuare un confronto diretto tra modelli differenti, si è deciso di utilizzare semplicemente il rapporto tra il numero di previsioni corrette del modello rispetto al numero totale di previsioni.

**Su un totale di 445 previsioni, quelle corrette sono risultate 340 (80%) di cui il 76% sono relative allo status 1 e l'83% sono relative allo status 0.**

Una potenzialità da non sottovalutare del modello multilivello B1 è che per mezzo di soli 2 predittori è in grado di simulare il differente comportamento degli scolmatori analizzati nei diversi eventi di pioggia. Questa considerazione consente di affermare che se consideriamo i 13 scolmatori monitorati con livellostato rappresentativi dell'intero bacino, è possibile con questo modello, sulla base delle caratteristiche dell'evento quale è la probabilità che in media gli scolmatori entrano in funzione.

Una volta definita la struttura del modello, ossia quali parametri sono significativi per predire lo stato di attivazione degli scolmatori (OVERFLOW), anche in questo caso si è provveduto a definire l'effetto marginale di ciascun predittore, in modo da definire l'importanza relativa dei predittori. Tali effetti sono stati calcolati solo sugli effetti fissi. Pertanto è stata utilizzato lo stesso pacchetto R utilizzato per il modello semplice. Di seguito la schermata di R effettuata per calcola gli effetti marginali del nostro modello (prima colonna sulla sinistra).

```

This is a Logit Model

Reporting Marginal Effects, Evaluated at the Mean

              mfx          SE          z  Pr(>|z|)
ALTEZZA      0.01246569  1.30292238  5.2126 1.862e-07 ***
INTENSITA    0.04965640  1.02174971  4.0877 4.357e-05 ***
ALTEZZA:INTENSITA -0.00074686 -0.78447636 -3.1385 0.001698 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Observations: 445

Likelihood-Ratio Test:
      Test Statistic DF    P-Value
LR Test      80.707    0 < 2.2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

La Figura 2.1.39 evidenzia la relazione reciproca tra i parametri utilizzati per sviluppare il modello. L'INTENSITÀ anche in questo caso è il parametro determinante (oltre l'80%). Decisamente inferiore è l'importanza dell'ALTEZZA.

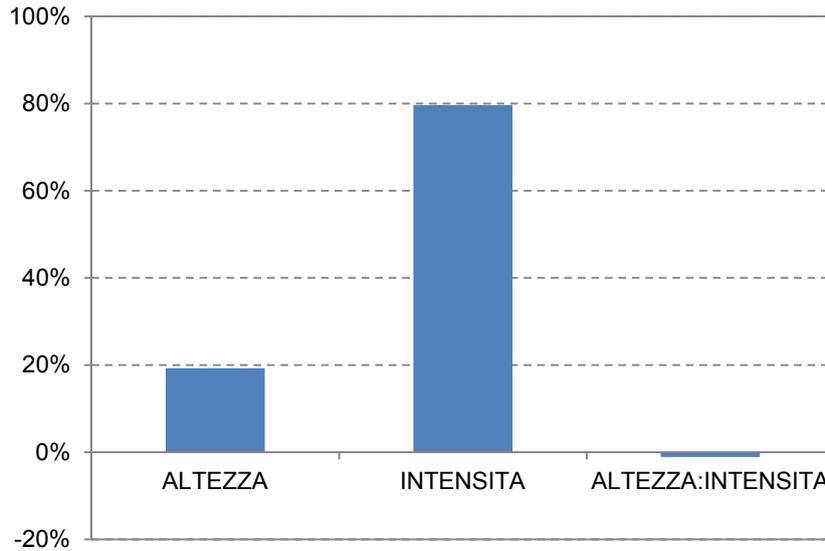


Figura 2.1.39. Relazione reciproca tra tutti i predittori utilizzati per sviluppare il modello. Sull'asse delle ordinate è rappresentato l'effetto marginale (scalare).

Successivamente si è validato il modello attraverso una **cross-validazione**. Ossia sulle 445 osservazioni è stata effettuata una **cross-validazione** con **k=10**. La stima dell'accuratezza del modello è risultata pari a **0,82**. La cross-validazione esprime l'accuratezza che ci si può aspettare con un nuovo data-set di dati e quest'indice può essere considerato come la proporzione di corrette predizioni del modello.

Conclusa la definizione del modello B1, si è passati a sviluppare in modo distinto, ma sugli stessi dati, il **modello B2**. Questo modello considera l'attivazione dello scolmatore in funzione dei predittori relativi alle caratteristiche del manufatto (*effetto fisso*), mentre la differenziazione tra i diversi eventi (86) viene considerata come effetto *random*. I dati sono stati pertanto gerarchizzati considerando come **gruppo** il codice dell'evento.

Lo studio di questo modello è iniziato come per il modello B1 considerando tutti i predittori, ossia dal modello più complesso e successive semplificazioni utilizzando l'ANOVA per discriminare modelli che divergevano per grado di significatività.

Il modello B2 di partenza è stato il seguente:

$$\text{OVERFLOW} = f(\underbrace{\text{AREA} \cdot \text{IMPERMEABILE} \cdot \text{PENDENZA} \cdot \text{DENSITA} \cdot \text{Y1}}_{\text{Effetti fissi}}) + (1| \text{EVENTO})$$

↑  
Effetto random

Per EVENTO si intende l'insieme delle osservazioni di ciascuno evento raggruppate secondo il suo codice identificativo. Il simbolo | vuol dire gruppo di appartenenza. Il simbolo \* vuol dire interazione tra i parametri.

Come nel caso precedente, in generale un modello di questo tipo prevede per gli effetti fissi un'INTERCETTA e i COEFFICIENTI ANGOLARI dei predittori, mentre solo l'INTERCETTA per ciascun gruppo di osservazioni che fanno capo a un evento.

La struttura di questo modello consente pertanto di studiare quali sono i parametri relativi allo scolmatore che influenzano la probabilità d'attivazione degli scolmatori senza considerare le caratteristiche del singolo evento, ma la loro media.

Attraverso l'analisi tra tutte le possibili combinazioni di predittori il modello più semplice che permetteva di non perdere di significatività è risultato il seguente:

$$\text{OVERFLOW} = f(\text{SR} * \text{IMPERMEABILE}) + (1 | \text{EVENTO})$$

Ossia il modello che meglio rappresenta gli eventi di scolmo considera esclusivamente l'la pendenza della rete di drenaggio (SR) e il grado di impermeabilità del bacino sotteso da ciascuno scolmatore.

```

Generalized linear mixed model fit by the Laplace approximation
Formula: OVERFLOW ~ IMPERMEABILE * SR + (1 | EVENTO)
Data: dati
AIC   BIC logLik deviance
546.4 566.9 -268.2   536.4
Random effects:
Groups Name      Variance Std.Dev.
EVENTO (Intercept) 1.8391   1.3561
Number of obs: 445, groups: EVENTO, 85

Fixed effects:
              Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept)    11.6277     3.4425   3.378 0.000731 ***
IMPERMEABILE  -25.2636     7.8141  -3.233 0.001225 **
SR              -2.6834     0.7905  -3.394 0.000688 ***
IMPERMEABILE:SR  6.1973     1.9696   3.146 0.001653 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Correlation of Fixed Effects:
              (Intr) IMPERMEABILE SR
IMPERMEABILE -0.990
SR            -0.579  0.658
IMPERMEABILE: 0.536 -0.621      -0.998

```

La schermata di R riportata sopra evidenzia che questi tre parametri sono altamente significativi. Notiamo inoltre che l'impermeabilità del bacino (IMPERMEABILE) e la sua pendenza sono direttamente proporzionali alla probabilità di attivazione dello scolmatore, mentre la loro interazione risulta inversamente proporzionale.

Nella Figura 2.1.40 si è provveduto invece ad analizzare la **distribuzione dei residui** del modello in modo da valutare se il modello sviluppato segue una distribuzione normale. Notiamo che la loro distribuzione risulta simmetrica e quindi il nostro modello rispetta il requisito di normalità delle previsioni.

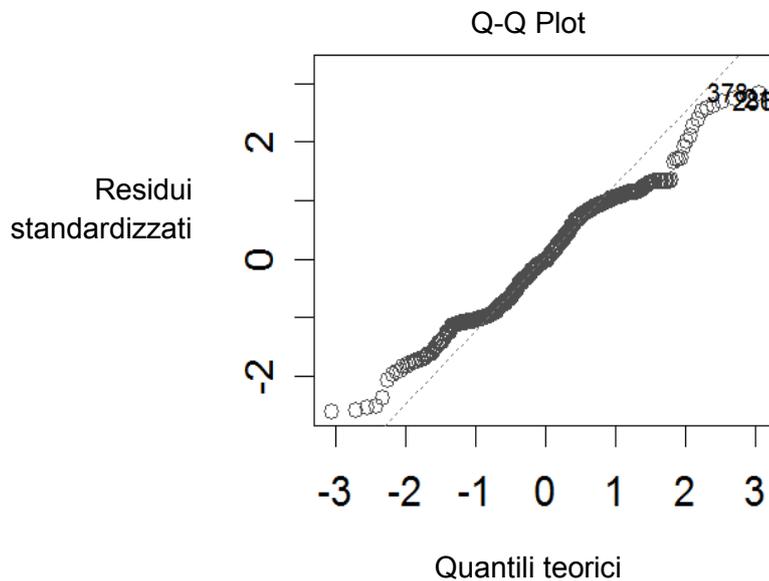


Figura 2.1.40. Quantile-Quantile (Q-Q) distribuzione dei residui del modello B1.

Anche per questo modello, come in precedenza invece di utilizzare lo pseudo- $R^2$  che non consente di effettuare un confronto diretto tra modelli differenti, si è deciso di utilizzare semplicemente il rapporto tra il numero di previsioni corrette del modello rispetto al numero totale di previsioni.

**Su un totale di 445 previsioni, quelle corrette sono risultate 345 (78%) di cui il 70% sono relative allo status 1 e l'84% sono relative allo status 0.**

Una potenzialità da non sottovalutare del modello multilivello B2 è che per mezzo di soli 2 predittori è in grado di simulare il differente comportamento degli scolmatori analizzati nei diversi eventi di pioggia. Questa considerazione consente di affermare che se consideriamo gli 86 eventi di pioggia rappresentativi della casistica meteorologica che si potrebbe verificare in quest'area, è possibile con questo modello, sulla base delle caratteristiche dello scolmatore stabilire in media quale è la sua probabilità di entrare in funzione.

Una volta definita la struttura del modello, ossia quali parametri sono significativi per predire lo stato di attivazione degli scolmatori (OVERFLOW), anche in questo caso si è provveduto a definire l'effetti marginale di ciascun predittore, in modo da definire l'importanza relativa dei predittori (Fig.2.1.1). Tali effetti sono stati calcolati solo sugli effetti fissi. Pertanto è stata utilizzato lo stesso pacchetto R utilizzato per il modello semplice.

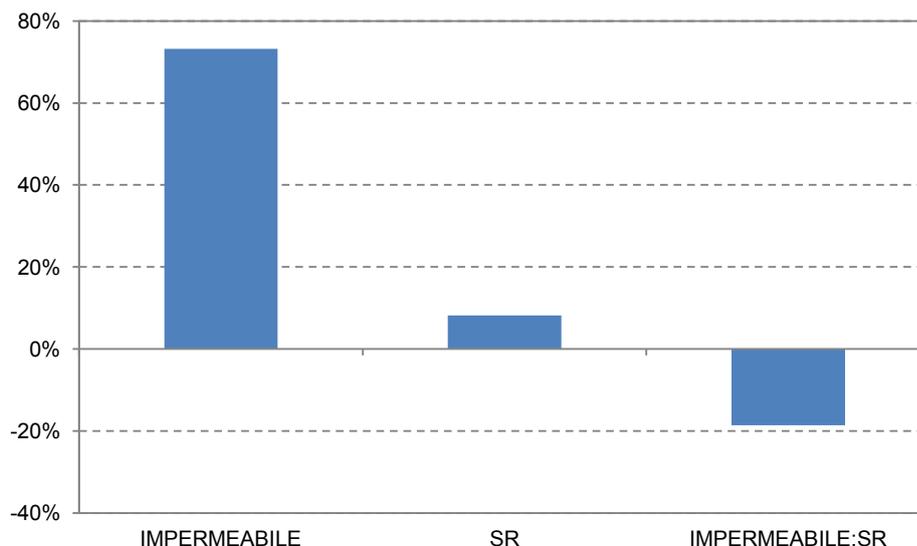


Figura 2.1.41. Relazione reciproca tra tutti i predittori utilizzati per sviluppare il modello. Sull'asse delle ordinate è rappresentato l'effetto marginale (scalare).

La Figura 2.1.41 evidenzia la relazione reciproca tra i parametri utilizzati per sviluppare il modello. L'Impermeabilità (IMPERMEABILE) anche in questo caso è il parametro determinante (oltre il 70%). Decisamente inferiore l'importanza della PENDENZA.

Successivamente si è validato il modello attraverso una **cross-validazione**. Ossia sulle 445 osservazioni è stata effettuata una **cross-validazione** con **k=10**. La stima dell'accuratezza del modello è risultata pari a **0,74**. La cross-validazione esprime l'accuratezza che ci si può aspettare con un nuovo data-set di dati e quest'indice può essere considerato come la proporzione di corrette previsioni del modello.

**Una volta applicati i modelli agli eventi monitorati, si è provveduto ad accoppiare le probabilità di scolmo previste per i tre eventi dal modello B1 e quelle invece relative a ciascuno scolmatore previste dal modello B2.** Pertanto l'effetto fisso predetto dal modello B1 per ciascun evento è stato associato all'effetto fisso che caratterizza ciascun scolmatore come predetto dal modello B2.

Le due probabilità sono state associate considerando il TEOREMA DELLA PROBABILITÀ TOTALE (PER EVENTI COMPATIBILI) secondo il quale la probabilità dell'unione di due eventi E1 ed E2 è uguale alla somma delle probabilità di ciascun evento diminuita della probabilità dell'evento intersezione dei due dati.

$$p(E1 \cup E2) = p(E1) + p(E2) - p(E1 \cap E2)$$

Operando in questo modo le nuove probabilità sono state inizialmente testate sulle 445 osservazioni utilizzate per creare i singoli modelli ottenendo **371 (83%) previsioni corrette, di cui il 79% sono relative allo status 1 e l'88% sono relative allo status 0.** Attualmente non si è provveduto a cross-validare questo modello.

Nella tabella seguente (Tab.2.1.7) vengono invece schematizzati i risultati dell'applicazione del modello **multivariato multilivello complessivo (B1+B2)**. Notiamo che rispetto al modello A il numero superiore di scolmate si registra nel primo evento (39%) pari a una probabilità media dello 0,47.

Tabella 2.1.7. Risultati dell'applicazione del modello di regressione B.

<b>EVENTO</b>	<b>DATA</b>	<b>Numero di scolmatori che si sono attivati</b>	<b>Probabilità media di attivazione</b>
<b>1</b>	15/2/2011	24 (39%)	0,47
<b>2</b>	16/2/2011	13 (21%)	0,43
<b>3</b>	27-28/3/2011	7 (11%)	0,39

Nel concludere l'esposizione dei risultati relativi al modello B1 e B2 con le Figure 2.1.42 e 2.1.43 si mette in evidenza la distribuzione delle probabilità di scolmo (effetti fissi), predette dal modello B1 e B2 sulla base dell'altezza di precipitazione, dell'intensità, dell'impermeabilità e della pendenza del bacino.

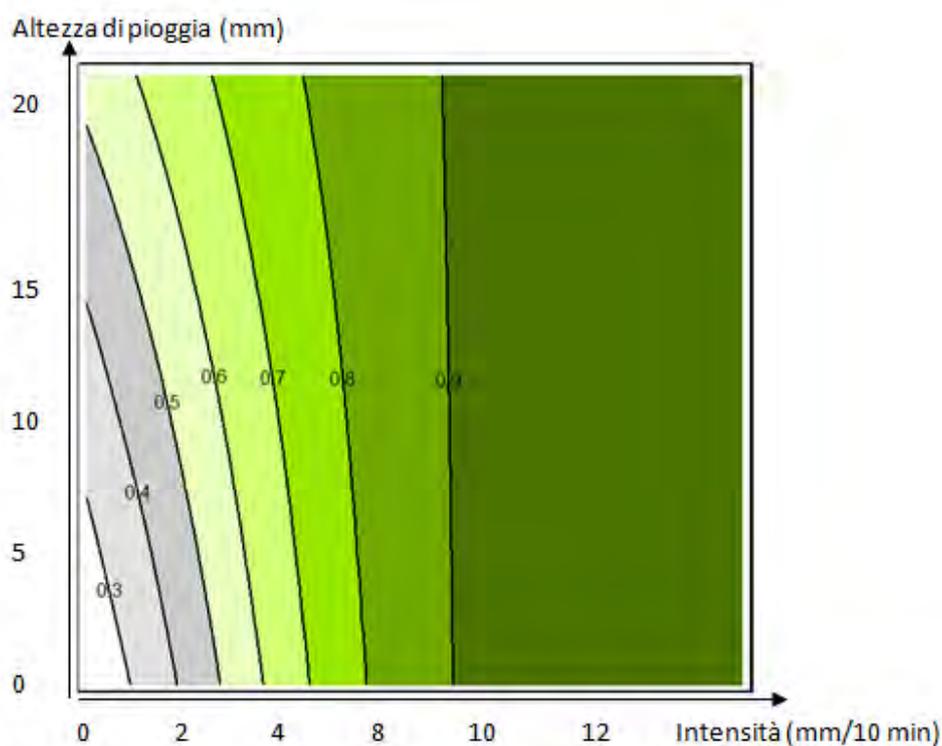


Figura 2.1.42. Distribuzione delle probabilità di scolmo (effetti fissi) predette dal modello B1 sulla base dell'altezza di precipitazione e dell'intensità.

Nella Figura 2.1.42 si può notare che la probabilità di scolmo è fortemente influenzata dall'intensità di pioggia come già messo in evidenza in precedenza (oltre l'80%). Questa immagine è molto utile per comprendere in media quale è la probabilità di scolmo del bacino (dovuta però solo agli effetti fissi). In

particolare, con un'intensità di pioggia di circa 3 mm o con un'altezza di 20 mm si ha una probabilità del 50% che entrino in funzione in media gli scolmatori di piena.

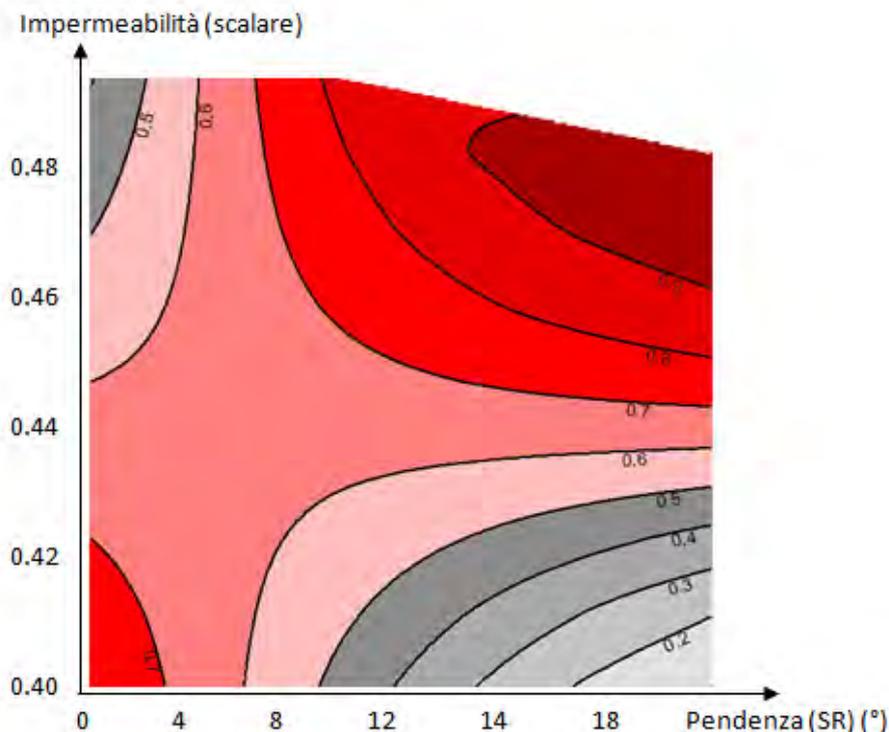


Figura 2.1.43. Distribuzione delle probabilità di scolo (effetti fissi) predette dal modello B2 sulla base dell'impermeabilità e la pendenza del bacino.

Osservando la Figura 2.1.43 è possibile notare che la probabilità di scolo è fortemente influenzata in modo diretto sia dall'impermeabilità, sia dalla pendenza, seppur delle distorsioni si notano in particolare per elevate pendenze e basse permeabilità. Questo effetto è determinato dal fatto che nello sviluppo del modello di regressione B2 è risultata significativa anche l'interazione tra le due variabili.

#### 2.1.5.3 Metodologia per la determinazione della soglia di sfioro

Per ciascun scolmatore fognario ricadente nel bacino idrografico del Fiume Lambrone e quindi, in caso di attivazione, impattante le acque del fiume, sarà necessario definire la soglia, in termini di portata, oltre la quale si attiverà lo scolmatore stesso.

In letteratura si parte dal presupposto che è corretto iniziare a scaricare nei ricettori le portate convogliate dalla reti miste in tempo di pioggia quando, a seguito della miscelazione tra portate nere e portate meteoriche, si è raggiunta nella portata complessiva una sufficiente diluizione degli inquinanti, tale da non arrecare effetti indesiderati sul corpo recettore. Il R.R. n.3/2006 (Disciplina e regime autorizzatorio degli scarichi di acque reflue domestiche e di reti fognarie) ritiene che ciò sia soddisfatto

quando la portata complessiva convogliata dai collettori è dell'ordine di 3 – 5 volte (con coefficienti di diluizione, quindi, pari a 3 – 5) la portata media giornaliera di tempo secco ( ).

(i)

con:

- portata media nera
- dotazione idrica della popolazione, pari a  $280 \text{ l ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$
- : indice di dispersione che considera gli usi diversi da quelli domestici, pari a 0,15
- A.E. : abitanti equivalenti

Come parametro progettuale nella fase di progettazione dello scolmatore di piena, il suddetto articolo suggerisce la determinazione della portata di soglia valutando la massima portata tra quella generata dall'apporto di una dotazione idrica di 750 litri per abitante equivalente al giorno (1000 litri per AE per giorno se scaricano in lago) e quella determinata considerando un rapporto di diluizione pari a 2 rispetto alla portata media nera.

Le considerazioni appena sviluppate sono state sviluppate ipotizzando reflui non caratterizzati dalla presenza di acque parassite (infiltrazioni di acque di falda, immissioni di acque superficiali).

Nel caso in cui queste siano presenti, alle portate nere effettivamente dovute ai reflui civili o industriali scaricati si sommano le portate dovute dalle acque parassite, determinando delle portate complessive in tempo secco superiori a quelle correlabili delle dotazioni idriche unitarie civili ed industriali ed in cui si ha diluizione più o meno consistente degli inquinanti presenti.

Applicando a tali portate i criteri sopra descritti per la valutazione della portata di soglia risulteranno delle portate di soglia evidentemente notevolmente maggiori rispetto a quelle determinate senza considerare le portate parassite.

Per ciascun scolmatore andremo quindi a stimare la portata media nera attraverso l'applicazione della formula (i). Successivamente attraverso la stima della portata osservata nello scolmatore di CANZO 2C1 e descritta nel paragrafo 2.1.5 saremo quindi in grado di stimare per differenza la portata parassita infiltrata nel bacino idrografico afferente a tale scolmatore. Ipotizzando che tale portata parassita sia dipendente dalle dimensioni del bacino e quindi dagli abitanti equivalenti abbiamo determinato tale dipendenza per lo scolmatore CANZO 2C1 dove ne avevamo una stima sperimentale e abbiamo applicato tale dipendenza agli altri scolmatori fognari del bacino per stimare la portata parassita in tutti gli scolmatori fognari.

A questo punto è stata stimata la portata di soglia per gli scolmatori monitorati con livellostato. Tale stima è stata effettuata valutando per ciascuno scolmatore alcuni eventi in cui si è attivato e non si è attivato il livellostato (rispettivamente segnale 1 e segnale 0). Mediante il modello afflussi/deflussi descritto nel paragrafo 2.1.5 si è stimata per ciascun evento la portata transitante nello scolmatore fognario al minuto. La stima della soglia è stata quindi effettuata confrontando e mediando il massimo

delle portate massime in cui non si aveva attivazione dello scolmatore (segnale 0) con il minimo delle portate massime in cui si aveva attivazione (segnale 1) e assumendo che si trovasse nell'intorno di questi due valori. Una volta identificate le portate di soglia per gli scolmatori monitorati abbiamo stimato il rapporto di diluizione dividendo tale portata per la portata media nera più la portata parassita.

Mediando tale rapporto di diluizione per gli scolmatori monitorati e applicando tale valore medio agli altri scolmatori fognari abbiamo determinato la  $Q_{mn}$  degli scolmatori non monitorati.

Tale rapporto di diluizione è stato, inoltre, il parametro utilizzato per calibrare la portata scolmata durante i due eventi di riferimento (febbraio e marzo 2011) per la stima della portata scolmata attraverso il metodo della caffeina, avendo l'accortezza di utilizzare valori di ricadenti nei limiti suggeriti dalla normativa e nei limiti definiti dalla casistica dell'analisi sperimentale.

Per la stima della portata nera media giornaliera in ogni scolmatore del bacino, i cui valori sono mostrati in Figura 2.1.44, è stata utilizzata una dotazione idrica pari a  $280 \text{ l ab}^{-1} \text{ d}^{-1}$  come dichiarato essere il valore medio nella provincia di Como (fonte ISTAT 2004) e gli abitanti equivalenti precedentemente stimati per ciascuno scolmatore.

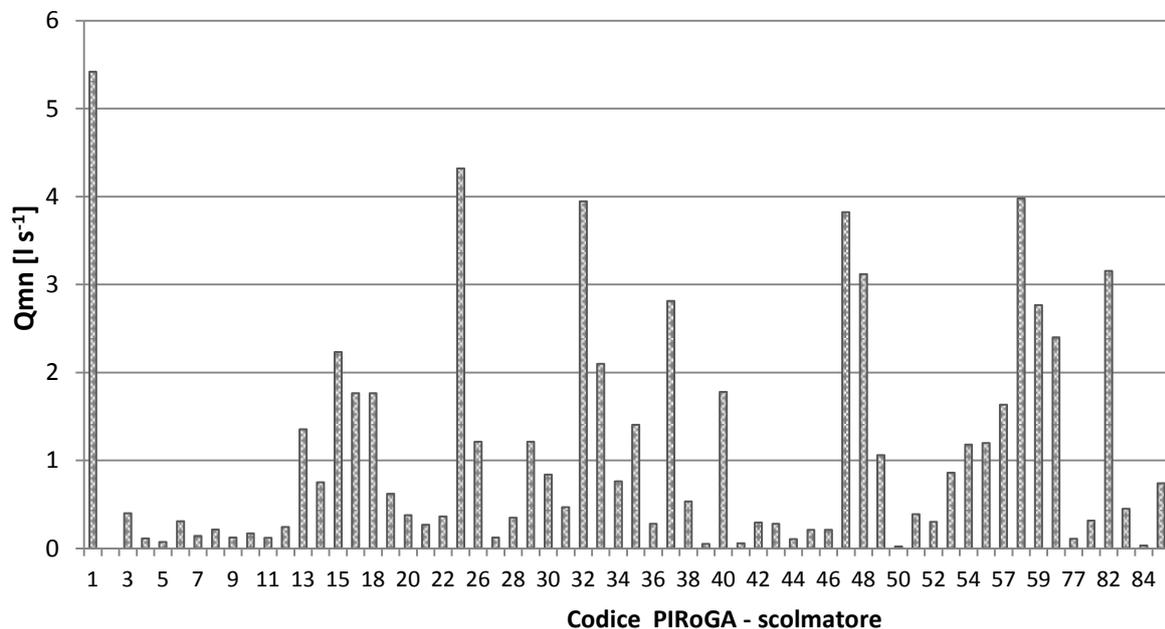


Figura 2.1.44. Portata media giornaliera per ciascun scolmatore ricadente nel bacino idrografico del Fiume Lambro.

Tabella 2.1.8. Stima della portata di soglia e del rapporto di diluizione per gli scolmatori monitorati mediante livello stato.

Codice PIROGA	N° eventi attivazione	N° eventi NON attivazione	Portata di soglia [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Portata media nera [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Portata infiltrata [ $\text{l s}^{-1}$ ]	Rapporto di diluizione stimato
12	2	3	17,2	0,2	3,5	5
13	5	5	74,6	1,4	19,2	4
15	4	3	211	2,2	31,8	6
25	3	1	181,7	4,3	61,4	3
<b>37</b>	3	3	158,8	2,8	<b>40,0</b>	4
38	5	5	53,1	0,5	7,6	7
40	6	3	111	1,8	25,3	4
57	8	2	94,8	1,6	23,2	4
58	9	1	143,6	4,0	56,6	2
<b>Media</b>						<b>4,2</b>
<b><math>\sigma</math></b>						<b>1,4</b>

Utilizzando il valore medio del rapporto di diluizione stimato come valore rappresentativo di tale parametro per gli scolmatori non monitorati abbiamo quindi determinato la portata di soglia per tutti i 62 scolmatori gravanti nel bacino del Lambrone ottenendo valori compresi tra i pochi litri al secondo per gli scolmatori con decine di abitanti equivalenti a centinaia di litri al secondo per scolmatori con migliaia abitanti equivalenti.

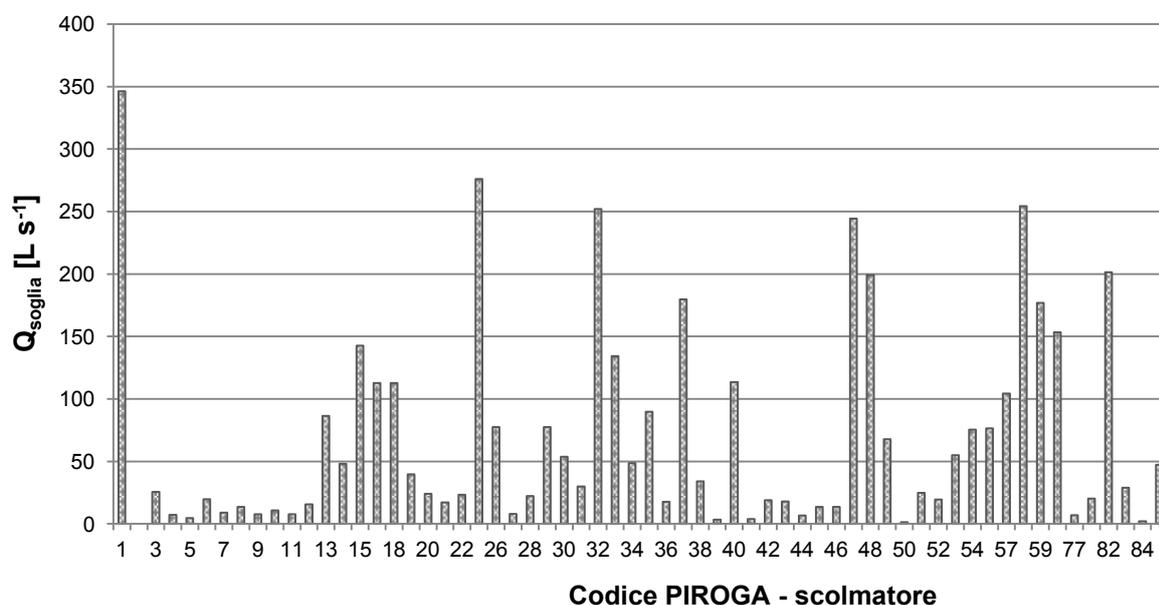


Figura 2.1.45. Portata di soglia stimata per ciascuno scolmatore appartenente al bacino del Lambrone utilizzando un  $r$  medio di 4,2.

#### 2.1.5.4 Il metodo della caffeina per la stima della portata scolmata

Ricordando che all'interno del bacino del Lago di Pusiano non esiste alcun impianto di trattamento, le uniche due probabili fonti di caffeina sono gli scaricatori di piena e gli abitanti i non allacciati alla rete fognaria che scaricano, quindi, direttamente nei corpi idrici superficiali. La valutazione della

concentrazione di caffeina nella sezione di chiusura del bacino idrografico (Fig. 2.1.2) permetterà, quindi, di stimare la portata totale scolmata da tutti gli scolmatori fognari (Buerge et al., 2006) all'interno del bacino validando così la complessa analisi effettuata per la stima della portata fuoriuscita dagli scolmatori fognari attraverso l'accoppiamento del modello afflussi/deflussi dell'invaso lineare e del modello multivariato multilivello descritti in precedenza.

La valutazione della concentrazione di caffeina nelle acque superficiali, attraverso un semplice bilancio di massa (Buerge et al., 2006) ha permesso la stima della portata di acqua reflua presente nel fiume stesso (Fig.2.1.46).

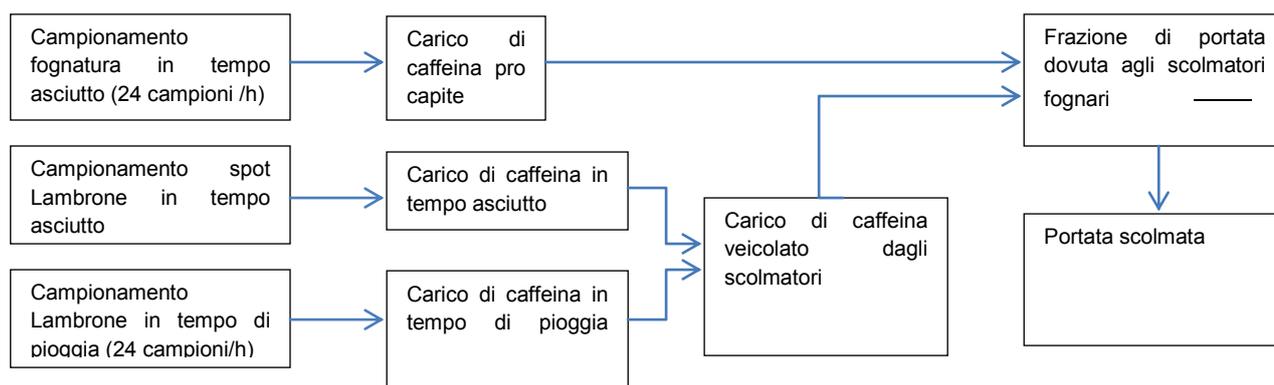


Figura 2.1.46. Schema a blocchi del processo logico utilizzato per la stima della portata scolmata durante un evento precipitativo mediante l'uso della caffeina.

In primo luogo la valutazione della concentrazione di caffeina nelle acque in ingresso all'impianto di trattamento in tempo asciutto hanno permesso la **stima del carico medio giornaliero pro capite di caffeina** ( $\text{mg persona}^{-1} \text{giorno}^{-1}$ ).

dove  $C$  rappresenta la concentrazione di caffeina misurata in tempo asciutto nell'acqua di ingresso al depuratore,  $Q$  rappresenta la portate in ingresso al depuratore in tempo di asciutto e  $N$  è la popolazione allacciata alla rete fognaria dichiarata da ASIL S.p.A. di Merone.

La scelta di utilizzare concentrazioni in tempo asciutto di caffeina per la stima del carico pro-capite è dettata dal fatto che durante eventi precipitativi parte dell'acqua contenuta in fognatura scolma nei corpi idrici recettori così che il carico in ingresso al depuratore non sia più rappresentativo dell'intera popolazione allacciata ma di una quota parte difficilmente stimabile.

Successivamente si è stimato dapprima il **carico totale di caffeina nel fiume Lambrone** ( $\text{g day}^{-1}$ ) in **tempo asciutto** come il prodotto tra la concentrazione di caffeina in tempo asciutto e la portata del fiume, assunto il fatto che durante il tempo asciutto l'unica fonte di caffeina nel fiume siano gli scarichi

civili dei non allacciati; e poi il **carico totale di caffeina nel fiume** Lambrone (g day<sup>-1</sup>) in **tempo di pioggia** come prodotto tra la concentrazione di caffeina e la portata in tempo di pioggia:

dove  $C$  è la concentrazione media giornaliera di caffeina misurata nel fiume,  $Q$  è la portata del fiume media giornaliera, dove  $N$  è la popolazione residente connessa alla rete fognaria e dove  $f$  rappresenta la frazione di portata del fiume fuoriuscita dallo scolmatore fognario.

La popolazione residente connessa alla rete fognaria gestita da ASIL S.p.A. (Provincia di Como) e gravante sul bacino del Fiume Lambrone è stata stimata considerando il numero di persone residenti nel bacino per ciascun comune, incrementata dell'1,5% per i comuni non turistici, e, per i comuni turistici (quali ad esempio Asso, Barni, Canzo, Lasnigo) del 75% della media giornaliera di persone nella settimana di maggior afflusso turistico per considerare la popolazione fluttuante. Per considerare gli utenti non allacciati, la popolazione così calcolata è poi stata ridotta in accordo con le percentuali di allacciati forniteci da ASIL S.p.A. Inoltre, un'ulteriore riduzione del numero di persone gravanti sul bacino del Lambrone è stata applicata considerando che una quota della portata del Lambrone (circa il 19%) va a generare la Roggia Molinara, all'altezza della diramazione nel comune di Ponte Lambro. Tale quota è stata stimata dal rapporto tra le portate medie annuali del Lambrone e della roggia.

Poiché in tempo di pioggia il carico di caffeina nel fiume è veicolato sia dagli scolmatori di piena ( $C_p$ ) che dagli utenti non allacciati alla rete ( $C_n$ ), il carico veicolato dagli scolmatori verrà calcolato semplicemente per differenza tra il carico nel fiume e il carico veicolato dalle acque reflue dei non allacciati.

A questo punto, conoscendo la popolazione allacciata alla rete e gravante sulla sezione di chiusura del bacino di riferimento, indicata con  $N_a$ , il carico  $C$  appena determinato e il carico pro capite  $c$ , sarà facilmente stimabile la frazione di portata scaricata dagli scolmatori fognari  $f$ , così come la portata stessa  $Q$ .

#### *Campionamento e trattamento dei campioni per l'analisi del contenuto della caffeina*

Dal punto di vista sperimentale, si sono prelevati campioni orari da 1 litro sia di acqua fognaria all'ingresso dell'impianto di trattamento di Merone gestito da ASIL S.p.A. sia di acqua superficiale dal Fiume Lambrone in differenti condizioni pluviometriche e idrologiche (come specificato più avanti). I campioni sono stati conservati a 4 °C e, entro poche ore dalla raccolta, filtrati con filtri da 0,47 µm e conservati in provette di polietilene a -20°C per poi essere successivamente analizzati.

Dal punto di vista analitico i campioni di fiume sono stati analizzati senza la necessità di diluizioni mentre i campioni di acqua fognaria, particolarmente ricca di caffeina, ha richiesto una diluizione 1:10 per rimanere entro il *range* di concentrazione di caffeina rilevabile dallo strumento. La caffeina è stata analizzata mediante una strumentazione TSQ (*Triple Stage Quadrupole Quantum Access Max* prodotto dalla Thermo Scientific che sfrutta la metodologia LC-MS (*Liquid Chromatography –Mass Spectrometry*), basata sull'utilizzo della cromatografia liquida per la separazione dei composti presenti nel campione accoppiata alla spettrometria di massa per rilevarne la quantità. Tale metodo si basa sulla stima della concentrazione on-line dell'analita, mediante un autocampionatore Thermo EQuan, e la successiva separazione e determinazione in cromatografia liquida accoppiata alla spettrometria di massa a triplo quadrupolo (LC-MS-MS), mediante una strumentazione Thermo TSQ Quantum. 1 mL di campione acquoso filtrato viene fatto passare attraverso una cartuccia di preconcentrazione (Thermo Scientific Gold aQ, 20x2,1 mm, 12 µm) dove l'analita viene concentrato e separato dalla matrice acquosa. L'analita adsorbito nella colonna di preconcentrazione è poi spostato dalla fase mobile nella colonna di separazione HPLC (Thermo Scientific Betasil C18, 100x2,1, 3 µm). La fase mobile è composta da un gradiente tra una soluzione acquosa allo 0,1 % di acido formico e un solvente organico (acetonitrile) ad un flusso di 300 µl/min. L'effluente della colonna di separazione è ionizzato in positivo con una sorgente ad elettrospray (ESI) impostata a +3,5 kV, ed introdotto nel sistema LC-MS a triplo quadrupolo. Le transizioni di massa analizzate sono le seguenti: 195/110, 195/138. La calibrazione lineare è stata costruita in un intervallo tra 50-5000 ng L<sup>-1</sup>.

#### *Dati disponibili*

Allo scopo applicare il metodo della caffeina nella stima della portata scolmata dagli scaricatori di piena si sono effettuati i seguenti campionamenti:

- campionamento mediante campionatore automatico del refluo fognario all'ingresso dell'impianto di depurazione di Merone in tempo asciutto (1 campione all'ora – 24 campioni al giorno);
- campionamenti spot di acqua del Fiume Lambrone nell'arco di differenti giornate in condizioni di tempo asciutto (1 campione al giorno);
- campionamenti di acqua del Lambrone mediante campionatore automatico in concomitanza di eventi piovosi (1 campione all'ora – 24 campioni al giorno).

Per ciascun campione è stata inoltre stimata una portata corrispondente. Per quelli raccolti in fognatura la portata è stata fornita da ASIL S.p.A., laddove per quanto riguarda i campioni del Lambrone la portata è stata stimata attraverso la misura in continuo del livello, mediante sensore di livello della sonda multiparametrica in-situ, e la conoscenza della curva di deflusso.

Tali campioni sono stati quindi analizzati con la metodologia LC-MS descritta in precedenza per stimarne il contenuto di caffeina.

La seguente tabella riassume i dati disponibili utilizzati per l'applicazione del modello basato sul contenuto di caffeina.

Tabella 2.1.9. Dati disponibili per l'applicazione del metodo della caffeina.

Tipologia	Data	Ora	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Caffeina [µg L <sup>-1</sup> ]
Campionamento fognatura in tempo asciutto	14-15/09/2011	Dalle 8 del 14/09 alle 7 del 15/09	0,44 ± 0,05	23,27 ± 8,1
Campionamento spot Lambrone in tempo asciutto	02/09/2011	10:15	0,51	0,67
	02/12/2011	9:15	1,44	0,09
	15/12/2011	12:20	1,25	0,2
Campionamento Lambrone in tempo di pioggia	15-16/02/2011	Dalle 18 del 15/02 alle 17 del 16/02	0,96 ± 0,19	0,52 ± 0,26
	27-28/03/2011	Dalle 19 del 27/03 alle 12 del 28/03	0,80 ± 0,08	0,48 ± 0,63

Altro dato fondamentale allo scopo di voler condurre tale analisi è il numero di persone allacciate alla rete fognaria e gravanti sul bacino del depuratore di Merone (ASIL S.p.A.) (88386 persone dichiarate da ASIL), così come il numero di abitanti allacciati e gravanti sul bacino del Lambrone (29294 persone) (Tab.2.1.10). Per il calcolo degli abitanti si faccia riferimento a quanto descritto nella metodologia (cap.2.1.4).

Tabella 2.1.10. Riepilogo della popolazione allacciata alla rete fognaria gestita da ASIL S.p.A. e gravante sul bacino del Fiume Lambrone.

	Turistico (T) / NON Turistico (NT)	Popolaz residente	Popolaz. fluttuante	Popolaz. totale	% persone allacciate alla rete fognaria	Popolaz. servita da ASIL	% popolaz. allacciata, gravante in caso di scollo sul Lambrone (6% sulla Roggia Molinara)	Popolaz. allacciata alla rete fognaria gravante sul Lambrone	Abitanti non allacciati alla rete fognaria
ASSO	T	3629	150	3779	90%	3401	94%	3196	378
BARNI	T	605	750	1355	90%	1220	94%	1146	135
CAGLIO	T	443	1875	2318	90%	2086	94%	1960	232
CANZO	T	5144	315	5459	97%	5295	94%	4975	164
CASLINO D'ERBA	NT	1720	26	1746	99%	1728	94%	1624	18
CASTELMARTE	T	1303	150	1453	90%	1308	94%	1229	145
ERBA (nel bacino)	NT	2811	43	2854	95%	2711	100%	2711	143
LASNIGO	T	459	38	497	100%	497	94%	467	0
MAGREGLIO	T	593	1500	2093	100%	2093	94%	1967	0
PONTELAMPRO	NT	4483	67	4550	99%	4505	100%	4505	45
REZZAGO	T	303	585	888	97%	861	94%	809	27
SORMANO	T	682	750	1432	95%	1360	94%	1278	72
VALBRONA	T	2737	2475	5212	70%	3648	94%	3428	1051

TOTALE	29294	2410
--------	-------	------

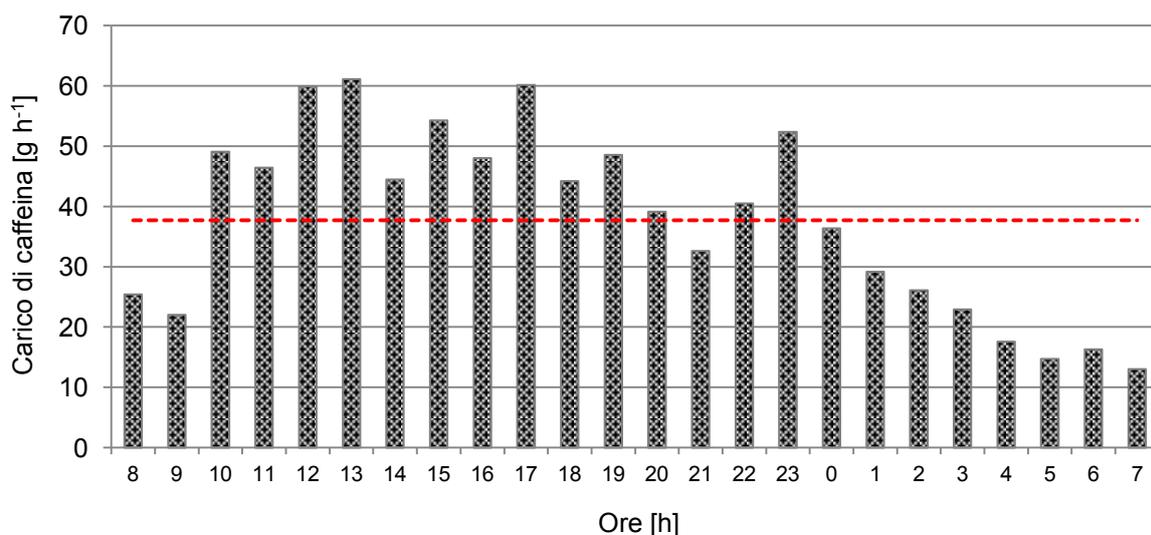
Per quanto riguarda i dati, un passo successivo che si ritiene necessario, allo scopo di voler approfondire tale analisi, risulta essere l'acquisizione di un numero maggiore di campioni acquosi del Fiume Lambrone in tempo asciutto sia nell'arco della giornata così da poter stimare con maggiore accuratezza il carico veicolato dai dati non allacciati alla rete fognaria.

#### *Stima della portata scolmata dai CSO*

Il primo step per stimare col metodo della caffeina la portata scolmata dagli scolmatori fognari è quello di valutare il carico pro capite di caffeina scaricato nel bacino d'interesse.

Per fare questo si è stimato il carico orario di caffeina per i 24 campioni raccolti in fognatura (Fig. 2.1.47) ottenendo un valore medio giornaliero di caffeina di circa  $37 \pm 15$  g.

Considerando che nel bacino dell'impianto di depurazione è allacciata una popolazione di 88386 persone e assumendo che tutti consumano prodotti contenenti caffeina e che quindi la eliminano attraverso le acque reflue, si è stimato un carico pro-capite di caffeina di circa  $10 \text{ mg persona}^{-1} \text{ giorno}^{-1}$  (l'equivalente di 3 tazzine di caffè espresso).



*Figura 2.1.47. Carico orario di caffeina nell'acqua in ingresso al depuratore e suo valor medio.*

Nonostante si possano riscontrare picchi di caffeina tra le 12:00 e le 13:00 e intorno alle 17:00 questi risultano difficilmente imputabili al differente consumo di bevande con caffeina all'interno di una ipotetica giornata. Tali andamenti giornalieri non sono infatti riscontrabili nell'analisi dei campioni in ingresso all'impianto di depurazione poiché il tempo che la caffeina impiega a giungere dallo scarico civile di una determinata abitazione all'impianto di trattamento varia all'interno del bacino sensibilmente in relazione alle caratteristiche costruttive della rete fognaria (lunghezza, pendenza, ecc.) nonché dalla sua capacità di smaltimento impedendo un'analisi sub giornaliera della distribuzione del carico.

Si è proseguita l'analisi utilizzando il valore stimato di del carico pro capite di caffeina per la stima del carico di caffeina nel Lambrone nei giorni asciutti e nei giorni piovosi.

Si è stimato dapprima il carico in tempo asciutto moltiplicando la concentrazione per la portata allo scopo di voler caratterizzare il carico background del sistema dovuto alla popolazione non collettata alla rete fognaria e che quindi scarica in continuo acqua reflua nel corpo idrico recettore. In tempo asciutto sono stati raccolti unicamente campioni spot nell'arco di differenti giornate. Attraverso l'analisi del contenuto di caffeina in tali campioni e alla stima della portata del fiume (Tabella 2.1.11) si è potuto stimare un carico medio giornaliero in tempo asciutto nel fiume di circa  $21 \pm 9$  g di caffeina.

Tabella 2.1.11. Concentrazioni e carichi di caffeina per i campioni del Lambrone in tempo asciutto.

Data	Ora	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	Caffeina [µg L <sup>-1</sup> ]	[g giorno <sup>-1</sup> ]
02/09/2011	10:15	0,51	0,67	29,4
02/12/2011	9:15	1,44	0,09	11,1
15/12/2011	12:20	1,25	0,20	21,8
<b>Media</b>				20,8
<b>σ</b>				9,2

In tempo di pioggia sono state effettuate analisi di caffeina sui campioni acquosi orari durante due eventi precipitativi ottenendo per il primo evento concentrazioni di caffeina mediamente di  $572 \pm 267$  ng L<sup>-1</sup>, mentre per il secondo evento concentrazioni mediamente di  $480 \pm 644$  ng L<sup>-1</sup>.

Successivamente abbiamo determinato il carico orario di caffeina nel fiume in tempo di pioggia moltiplicando la concentrazione di caffeina misurata nel fiume per la portata, ottenendo valori mediamente di  $1,7 \pm 0,7$  g h<sup>-1</sup> per l'evento di febbraio e  $1,4 \pm 1,9$  g h<sup>-1</sup> per l'evento di marzo.

Ricordando che in tempo di pioggia il carico veicolato dagli scolmatori di piena è la differenza tra il carico reale nel fiume a cui è sottratto il carico di background dovuto agli utenti non collettati, sottraiamo il carico background diviso per le 24 ore di campionamento, per portarlo da un passo temporale giornaliero ad orario, pari a  $0,86$  g h<sup>-1</sup> ai carichi orari nel fiume in tempo di pioggia.

Considerando veritieri solo i valori maggiori di zero (la presenza di valori negativi dimostra probabilmente che tali campioni non sono in grado di caratterizzare a pieno il tempo asciutto e che quindi si necessita un ulteriore approfondimento in tal senso) otteniamo la curva del carico riportata in Figura 2.1.47. Tale carico è dovuto all'attivazione degli scolmatori fognari ed è mediamente di  $0,86 \pm 0,7$  g nel primo evento caratterizzato (febbraio 2011) (Fig. 2.1.48) mentre di  $1,5 \pm 2,4$  g nel secondo evento (marzo 2011) (Fig. 2.1.49).

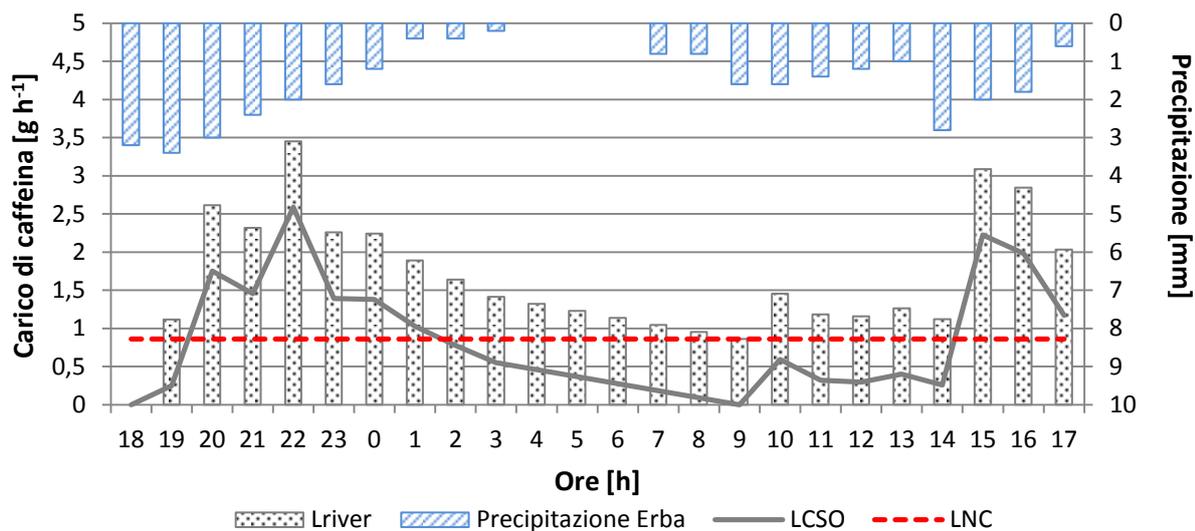


Figura 2.1.48. Distribuzione dei carichi di caffeina nel Lambrone durante l'evento del 15-16 febbraio 2011 accoppiato alla distribuzione dei carichi di caffeina veicolati dagli scolmatori fognari a seguito della rimozione del carico background e alla distribuzioni delle precipitazioni registrate alla stazione di Erba.

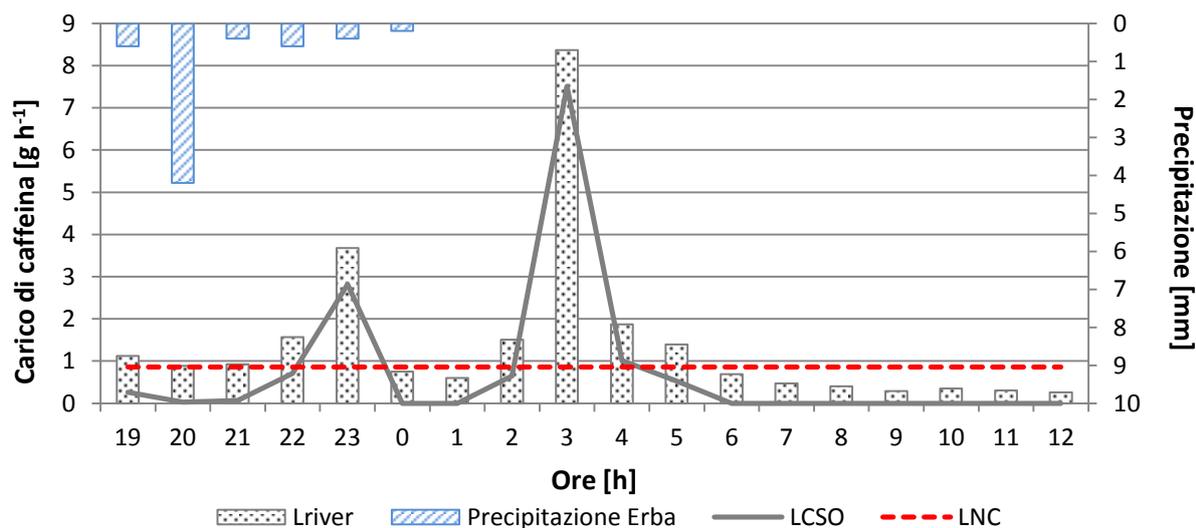


Figura 2.1.49. Distribuzione dei carichi di caffeina nel Lambrone durante l'evento del 27-28 marzo 2011 accoppiato alla distribuzione dei carichi di caffeina veicolati dagli scolmatori fognari a seguito della rimozione del carico background e alla distribuzioni delle precipitazioni registrate alla stazione di Erba.

Come è possibile osservare dalle Figure 2.1.48 e 2.1.49, il picco di caffeina si ha in entrambi i casi a seguito di un evento di pioggia dimostrando quindi l'attivazione di scolmatori fognari all'interno del bacino del Lago di Pusiano. La distanza temporale tra il picco di precipitazione e il picco di caffeina nel fiume è una variabile influenzata dalle caratteristiche del bacino ma soprattutto dall'altezza di pioggia e dall'intensità della stessa.

La somma del carico orario di caffeina andrà quindi a comporre il carico giornaliero che risulta essere pari a circa 20 g per l'evento del 15-16 febbraio 2011 e circa 14 g per l'evento del 27-28 marzo 2011. A scala giornaliera si può ipotizzare che tutti i 24878 abitanti allacciati alla rete fognaria residenti all'interno del bacino avente sezione di chiusura nel punto di campionamento (ovvero all'ingresso dell'impianto di depurazione di ASII S.p.A.) consumino prodotti contenenti caffeina e scarichino la loro quota parte non metabolizzata nella rete fognaria. Considerando tale popolazione, il carico pro capite di caffeina e il carico dovuto agli scolmatori e attraverso l'ultima equazione del bilancio di massa, ho potuto stimare la frazione di portata del fiume dovuta agli scolmatori fognari, che risulta essere dell'8% con pari a  $0,074 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  durante l'evento di febbraio e del 5% durante l'evento di marzo con pari a  $0,042 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Tab.2.1.12).

*Tabella 2.1.12. riepilogo dei risultati per i due eventi precipitativi analizzati*

DATA	[mg persona <sup>-1</sup> day <sup>-1</sup> ]	[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]	[µg L <sup>-1</sup> ]	[g h <sup>-1</sup> ]	[g h <sup>-1</sup> ]	[g h <sup>-1</sup> ]	[g day <sup>-1</sup> ]		[m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ]
15-16 febbraio 2011	10	0,96 ± 0,19	0,52 ± 0,26	1,7 ± 0,7	0,86	0,9 ± 0,7	19,8	8%	0,074
27-28 marzo 2011	10	0,80 ± 0,08	0,48 ± 0,63	1,4 ± 1,9	0,86	1,5 ± 2,4	13,6	5%	0,042

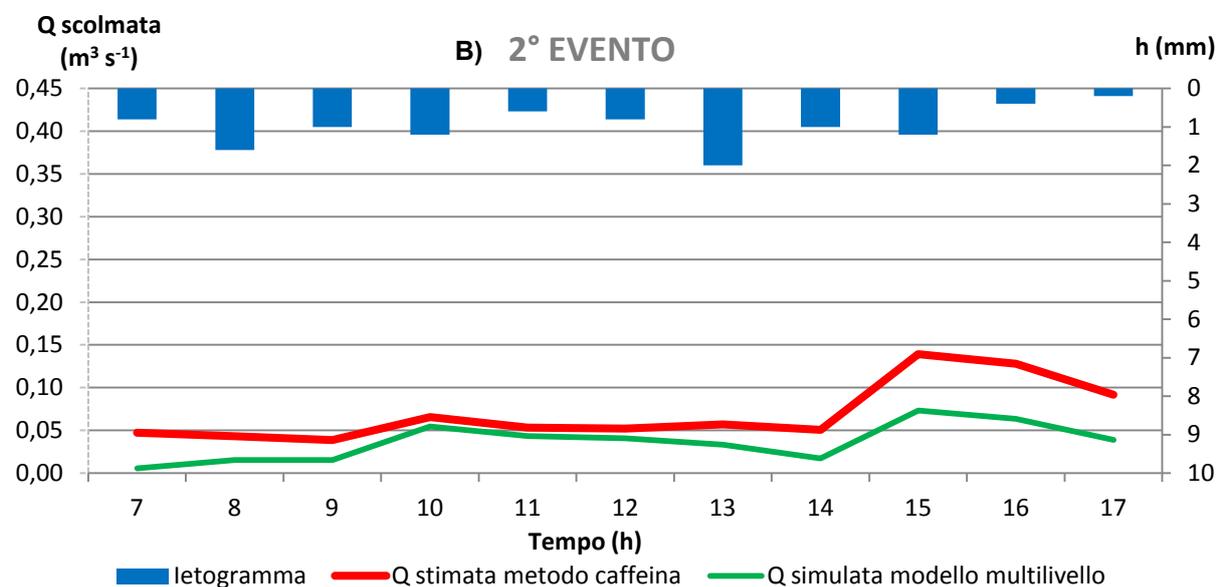
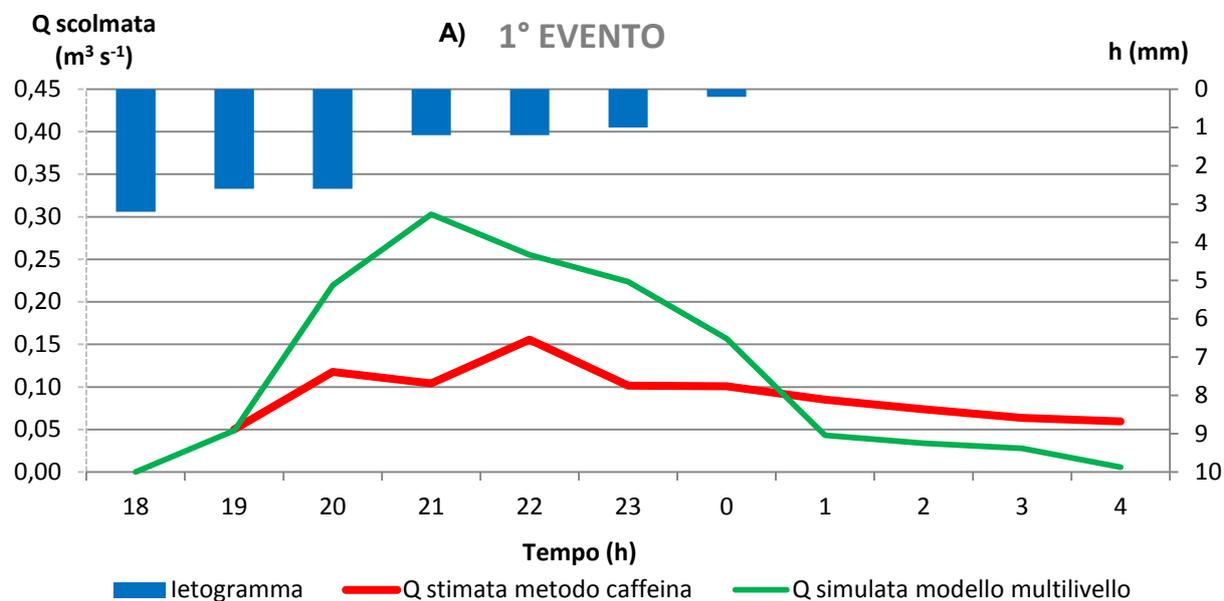
Confrontando i valori di portata così ottenuti attraverso l'utilizzo del metodo della caffeina come tracciante del carico antropico con la portata stimata in modo diretto con il modello dell'invaso lineare, è stato possibile effettuare una cross-validazione delle due metodologie, che verrà discussa nel paragrafo successivo.

#### *2.1.5.5 Confronto tra il metodo della caffeina e l'approccio modellistico per la stima della portata scolmata*

Per gli eventi precipitativi di febbraio e marzo 2011 descritti nel paragrafo precedente abbiamo stimato la portata al minuto all'interno della rete fognaria gravante su ciascun scolmatore fognario nel bacino del Fiume Lambrone attraverso il modello afflussi/deflussi, i cui risultati sono stati descritti nel paragrafo 2.1.5.1. Le portate così stimate sono state incrementate della portata media nera e della portata infiltrata nella rete fognaria; inoltre, sono state decurtate della portata "soglia" rappresentante la portata minima affinché ci sia l'attivazione dello scolmatore fognario. Tali portate avranno sempre valore zero, eccetto durante gli eventi di scolmo. A questo punto sono stati applicati i modelli multivariati semplice e multivariati multilivello per filtrare unicamente gli scolmatori che da tale analisi risultassero attivi definendo così la portata scolmata durante i due eventi monitorati. Tale portata, decurtata di una quota pari al 19%, rappresentante la quota parte nel Lambrone che mediamente

viene derivata dalla Roggia Molinara, rappresenta la portata stimata per scolmare e raggiungere la sezione di chiusura del bacino considerato.

Tale portata è stata quindi calibrata con la portata scolmata stimata applicando il metodo della caffeina e andando a variare il rapporto di diluizione facendo attenzione di rientrare nei limiti suggeriti dalla vigente normativa e definiti dalle casistiche dell'analisi sperimentale.



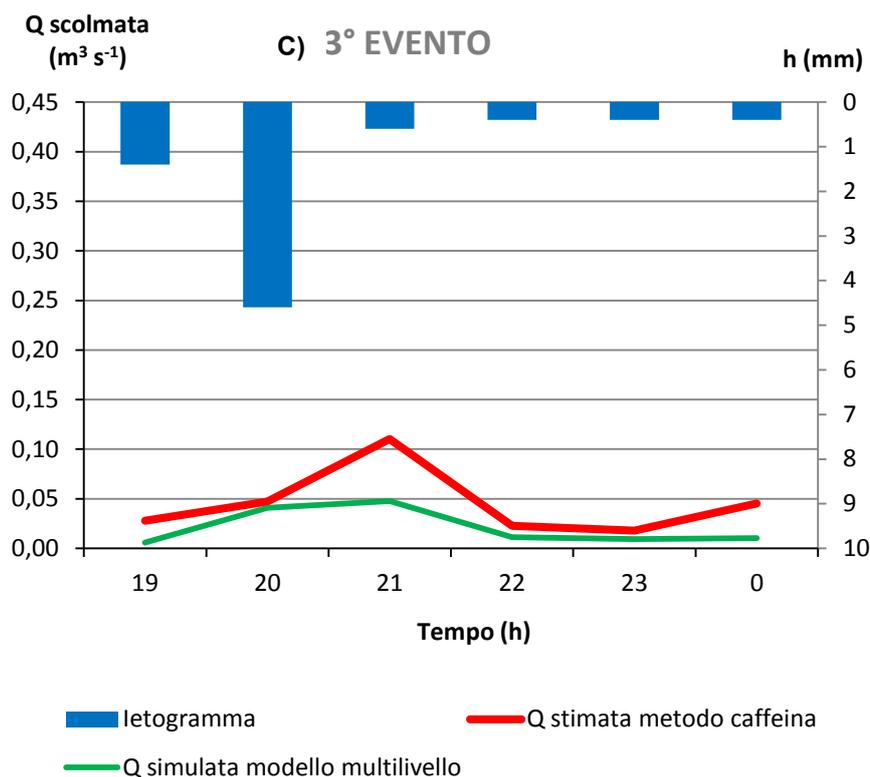


Figura 2.1.50- A,B,C: Confronto della stima oraria della portata scolmata per i tre eventi di precipitazione 15 e 16/2/20011 e 27-28 marzo 2011 stimata con il metodo della caffeina e con l'accoppiamento del modello afflussi/deflussi con il modello multivariato multilivello.

**Il confronto tra i modelli multivariato multilivello rispetto alla caffeina mostra  $R^2$  decisamente confrontabili (0,49) (Fig.2.1.50). Entrambe queste correlazioni risultano significative ( $p < 0,001$ ).**

### 2.1.6 Stima del carico di fosforo veicolato dagli scolmatori fognari

Una volta stimate le portate scolmate per i tre eventi monitorati (due a febbraio e uno a marzo), pari rispettivamente a 0,083 e 0,07  $m^3 s^{-1}$  per i due eventi di febbraio (durata: 11 h per entrambi) e 0,03  $m^3 s^{-1}$  per l'evento di marzo (durata: 6 h), e considerando una concentrazione media di fosforo totale nel refluo durante un evento di scolmo stimata in 700  $\mu g L^{-1}$  in un lavoro pregresso (Inneguale, 2005), è stato possibile stimare il carico di fosforo veicolato dagli scolmatori fognari durante i suddetti eventi, che è risultato rispettivamente di 2,3 kgP evento<sup>-1</sup>, 1,9 kgP evento<sup>-1</sup> e 0,45 kgP evento<sup>-1</sup>. A questo punto è stato poi possibile valutare il contributo dovuto agli scolmatori fognari al carico totale di fosforo nel fiume durante i tre eventi: conoscendo per ogni evento la variazione sia di concentrazione di fosforo totale, determinata analiticamente sui campioni orari raccolti, sia della portata nel fiume, ottenuta sperimentalmente a partire dai dati di livello monitorati in continuo e attraverso una curva di deflusso livello/portata (Salerno, 2005), si è calcolato il carico totale di fosforo nel fiume potendo così quantificarne la quota parte imputabile agli scolmatori.

Tabella 2.1.13. Carichi veicolati dagli scolmatori fognari e loro proporzione sul totale

Eventi (durata)	Portata scolmata (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Portata fiume (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Carico di fosforo da scolmo (kg evento <sup>-1</sup> )	Carico di fosforo totale (kg evento <sup>-1</sup> )	Percentuale di carico dovuto allo scolmo (%)
febbraio (dalle 18 alle 4)	0,083	0,8	2,3	5,2	45
febbraio (dalle 7 alle 17)	0,07	1,07	1,94	4	49
marzo (dalle 19 alle 24)	0,05	0,81	0,45	2.	31

**Dall'analisi così (tabella 2.1.13) effettuata si evince che durante eventi precipitativi circa il 42 % del carico nel fiume è veicolato dagli scolmatori fognari.**

## 2.1.7 Definizione del carico di fosforo di origine naturale

### 2.1.7.1 Il monitoraggio in continuo per la stima del carico di origine naturale

Come è stato già affermato, la sezione del Gajum fornisce importanti informazioni sull'apporto di fosforo e particolato dovuto a fenomeni erosivi e di dilavamento superficiale, facente parte di un sottobacino in condizioni naturali.

L'analisi dei dati di qualità dell'acqua del Gajum provenienti dalle campagne di campionamento tradizionale (2002-2004/2010), ha evidenziato l'esistenza di una correlazione significativa tra i valori di fosforo totale (TP), mediamente rappresentativi per la giornata di campionamento, e la portata media giornaliera con un R<sup>2</sup> di 0,93, individuando anche una buona correlazione tra portata e PP ( R<sup>2</sup>=0,95) e TP e PP ( R<sup>2</sup>=0,99). La portata è tradizionalmente considerata in letteratura come unico predittore per le concentrazioni dei nutrienti (Nolan et al., 2005) (Fig. 2.1.51). Tuttavia, in quanto l'andamento della portata non caratterizza le repentine variazioni di concentrazione dei nutrienti soprattutto nelle prime fasi di precipitazione, tale relazione non è sempre attendibile (Quilbe et al, 2006; Johnes, 2007; Jordan et al., 2007), soprattutto quando si considera una scala temporale di maggior dettaglio (ad es. oraria) e campioni prelevati in tempo di pioggia.

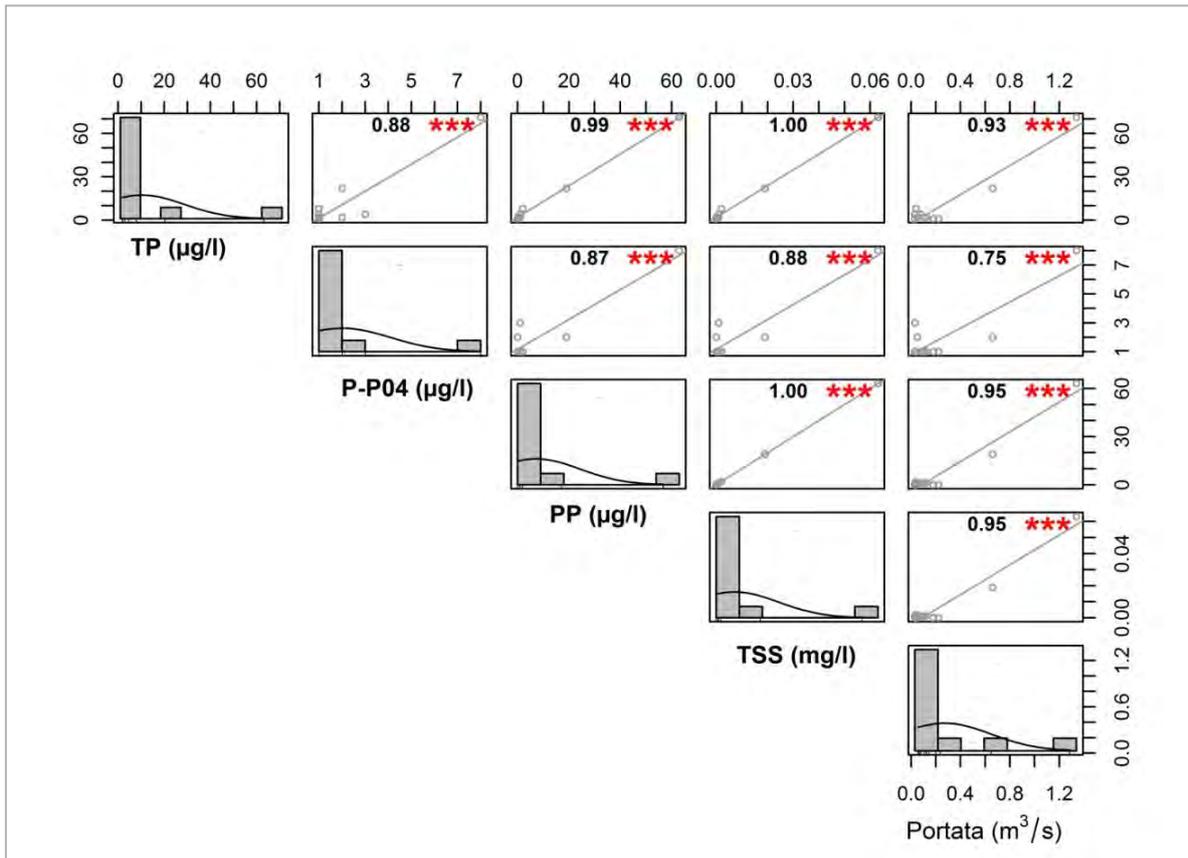


Figura 2.1.51. Matrici di correlazione per il fosforo totale (TP) con fosforo ortofosfato (P-PO<sub>4</sub>), fosforo particolato (PP), solidi sospesi totali (TSS) e portata relativi alle campagne tradizionali 2002-2004/2010 con campionamento mensile; le stelle indicano la significatività del coefficiente di regressione R<sup>2</sup> (\*\*\*\*, 0.001; \*\*\*, 0.01; \*\*, 0.05; \*, 0.1; „, 1).

L'analisi di qualità dell'acqua del Gajum eseguita nella campagna di monitoraggio intensivo 2010-2011 ha permesso un'analisi di maggiore dettaglio, a scala oraria, dell'andamento delle forme di fosforo rispetto ai dati monitorati in continuo (Fig.2.1.52-a). Confrontando infatti i valori delle concentrazioni delle principali forme di fosforo (TP, P-PO<sub>4</sub>, PP), misurate in laboratorio sui campioni raccolti durante i tre eventi precipitativi, con i dati sperimentali di torbidità e conducibilità, misurate in continuo, e di portata, stimata dalle misurazioni di livello, è stata individuata una buona correlazione delle concentrazioni di fosforo totale (TP) e della frazione di fosforo particolato (PP) con la torbidità con un R<sup>2</sup> rispettivamente pari a 0,88 e 0,89 (Fig. 2.1.52-b).

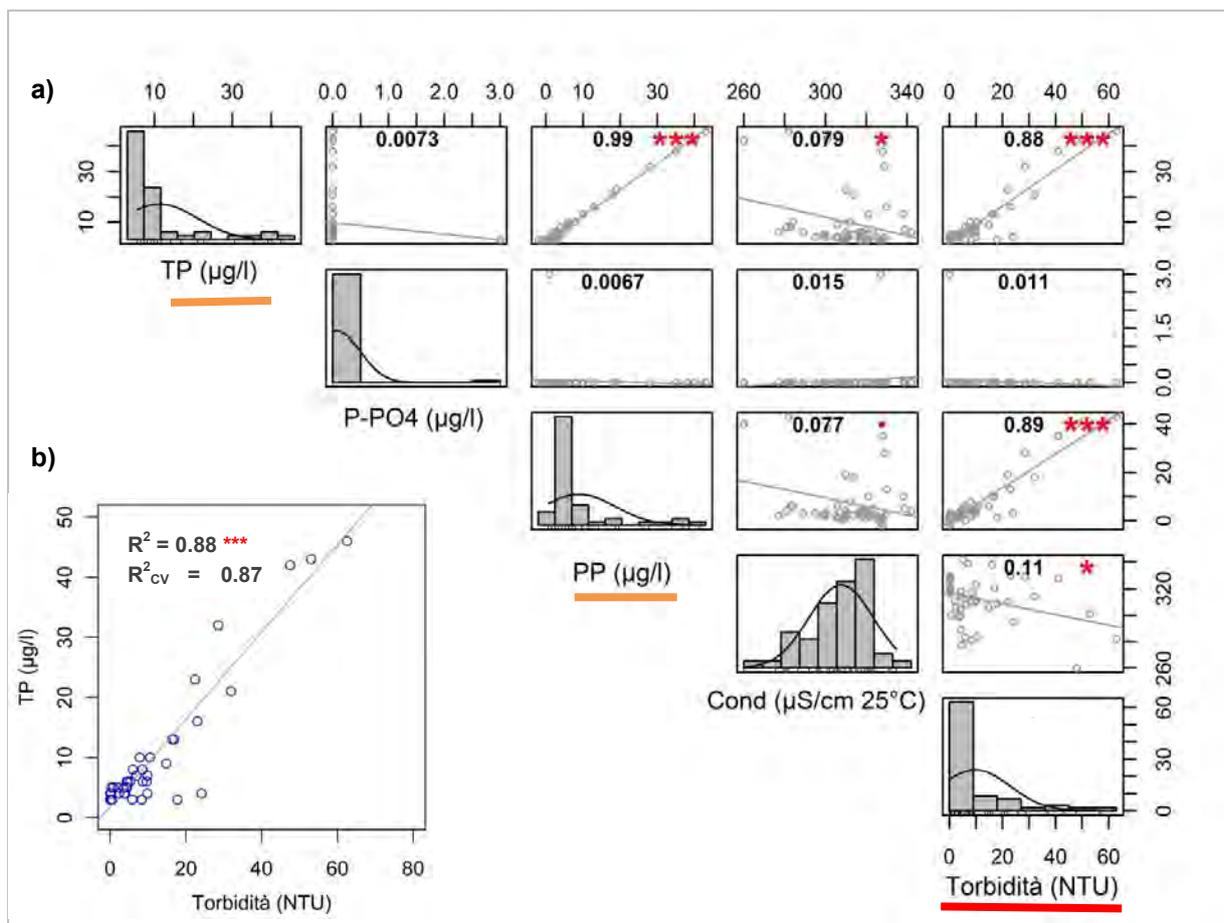


Figura 2.1.52. Matrici di correlazione per il fosforo totale (TP) con fosforo ortofosfato ( $P-PO_4$ ), fosforo particolato (PP), conducibilità, e torbidità per i tre eventi precipitativi campionati intensivamente; le stelle indicano la significatività del coefficiente di regressione  $R^2$  (\*\*\*\*, 0.001; \*\*\*, 0.01; \*\*, 0.05; \*, 0.1; ,, 1). b) Plot del modello per la stima delle concentrazioni di TP utilizzando come predittore la torbidità, con indicazione dell' $R^2$  e dell' $R^2$  cross-validato ( $R^2_{cv}$ ).

Osservando dunque l'elevata significatività della relazione tra i valori di torbidità monitorati in continuo e le concentrazioni di TP misurate in laboratorio, si può affermare, in accordo con quanto riportato anche in letteratura, che la torbidità rappresenti un predittore per la stima delle concentrazioni di TP di un corpo idrico, come il Gajum. Le concentrazioni di TSS possono invece essere utili per la determinazione delle dinamiche di trasporto dal bacino di materiale in sospensione in funzione del regime idrologico osservato. Il modello di regressione semplice tra torbidità e TP così ottenuto è espresso da un'equazione lineare:

$$TP_{sim} = 0,73 \cdot TORB + 1,88 \quad (R^2 \text{ di } 0,88)$$

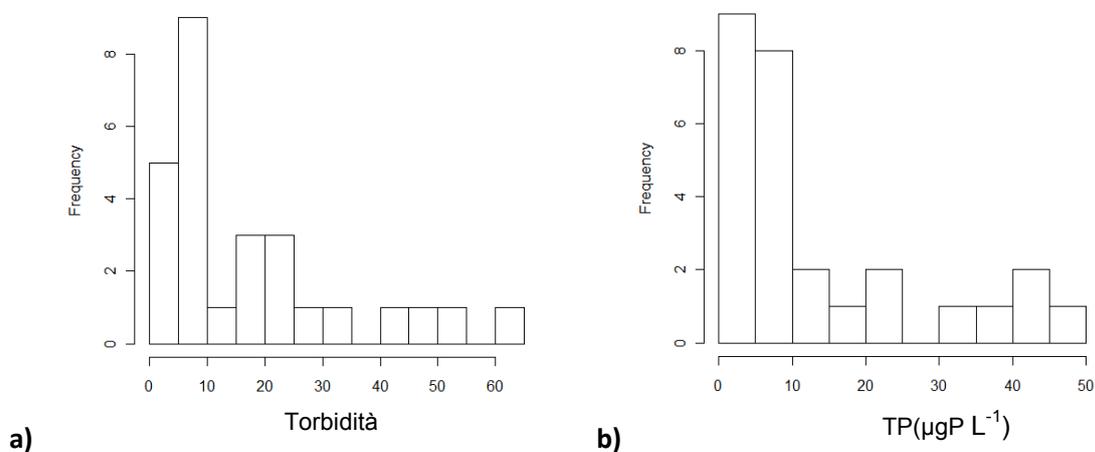
Il modello è stato calibrato utilizzando tutto il set di dati degli eventi monitorati sul Gajum, dove i valori di torbidità considerati variavano tra 4,4 e 67 NTU, laddove il TP misurato era compreso in un range tra 3 e 46  $\mu\text{gP L}^{-1}$ .

Successivamente si è esaminata statisticamente la capacità predittiva del modello attraverso una tecnica di validazione incrociata o cross-validazione (*cross-validation*), che costituisce un metodo di

valutazione più preciso rispetto all'osservazione dei residui (Aitkin et al., 2009). Il modello individuato è stato cross-validato mediante il metodo *Leave-one-out* che consiste nel ricalcolare il modello con l'esclusione di un oggetto alla volta, predicendo i valori della risposta per tutti gli oggetti via via esclusi. Come risultato del procedimento di validazione, per valutare la bontà del modello di classificazione in predizione, si è considerato il coefficiente di determinazione "cross-validato" ( $R_{CV}$ ). Dalla cross validazione di tutto il set di dati monitorati sul Gajum si è ottenuto un  $R_{CV}^2$  di 0,87.

Il modello lineare individuato trova conferma in quelli trovati da Grayson et al. (1996), Christensen et al. (2002), Rasmussen et al. (2008), e Jones et al. (2011), sebbene risultino differenti i valori sia della pendenza sia dell'intercetta sicuramente dovuto alla specificità di ciascun sito.

L'equazione di regressione semplice individuata è stata applicata per ottenere una serie continua della concentrazione di TP a diverse scale temporali (sub-oraria, oraria, giornaliera) per il periodo 22 aprile 2011 - 14 giugno 2011, partendo dai dati della torbidità acquisiti ogni 15 minuti dalla sonda multiparametrica e mediamente variabili entro un range di 0-260 NTU. L'analisi della distribuzione di frequenza dei valori di torbidità per il bimestre monitorato ha evidenziato che circa il 99% delle misure è stata inferiore a 50 NTU (Fig.2.1.53-a). Pertanto, i valori di torbidità misurati durante i tre eventi di pioggia e compresi tra 0-63 NTU si possono considerare estremamente rappresentativi del periodo monitorato. Inoltre, durante questi eventi, il 78 % delle misure di torbidità è risultato inferiore a 10 NTU. Valutando anche la distribuzione dei dati di fosforo totale emerge che si distribuiscono maggiormente tra una concentrazione di 0 e 10  $\mu\text{g P L}^{-1}$  (Fig.2.1.53-b).



**Figura 2.1.53.** Istogrammi di distribuzione di frequenza dei dati di torbidità (a) e fosforo totale (b) utilizzati nella calibrazione del modello di regressione lineare.

Il grafico di Figura 2.1.54 mostra, per il bimestre aprile-giugno 2011, l'andamento giornaliero delle concentrazioni di TP simulate con il modello sulla base dei dati di torbidità acquisiti in continuo in ambiente R, della precipitazione cumulata e della portata simulata mediante l'applicazione del modello idrologico SWAT. In generale, in occasione di eventi precipitativi intensi, si è innanzitutto osservata

una sincronia tra i picchi di portata e di torbidità, infatti i valori massimi di torbidità si sono registrati durante i picchi di portata.

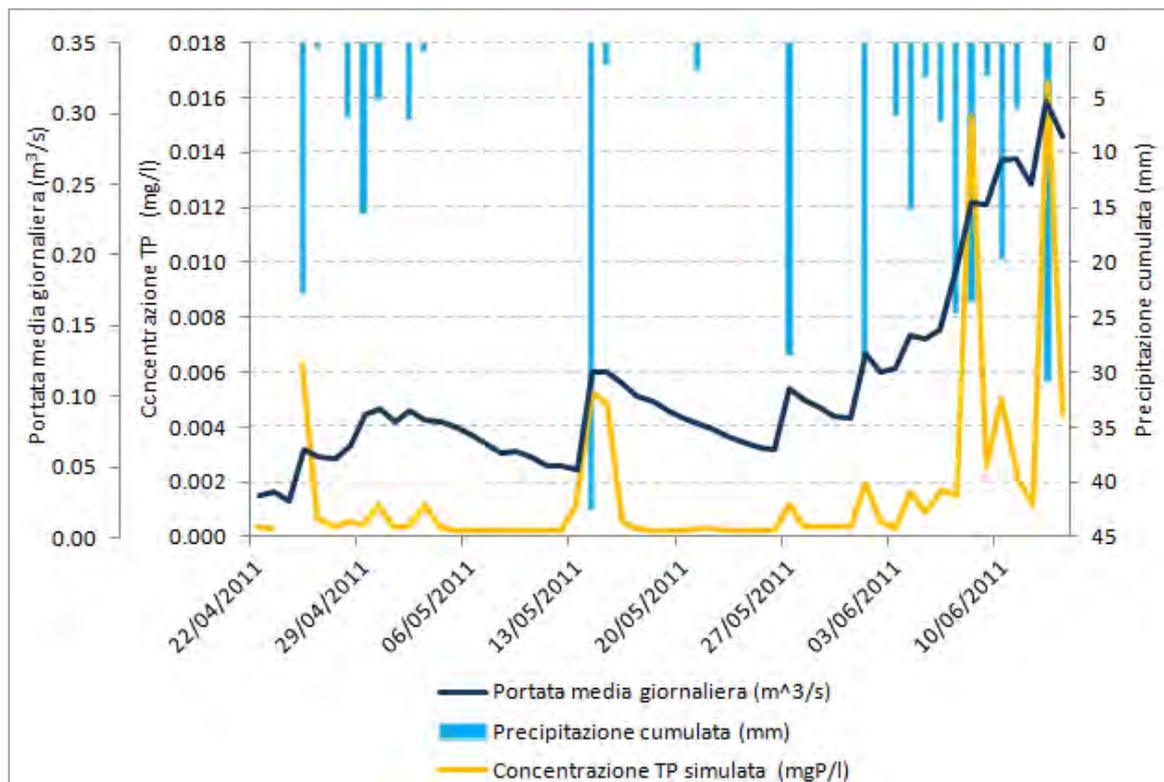


Figura 2.1.54. Andamento a scala giornaliera della precipitazione cumulata, delle stime della concentrazione di fosforo totale e della corrispondente portata per il periodo monitorato.

Dal grafico si osserva che nel periodo monitorato le concentrazioni giornaliere di TP così stimate sono mediamente comprese tra 0 e  $17 \mu\text{gP L}^{-1}$ , con i valori massimi simulati in corrispondenza dei picchi di precipitazione. Dall'analisi ad una scala temporale di maggior dettaglio, oraria, della serie dei valori di torbidità è tuttavia emerso che generalmente lo sfasamento temporale o time delay esistente tra l'altezza massima di pioggia e il picco di torbidità per tutti gli eventi precipitativi avvenuti durante il periodo monitorato è stato all'incirca di 2 ore. Pertanto, tale sfasamento temporale è vero anche per la concentrazione di TP rispetto al picco di precipitazione, dal momento che le stime sono effettuate a partire dai valori di torbidità mediante il modello di regressione.

Si nota inoltre che a partire dall'inizio di giugno 2011, in concomitanza con un periodo piovoso piuttosto prolungato e durato fino a metà mese, vi è stato un progressivo aumento della portata del fiume e anche le concentrazioni di TP tendono ad aumentare corrispondentemente. Tuttavia, in condizioni di tempo asciutto con valori di torbidità tra i NTU le concentrazioni medie giornaliere di TP stimate con il modello di regressione sono pressoché pari a 0, come confermato dalle analisi effettuate su campioni raccolti in tempo asciutto nella campagna di monitoraggio (2002-2004) (TP mediamente pari a  $3 \mu\text{gP L}^{-1}$ ).

### 2.1.7.2 Stima del carico di fosforo di origine naturale

Identificata la sezione di chiusura del sottobacino del Gajum, a Canzo, la quale caratterizza un bacino "vergine", l'unico completamente naturale nel quale l'urbanizzato è assente e quindi rappresenta la sezione idonea per le finalità di questo studio, per questa sezione di chiusura è stato quindi calibrato e validato il carico di nutrienti di origine naturale mediante l'utilizzo del modello SWAT. Stimata la portata relativa a questa sezione, si è passati alla modellizzazione del carico naturale di fosforo. La fase di calibrazione è stata eseguita su dati sperimentali di fosforo totale (TP) misurati su campioni di acqua del fiume nella sezione del Gajum prelevati da gennaio a maggio 2004 in una precedente campagna di monitoraggio tradizionale (Salerno, 2005), quindi tali dati chimici rappresentano solamente una condizione istantanea relativa al momento in cui è stato effettuato il campionamento. Tuttavia il periodo di monitoraggio considerato è stato caratterizzato non solo da periodi di tempo asciutto ma, a partire da aprile, si sono registrati anche degli eventi precipitativi. Quindi considerando le difficoltà organizzative che il campionamento manuale comporta, si può affermare che la campagna di monitoraggio può essere considerata rappresentativa del carico di fosforo di questa sezione sia in tempo asciutto che in tempo di pioggia. Le forme di fosforo che sono state simulate dal modello SWAT sono il particolato in sospensione, il fosforo minerale minP e il fosforo organico orgP confrontate rispettivamente con il TDP e il PP come indicato in Tolson et al.(2004), laddove il TP è dato dalla somma delle simulazioni giornaliere di minP e orgP.

La Tabella 2.14 mostra gli indici statistici che permettono di definire la bontà della simulazione e si può constatare che la fase di calibrazione ha una elevata significatività con un  $R^2$  pari a 0,99. La fase di validazione si è basata su stime continue delle concentrazioni giornaliere di TP generate mediante un'equazione di regressione semplice definita a partire dai valori sperimentali di torbidità acquisiti in continuo in questo sottobacino e utilizzati come predittori (paragrafo precedente). Estremamente importante è quindi risultata l'attività sperimentale di monitoraggio in continuo della qualità dell'acqua del Gajum mediante sonda multiparametrica e il campionamento intensivo avvenuto durante alcuni eventi precipitativi intensi. Come definito nel par. 2.1.7.1, per ottenere una serie in continuo di concentrazioni di TP stimate a scala giornaliera, utili ai fini della calibrazione e validazione con SWAT, è stato definito un modello di regressione lineare utilizzando come dati di input del modello le concentrazioni orarie di TP oraria relative a tre campionamenti intensivi effettuati in tempo di pioggia e i corrispondenti valori di torbidità monitorati in continuo attraverso le sonde multiparametriche. Sulla base delle stime delle concentrazioni medie giornaliere di TP, stimate mediante il modello di regressione tra TP e torbidità, e della portata media giornaliera stimata mediante SWAT per il periodo dal 22 ottobre al 10 novembre 2011, sono stati poi calcolati i relativi carichi medi giornalieri di fosforo veicolati dal sottobacino del Gajum, utilizzati poi per la validazione di SWAT. La validazione del modello in SWAT ha presentato una buona simulazione, come si può vedere dal valore degli indici riportati in Tabella 2.1.15. In particolare, la correlazione tra il fosforo osservato e il fosforo simulato ha presentato un  $R^2$  pari a 0,98 e un valore dell'Indice di Nash-Sutcliffe  $E_{ns}$  pari a 1. Quest'ultimo è il valore ottimale per questo indice che risulta quello più rappresentativo per verificare l'efficienza delle

simulazioni, come messo in evidenza in ASCE (1993), poiché oltre a considerare la correlazione dei dati rispetto ad una determinata funzione rispetta il rapporto degli ordini di grandezza delle serie.

Tabella 2.1.15. Indici statistici per valutare la bontà della simulazione.

Gajum	E <sub>ns</sub>	R <sup>2</sup>
Calibrazione (Gennaio – Maggio 2004 campioni spot)	1	0,99
Validazione (22/10/2011 – 10/11/2011)	1	0,98

Una volta effettuata la calibrazione e validazione di SWAT per il sottobacino del Gajum, il modello è stato applicato a tutto il bacino idrografico del Lago di Pusiano modificando l'uso del suolo come se il bacino non fosse urbanizzato, stimando così il carico esterno di fosforo di origine naturale che giunge al lago per il periodo dal 1998 al 2010, per cui si avevano a disposizione serie continue di dati meteorologici giornalieri. Il carico naturale di fosforo è stato stimato mediante SWAT a scala giornaliera (ma aggregando i dati a scala annuale) associandolo alle portate che giungono al lago nell'arco di tempo di un anno.

**Il valore medio del carico di fosforo naturale proveniente dal bacino è risultato di 1,1 tP y<sup>-1</sup>.** Questo valore ottenuto, essendo solo di origine naturale, è considerato il minimo valore di carico di fosforo che si può riscontrare nel bacino, ovvero il carico esterno di fosforo del bacino non può presentare valori inferiori a 1,1 tP y<sup>-1</sup>. La Figura 2.1.55 presenta i risultati ottenuti dalla simulazione mediante SWAT, a scala annuale, dei carichi naturali di fosforo provenienti dal bacino per il periodo dal 1998 al 2010, confrontati con l'andamento delle precipitazioni. Si può vedere come il carico di fosforo sia variabile e fortemente dipendente dal regime idrologico. Il massimo valore di carico di 2,5 tP y<sup>-1</sup> si è riscontrato nel 2002, anno in cui si è avuta una maggiore intensità di precipitazione (2310 mm di pioggia cumulati) che ha comportato un maggiore processo erosivo e di dilavamento superficiale. Il 2005 è stato invece l'anno in cui si è stimato un carico più basso, pari a 227 kgP y<sup>-1</sup>, in corrispondenza del picco minimo di precipitazione cumulata (994 mm). Il valore medio annuale del carico naturale di fosforo del bacino è pertanto di 1,1 tP y<sup>-1</sup>, con una precipitazione media annua di 1578 mm di pioggia.

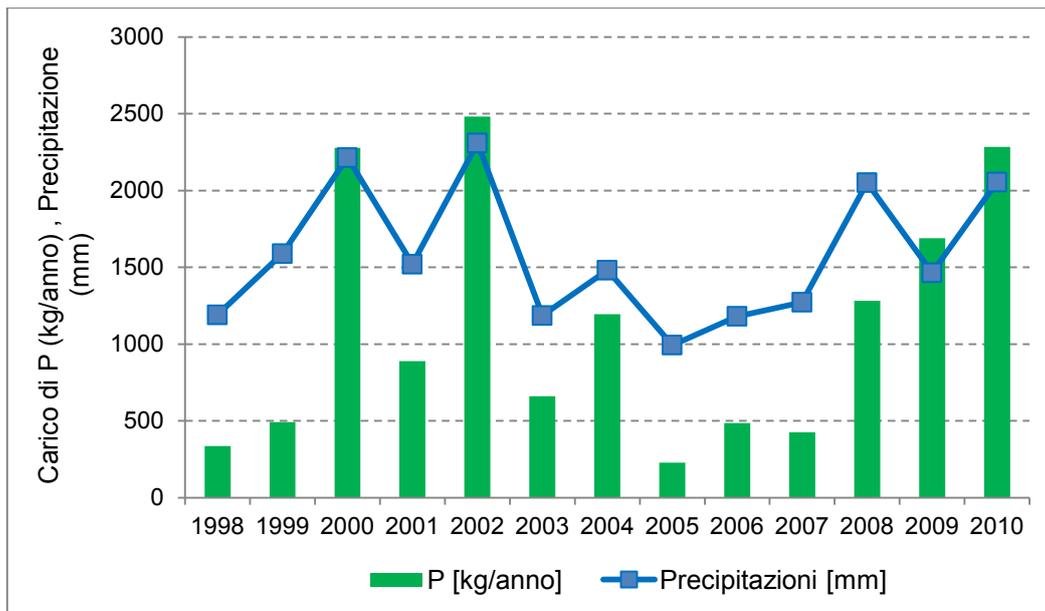


Figura 2.1.55. Andamento dei carichi naturali di fosforo (P) simulati con SWAT e della precipitazione rilevata dalla stazione di Canzo (dati ARPA) dal 1998 al 2010.

## 2.1.8 Definizione del carico di fosforo di origine diffusa e puntiforme nel bacino del Lambrone

### 2.1.8.1 Caratterizzazione del carico di fosforo in tempo asciutto

Per caratterizzare con maggiore definizione le differenti fonti di fosforo nel bacino del Lago di Pusiano, oltre alla definizione degli apporti di origine naturale, dovuti ai fenomeni erosivi e di dilavamento superficiale delle superfici forestate, è stato necessario definire anche il carico di fosforo generato da attività antropiche, definito urbano, che include il carico derivante sia da fonti diffuse sia da fonti puntiformi. La quantificazione del carico diffuso e puntiforme si è basata su l'utilizzo dei dati acquisiti nel monitoraggio in continuo, secondo quanto descritto nel successivo paragrafo (Figura.2.1.56). Parallelamente è stata condotta un'analisi approfondita allo scopo di stabilire le cause dell'inquinamento di origine diffusa nel Fiume Lambrone e identificare le maggiori criticità a scala di bacino. Nel caso del bacino del Lago di Pusiano, per sorgenti diffuse si intendo quelle derivanti dagli scarichi diretti dovuti agli abitanti non collettati al sistema fognario consortile, la cui percentuale è variabile all'interno del bacino ed arriva sino al 30% nel sottobacino del Torrente Foce, e al rilascio di carico dalle superfici urbane (deflusso urbano). Le sorgenti puntiformi, invece, sono costituite principalmente dagli scaricatori piena che riversano il loro carico inquinante nei corsi idrici superficiali durante i maggiori eventi precipitativi, una volta superata la capacità massima dei collettori (Salerno, 2005; Inneguale, 2006).

Dai dati analitici relativi alle campagne 2002-2004 e 2010 disponibili per ciascuna stazione monitorata e sulla base dell'altezza cumulata di pioggia relativa ai giorni del campionamento, in ogni sezione

sono stati individuati i valori medi giornalieri di TP misurati in condizioni di tempo asciutto che costituiscono le concentrazioni di fondo. La Tabella 2.1.16 mostra il riepilogo dei risultati ottenuti per le stazioni considerate e rappresentative dei diversi usi del suolo, principalmente naturale ed urbano. Le sezioni scelte rappresentano infatti aspetti diversi della qualità delle acque del bacino. In particolare la sezione del Lambrone descrive il 79% del bacino emerso; la stazione del Gajum caratterizza un bacino completamente naturale e quindi fornisce importanti informazioni sull'apporto di particolato e fosforo dovuto all'erosione; la stazione della Molinara invece è rappresentativa di un sottobacino fortemente urbanizzato nella piana d'Erba, mentre il Foce caratterizza un bacino urbanizzato nella regione più montana.

*Tabella 2.1.16. Concentrazioni medie e deviazioni standard del TP ( $\mu\text{gP L}^{-1}$ ) in tempo di asciutto per ciascuna sezione monitorata.*

<b>TP (<math>\mu\text{gP L}^{-1}</math>)</b>	<b>MAGREGLIO</b>	<b>FOCE</b>	<b>GAJUM</b>	<b>LAMBRONE</b>	<b>MOLINARA</b>	<b>EMISSARIO SEGRINO</b>
<b>Media</b>	30	60	3	41	78	59
<b>Dev.standard</b>	20	17	2	29,9	45	36
<b>Valore minimo</b>	1	36	1	15	12	20
<b>Valore massimo</b>	66	88	8	162	103	169

Si può notare che le concentrazioni minori sono state riscontrate nella sezione del Gajum, confermando le caratteristiche di bacino naturale, e le più alte nella sezione della Molinara indicando un notevole apporto di fosforo di origine antropica derivante dallo scarico diretto di reflui civili nei corpi idrici recettori. La sezione del Foce presenta un valore medio di fosforo più elevato rispetto alla sezione del Lambrone, sottolineando la rilevanza dell'impatto antropico degli abitanti non collettati (Comune di Valbrona 30%).

I dati riguardanti la popolazione allacciata alla rete fognaria gestita da ASIL S.p.A., per ogni comune, e gravante sul bacino del Lambrone sono riportati in Tabella 2.1.16. Inoltre per la definizione del numero di popolazione non allacciata alla rete (2410 abitanti), sono da considerare come dati fondamentali la popolazione totale per ogni comune e la percentuale delle persone allacciate alla rete. Come si può vedere dalla tabella alla percentuale della popolazione gravante sul Lambrone bisogna tuttavia sottrarre la quota corrispondente alla derivazione della Roggia Molinara, che rappresenta il 6%. Il numero totale di popolazione allacciata alla rete e gravante sul Lambrone è di 29294 persone.

Prima della quantificazione del carico diffuso, per alcune sezioni del bacino (Asso, Valbrona, Cavarona, Caslino d'Erba, e Lambrone a Erba) sono stati calcolati i carichi di fosforo giornalieri generati in condizioni di tempo asciutto, a partire dalle concentrazioni di TP misurate in campioni raccolti nei punti di chiusura dei differenti bacini e le corrispondenti portate simulate mediante SWAT. A tale scopo, per avere una stima delle concentrazioni medie giornaliere di TP in tempo asciutto nelle sezioni considerate, innanzitutto è stata condotta un'analisi a scala di bacino relativamente ai dati di

chimica disponibili per i periodi caratterizzati da assenza di precipitazione. I dati disponibili sono relativi alle campagne pregresse (2002-2004) di monitoraggio qualitativo "routinario" con campionamenti a cadenza mensile (Salerno, 2005) e campioni raccolti nel 2010 unitamente alla campagna pregressa nell'ambito del Progetto PIRoGA. Delle sezioni monitorate durante queste campagne, ai fini della modellizzazione del carico diffuso, sono stati considerati 5 sottobacini con sezione di chiusura rispettivamente a: Asso, Cavarona, Valbrona, Caslino d'Erba ed Erba (Fig.2.1.56, sinistra).