

INRM – Bando Agenzia 2002

Relazione Finale Progetto n. 84

Gestione Integrata risorse idriche
bacino montano
fiume Tagliamento

Proponente: Marina Campolo
Ente: CIFI, Università di Udine

Indice

1	Sommario	3
1.1	Motivazione	3
1.2	Obiettivi	3
1.3	Articolazione del progetto in fasi/azioni	3
1.4	Personale coinvolto nella ricerca	4
2	Bacino del Tagliamento	5
2.1	Caratteristiche della rete idrografica	5
2.1.1	Affluenti principali	7
2.1.2	Pendenza dell'alveo	8
2.2	Problematiche del Tagliamento	8
3	Contesto normativo per la gestione integrata delle risorse idriche	10
4	Raccolta dati	12
4.1	Fonti	12
4.2	Dati pluviometrici, portate e altezze idrometriche	12
4.3	Scarichi	13
4.4	Impatto antropico	13
5	Stato del bacino	15
5.1	Punti monitorati: qualità delle acque	15
5.2	Temperatura dell'acqua	18
5.3	Domanda biochimica di ossigeno	18
5.4	Ossigeno Disciolto	18
5.5	Solidi sospesi	21
5.6	Cloruri	21
5.7	Solfati	21
5.8	Conclusioni sull'analisi dei dati chimici	21
6	Modelli numerici per la gestione del bacino	25
6.1	Modello idraulico e di qualità delle acque	25
6.2	Modello di qualità delle acque	26
6.3	Modello di previsione del deflusso	28
7	Applicazione del modello di qualità delle acque all'alto bacino del fiume Tagliamento	30
7.1	Fasi di implementazione del modello	30
7.2	Taratura delle costanti del modello	33
7.3	Validazione	35
7.4	Utilizzo del modello per la valutazione di alternative di intervento	35
7.4.1	Variazione della portata del Tagliamento	35
7.4.2	Variazione della portata del Torrente But	36
7.4.3	Variazione della concentrazione di BOD nello scarico del depuratore comunale di Tolmezzo	42
8	Applicazione del modello di previsione delle piene all'alto bacino del fiume Tagliamento	44
8.1	Fasi di implementazione del modello	44
8.2	Taratura delle costanti del modello e validazione	46
8.3	Previsione del livello a lungo termine (fino a 10 ore)	46
A	Dati di qualità delle acque	52

1 Sommario

1.1 Motivazione

Il bacino del fiume Tagliamento è la principale rete idrica del Friuli Venezia Giulia. Il progetto di piano di bacino per il fiume Tagliamento ha previsto la realizzazione di interventi per aumentare la sicurezza idraulica del territorio, per favorire il corretto uso delle risorse idriche, per promuovere la difesa delle acque dall'inquinamento, per conservare e tutelare l'ecosistema. Per raggiungere questi obiettivi, è necessario studiare il bacino come un sistema complesso e integrato, in cui l'effetto delle attività antropiche che si svolgono sul territorio, i processi di trasporto idrologico e idraulico e i processi chimico-fisici di trasformazione concorrono a determinare quantità e qualità delle acque.

Lo studio del bacino può essere agevolato dall'utilizzo di modelli matematici in grado di riprodurre il comportamento del Tagliamento di fronte ad eventi critici, come periodi di siccità, eventi di piena o episodi acuti di inquinamento. La possibilità di valutare preventivamente la risposta del territorio a questi eventi permette di pianificare interventi per gestire le criticità riducendone l'impatto ambientale.

1.2 Obiettivi

Obiettivi di questo progetto sono:

1. stabilire le possibilità di collaborazione sinergica tra gli Enti Regionali e Provinciali preposti al monitoraggio e al controllo del territorio (Autorità di Bacino, ARPA, Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente, OSMER, Osservatorio METereologico Regionale, ETP, Ente Tutela Pesca) e l'Università degli Studi di Udine;
2. stimolare, attraverso lo sviluppo di applicazioni dimostrative, l'interesse verso l'utilizzo estensivo della modellistica ambientale per la gestione integrata delle risorse.

La disponibilità di modelli ambientali del bacino del Tagliamento in grado di simulare la risposta del bacino ad eventi critici nota la disponibilità delle risorse idriche, le previsioni di pioggia e il livello di inquinamento attuale, potrebbe permettere di evidenziare con anticipo le situazioni di criticità ambientali e selezionare, tramite valutazione simulata degli effetti prodotti, possibili azioni correttive (regolazione degli scarichi e captazioni, utilizzo degli invasi e controllo del deflusso).

1.3 Articolazione del progetto in fasi/azioni

- **Fase 1: Reperimento dati**
raccolta dei dati idraulici, idrologici e geo-morfologici disponibili presso l'Ufficio Idrografico e l'Autorità di Bacino e dei dati di qualità delle acque disponibili presso l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale; identificazione dei responsabili della gestione e acquisizione dei dati per instaurare un programma di scambio e cooperazione.
Durata: 6 mesi + 2
Prodotti attesi: raccolta di dati relativi al fiume Tagliamento, analisi dei dati storici.
- **Fase 2: Applicazione e convalida del modello di qualità delle acque**
calibrazione del modello di trasporto/trasformazione degli inquinanti; utilizzo del modello per individuare possibili azioni di regolazione per il controllo della qualità delle acque.
Durata: 4 mesi
Prodotti attesi: modello calibrato di qualità delle acque.
- **Fase 3: Sviluppo e convalida del modello di deflusso basato su reti neurali**
sviluppo del modello per la previsione di portata in periodi di magra e di piena.
Durata: 4 mesi
Prodotti attesi: modello calibrato per la previsione del deflusso.
- **Fase 4: Valorizzazione dei risultati**
pubblicazione su rivista dei risultati del lavoro e preparazione di una pagina Web per illustrare il

possibile funzionamento del sistema integrato.

Durata: 3 mesi

Prodotti attesi: articoli su rivista, pagina Web.

1.4 Personale coinvolto nella ricerca

Marina Campolo

ruolo: responsabile del progetto
telefono: 0432 558822
e-mail: marina@argon.crisp.uniud.it
affiliazione: Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica
e Consorzio Friuli Innovazione
Università degli Studi di Udine
profilo professionale: Laurea in Ingegneria delle Tecnologie Industriali
Dottorato in Tecnologie Chimiche e Nuovi materiali
Esperienza nello sviluppo e utilizzo di modelli per la simulazione delle dinamiche ambientali (trasformazione afflussi deflussi, trasporto e trasformazione di inquinanti).

Alfredo Soldati

ruolo: collaboratore/consulente
telefono: 0432 558020
e-mail: soldati@uniud.it
affiliazione: Centro Interdipartimentale di Fluidodinamica e Idraulica
Università degli Studi di Udine
profilo professionale: Professore Universitario
Esperienza nel coordinamento e gestione di progetti a carattere ambientale (modellistica e fluidodinamica ambientale)
Docente di corsi di modellistica e fluidodinamica ambientale a carattere nazionale e internazionale

2 Bacino del Tagliamento

Il Tagliamento è il principale fiume del Friuli Venezia Giulia e rappresenta un sito di particolare interesse dal punto di vista idrogeologico e ambientale. Il fiume ha un letto ghiaioso e un percorso ramificato che si estende dalle Alpi Carniche al Mare Adriatico. Il letto del fiume ha un'ampiezza massima di 2 km ed è circondato da insediamenti urbani. Il notevole interesse di ricerca, testimoniato dall'esistenza di alcuni progetti Europei (Research group on floodplain ecology and biodiversity, Department of Limnology, EAWAG e Geobotanical Institute presso Swiss Federal Institute of Technology, ETHZ, in Zurigo, Svizzera, http://www.internal.eawag.ch/tockner/research/tagli_main.html) è legato al fatto che il fiume si trova in uno stato quasi naturale e viene inondato quasi completamente in media due volte all'anno. La frequenza e l'intensità di questi eventi producono continui riassetamenti dei canali, delle isole ghiaiose e delle zone vegetate. Queste caratteristiche fanno del Tagliamento un luogo privilegiato per la raccolta di informazioni utili per lo studio delle dinamiche evolutive di un corso naturale. Queste informazioni possono essere utilmente sfruttate per predisporre progetti di risanamento di altri siti. I progetti di ricerca attualmente in corso riguardano lo studio dei processi geomorfici, del cambiamento di habitat naturale, delle dinamiche vegetative, la caratterizzazione della biodiversità degli invertebrati e la degradazione dei materiali organici.

Oltre agli aspetti geologici/biologici, sono di estremo interesse per l'attività di ricerca sul fiume gli effetti dell'interazione tra fiume e territorio. Lo stato di qualità delle acque ha un notevole impatto sulla regione circostante, sia per i molteplici insediamenti lungo il fiume sia per gli stretti legami che esistono tra fiume e territorio.

L'obiettivo di questo progetto è quello di sottolineare, attraverso applicazioni dimostrative, il beneficio che si può ottenere attraverso l'utilizzo della modellistica ambientale in termini di comprensione e gestione delle interazioni tra fiume e territorio. Lo scopo finale è quello di sensibilizzare le Autorità preposte alla gestione delle risorse idriche e del territorio all'utilizzo avanzato di tecniche di modellistica ambientale per il monitoraggio, la programmazione e la pianificazione degli interventi. Negli Stati Uniti, questo tipo di attività è riconosciuto come un elemento molto importante alla base della gestione del territorio. L'Environmental Protection Agency americana promuove lo sviluppo e l'utilizzo della modellistica ambientale come strumento per aumentare la conoscenza e la consapevolezza delle interazioni tra uomo e ambiente. Questa politica ha permesso di raggiungere ambiziosi obiettivi di qualità ambientale legati alla gestione e risorse idriche e ha permesso di creare un sistema integrato di gestione delle risorse in grado di automigliorarsi (vedi National Water Program Strategic Plan 2004 - 2008 and National Program Guidance for 2005, <http://www.epa.gov/water/waterplan/>).

Analoghi effetti potrebbero prodursi in Europa ed in Italia attraverso una crescente sensibilizzazione verso l'utilizzo degli stessi strumenti.

La relazione del progetto è organizzata come segue: in questo capitolo vengono descritte brevemente le caratteristiche del bacino del fiume Tagliamento, vengono evidenziate le problematiche principali che caratterizzano la gestione delle risorse idriche e gli aspetti che potrebbero trarre beneficio dall'utilizzo estensivo della modellistica ambientale. Nel capitolo 4 vengono presentati i dati raccolti nel corso di questa attività di studio, evidenziando le criticità del sistema di monitoraggio che è attualmente gestito da più Uffici con diverse competenze. Nel capitolo 5 vengono commentati i dati che sono stati raccolti ed utilizzati nel progetto, al fine di costruire il quadro del Bacino in termini di quantità e qualità delle acque. Nei capitoli 6 e 7 vengono presentate le applicazioni dimostrative sviluppate per il Tagliamento, mettendo in evidenza le potenzialità dell'approccio modellistico.

2.1 Caratteristiche della rete idrografica

La prima fase di questo lavoro ha permesso di riassumere in forma organica una serie di informazioni relative alla configurazione della rete idrografica del bacino del Tagliamento e all'entità dei flussi idrici elaborati. Il bacino è caratterizzato da una gestione abbastanza complessa delle acque superficiali, che vengono captate in più punti per alimentare una serie di invasi utilizzati per la produzione di energia elettrica. Non esiste presso gli uffici consultati (Genio Civile di Udine, Ufficio del Magistero delle Acque di Udine) una raccolta organizzata di dati in grado di chiarire le complessa rete di captazioni e le entità dei flussi idrici. Questi dati sono stati ricavati integrando ed elaborando le informazioni provenienti dai

diversi Uffici. Questa operazione ha permesso di ottenere un quadro abbastanza preciso dei bilanci di massa e delle possibilità di gestione delle risorse attraverso l'utilizzo degli invasi.

Il Tagliamento nasce a 1195 m s.l.m. ai piedi del monte Miaron, presso il Passo della Mauria, alla confluenza dei torrenti La Torre e Stabia.

Il suo percorso iniziale si snoda da ovest verso est per 59 km fino alla confluenza con il Fella (il suo maggiore affluente) a monte di Venzone, per poi proseguire verso sud - ovest con un percorso di circa 25 km fino alla stretta di Pinzano e allo sbocco in mare dopo 178 km.

Il bacino può essere suddiviso in tre parti principali:

- un tratto montano, fino alla confluenza con il Fella;
- un tratto mediano, da Venzone a Pinzano;
- un tratto inferiore, da Pinzano dove il Tagliamento trova libero sbocco in pianura, fino al mare nei pressi di Lignano.

Nel primo tratto del suo corso, fino a Forni di Sopra, il Tagliamento è un torrente di portata modesta che scorre in direzione sud - est con un unico affluente importante, il Giaf. Nonostante ciò, appena a monte di Forni di Sopra parte delle sue acque sono prelevate per alimentare il serbatoio del Lumiei (noto come Lago di Sauris), necessario per il funzionamento della centrale idroelettrica di Ampezzo. Più precisamente vengono convogliati in questo bacino, oltre al Lumiei, numerosi rii e torrenti come Giaf, Zingara, Misiei, Tolina, Agozza, Marodia e Chiaradia, i quali sono tutti, a parte il primo, affluenti di sinistra del Tagliamento.

Il fiume, alimentato quindi dai soli affluenti di destra (Dria, Rovadia, Purone, Poschiadea, Nero, Grasia), prosegue poi fino alla località Caprizzi, dove la maggior parte delle sue acque è convogliata artificialmente nell'omonimo serbatoio che riceve anche quelle già utilizzate dalla centrale di Ampezzo.

Fino a Tolmezzo il Tagliamento è in secca per quasi tutti i periodi dell'anno, anche perchè gli apporti del Vinadia e del Degano, un altro dei suoi principali affluenti (portata media di circa $9 \text{ m}^3/\text{s}$), vengono convogliati quasi interamente in un altro serbatoio il quale, assieme a quello di Caprizzi, va a formare il Lago di Verzegnis (o bacino Ambiesta) che tramite una condotta forzata (di portata massima $66 \text{ m}^3/\text{s}$) alimenta a sua volta la centrale idroelettrica di Somplago.

A Tolmezzo il Tagliamento può nuovamente essere definito fiume in quanto riprende il suo corso grazie all'apporto prima del But ($9,3 \text{ m}^3/\text{s}$ in media) e poi del Fella ($20 \text{ m}^3/\text{s}$ in media). In particolare quest'ultimo affluente raddoppia la portata del Tagliamento, che poi prosegue verso sud - ovest alimentato anche dai torrenti Venzonassa e Pozzolonos.

Nel tratto mediano, ad Ospedaletto (in comune di Gemona del Friuli), parte dell'acqua (circa $20 \div 25 \text{ m}^3/\text{s}$) viene prelevata per alimentare il canale Ledra - Tagliamento utilizzato per fini irrigui.

Il Tagliamento prosegue poi verso sud - ovest e, in località Trasaghis, la sua portata aumenta nuovamente in maniera considerevole per l'apporto - pari a circa $20 \text{ m}^3/\text{s}$ - del torrente Leale e del Lago di Cavazzo (dove si sono convogliate le acque ormai utilizzate dalla centrale di Somplago). In questo punto gli viene restituita la maggior parte dell'acqua prelevata artificialmente a monte per alimentare le centrali di Ampezzo e Somplago.

Più a sud, il Tagliamento raccoglie le acque delle Sorgive dei Bars e del fiume Ledra e successivamente, all'altezza di Pinzano (dove la portata media è di $90 \text{ m}^3/\text{s}$), del torrente Arzino (un altro affluente di importanza notevole), fino ad arrivare a Villanova di San Daniele e poi a Dignano (si veda la foto 2).

Nella parte inferiore del bacino le acque vengono progressivamente assorbite dal terreno ghiaioso. Il Tagliamento si distende nell'alta pianura, presentandosi completamente asciutto per quasi tutto l'arco dell'anno nel tratto compreso tra Dignano e Casarsa della Delizia.

Nei pressi di Gradisca (circa 14 km a valle rispetto alla stretta di Pinzano) confluisce nel Tagliamento il torrente Cosa (lungo 30 km) il quale, essendo in parte assorbito dal terreno ghiaioso ed in parte convogliato per fini irrigui, non incrementa la portata del fiume.

All'altezza di Codroipo e Casarsa buona parte delle acque del fiume riemergono in risorgive ed il letto si restringe e comincia a meandreggiare.

Da Ronchis alla foce il Tagliamento scorre tra le province di Udine e Venezia segnando il confine occidentale del Friuli Venezia Giulia [Stoch et al., 1992, Stoch et al., 1995].

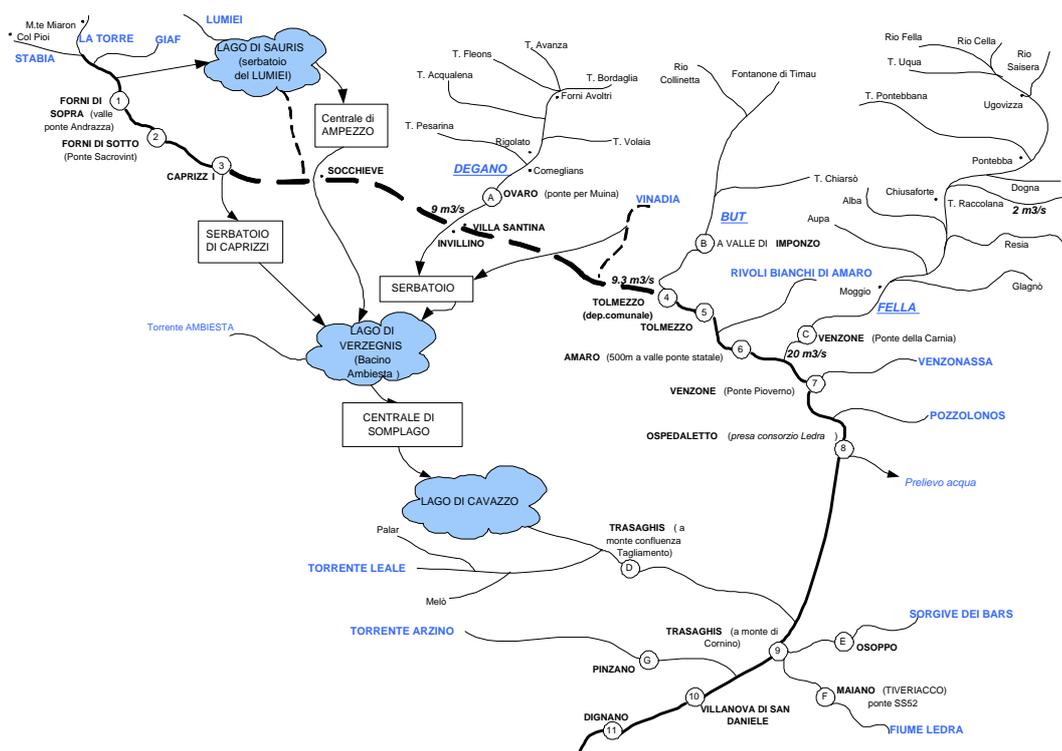


Figura 1: Bacino idrografico dell'alto Tagliamento (sono rappresentati con numeri e lettere i punti nei quali vengono fatte misure di qualità delle acque).

La foce del fiume, nei pressi di Lignano, è costituita da un delta a causa delle ingenti quantità di materiale alluvionale trasportate fino al mare.

La lunghezza complessiva del corso principale è di 178 km. La superficie del bacino imbrifero del fiume Tagliamento fino alla confluenza con il torrente Cosa è di 2480 km². Più a valle la delimitazione diventa incerta a causa della presenza di numerosi corsi d'acqua paralleli ad esso, ed anche per l'esistenza di un gran numero di risorgive che sono alimentate dall'acqua dispersa precedentemente dal fiume stesso.

2.1.1 Affluenti principali

BUT

Il torrente But nasce dal monte Coglians, che è la cima più elevata delle Alpi Carniche. Nel primo tratto scorre in direzione est raccogliendo piccolissimi affluenti, e nei pressi di Timau riceve l'apporto di circa 2 m³/s del Fontanone di Timau, una delle principali sorgenti carsiche della regione. Successivamente il suo corso piega verso sud e nei pressi di Arta scorre su strati di dolomie, arenarie e gessi per ricevere poi da sinistra, a Cedarchis, il Chiarsò, che è il maggiore dei suoi affluenti (garantisce al But una portata media di circa 3 m³/s). La confluenza nel Tagliamento avviene dopo sette chilometri dall'apporto di quest'ultimo affluente nella conca di Tolmezzo. Il But è lungo circa 33 km, il suo bacino ha una superficie di 330 km² e la portata media alla confluenza in Tagliamento è di 9.3 m³/s. Le acque di questo torrente sono molto ricche di solfati.

FELLA

Il Fella è il principale affluente del Tagliamento ed è lungo complessivamente 50 km. Il suo contributo idrico è di circa 20 m³/s in media. Il fiume è molto più articolato in riva sinistra che in riva destra ed ha una concentrazione di solfati notevolmente ridotta rispetto a quella degli altri grandi affluenti del corso superiore del Tagliamento. Nasce a Camporosso dalla confluenza dei rii Cella e Fella ed è alimentato subito dopo, nei pressi di Ugovizza, dal torrente Saisera, suo primo grosso affluente. Nella



Figura 2: Il fiume Tagliamento all'altezza di Villanova di San Daniele.

stessa località riceve il contributo del rio Uqua. Tra Ugovizza e Pontebba si immettono nel Fella il rio Malborghetto, il rio Bianco di Lusnizza e, con una portata media di $3 \text{ m}^3/\text{s}$, il torrente Pontebbana. Da questo punto in poi il fiume piega verso sud fino a Chiusaforte alimentato dai torrenti Dogna e Raccolana (quest'ultimo garantisce una portata media di $2 \text{ m}^3/\text{s}$). Dopo Chiusaforte il Fella si dirige ad ovest verso Moggio. A Resiutta confluisce il torrente Resia, mentre a Moggio Udinese getta le sue acque il torrente Aupa (con un apporto idrico medio di $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ciascuno). Il Fella si dirige poi a sud - ovest e, dopo aver ricevuto in riva destra l'apporto del torrente Glagnò, confluisce nel Tagliamento nella piana di Amaro.

2.1.2 Pendenza dell'alveo

Il fiume Tagliamento può essere suddiviso in tratti nei quali la pendenza è uniforme (vedi Figura 3). I dati sono schematicamente riassunti in Tabella 1.

Tratto	pendenza media
sorgente - confluenza Lumiei	2.40 %
confluenza Lumiei - confluenza Degano	0.70 %
confluenza Degano - confluenza But	0.70 %
confluenza But - confluenza Fella	0.56 %
confluenza Fella - confluenza Arzino	0.40 %
confluenza Arzino - confluenza Cosa	0.30 %

Tabella 1: Pendenze medie del Tagliamento nei diversi tratti del corso.

2.2 Problematiche del Tagliamento

Le principali problematiche del Tagliamento riguardano due aspetti principali:

- variabilità del regime idraulico;
- qualità delle acque.

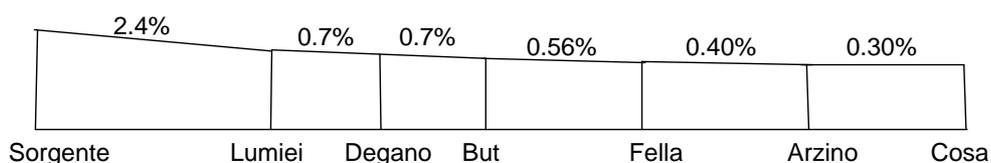


Figura 3: Pendenze del Tagliamento.

Per analizzare correttamente il problema della variabilità del regime idraulico nel bacino del Tagliamento bisogna fare riferimento alle due condizioni estreme di alta e bassa portata.

Gli eventi di piena sono favoriti dalla pendenza media del bacino piuttosto elevata e dall'alta piovosità dei luoghi. La piovosità media registrata è di circa 2,013 millimetri, con punte fino a 3,600 millimetri nella zona dei monti Musi, a nord-est di Gemona. L'afflusso meteorico medio in un anno è di 4.7 miliardi di m^3 che, al netto delle perdite per infiltrazione ed evaporazione (25% del totale), determina una portata media annua di $92.5 m^3/s$ alla stretta di Pinzano e di $70 m^3/s$ alla foce. La differenza tra i due valori va imputata alle perdite per infiltrazione che il fiume subisce nell'alta pianura. Il dato sulla portata media è comunque poco indicativo poiché il Tagliamento è un fiume a spiccato regime torrentizio: le sue portate non sono mai costanti, poiché dipendono direttamente dall'andamento delle precipitazioni che interessano il bacino. La pendenza dei versanti fa sì che il tempo di risposta del bacino in condizioni di saturazione alle precipitazioni sia inferiore alle 12 ore, dando luogo a eventi di piena particolarmente rapidi e difficili da controllare.

Durante l'anno si alternano periodi di magra, in cui la portata è inferiore ai $20 m^3/s$, a periodi di piena in cui le portate sono molto maggiori. Le piene maggiori, strettamente legate agli eventi climatici del bacino, si concentrano tra aprile e maggio e ottobre e novembre. Nel passato relativamente recente, si sono verificate piene eccezionali dell'ordine di $4000 - 4500 m^3/s$. Una delle massime piene storicamente documentate fu registrata nel novembre del 1966 ($4000 m^3/s$).

Il rischio idraulico legato al regime di piena riguarda sia l'area montana, per le erosioni d'alveo e le frane, sia il tratto inferiore, da Latisana al mare, dove la portata massima che può fluire senza esondazioni è sensibilmente inferiore a quella che può arrivare da monte. In occasione della piena del 4 novembre 1966, il fiume ruppe gli argini lungo l'intera asta fluviale da Venzone alla foce, facendo 4 vittime a Latisana.

Numerose soluzioni sono state vagliate dagli organi competenti negli ultimi 30 anni per la riduzione del rischio idraulico. Tra le soluzioni proposte ricordiamo: (i) la ristrutturazione, la sistemazione ed l'impermeabilizzazione degli argini di destra e sinistra del Tagliamento a monte e a valle di Latisana; (ii) la sistemazione del canale Cavrato (un canale scolmatore che dovrebbe convogliare parte dell'acqua del Tagliamento da monte dell'abitato di Cesarolo, in comune di Latisana, al mare nei pressi della laguna di Caorle, se la portata raggiunge un determinato livello di guardia) per permettergli di smaltire un'onda di piena di circa $4500 m^3/s$; (iii) la proposta di costruzione di casse di espansione nella zona di Pinzano per attenuare l'onda di piena [<http://www.tesoro.it>; <http://www.pensemaraevee.it>].

Il problema complementare è quello della portata d'acqua estremamente ridotta in alcuni tratti dell'alveo fluviale soprattutto durante la stagione estiva. Nel dicembre 2001, l'Autorità di Bacino ha deliberato misure di salvaguardia finalizzate alla definizione della portata di rispetto, cioè la portata nel bacino che corrisponde alle condizioni di minimo deflusso vitale. Quando la portata del fiume è inferiore a questo valore soglia, derivazioni o prelievi della risorsa idrica devono essere ridotti o annullati per non minacciare la sopravvivenza dell'habitat naturale [<http://adbve.it>]. Il controllo delle captazioni in modo da garantire le condizioni di deflusso minimo presuppone una assegnazione dinamica delle concessioni per le derivazioni ai fini idroelettrici e per il prelievo a scopo irriguo. Attualmente sono ancora in fase di studio da parte dell'Autorità di Bacino i criteri che dovrebbero essere utilizzati a questo scopo.

La qualità delle acque è l'ultimo aspetto che rappresenta una possibile criticità ambientale per il Tagliamento. La qualità delle acque diventa spesso critica in periodi di bassa portata del fiume, quando la capacità di autodepurazione del Tagliamento risulta inibita dalle condizioni di flusso. Recentemente si sono anche verificati alcuni episodi di inquinamento acuto legati alla presenza di alcuni insediamenti

industriali che prelevano le acque del fiume per la loro produzione, restituendola a valle del processo produttivo. L'episodio più grave è del 1997, quando si è verificato un episodio di inquinamento acuto da cloro, dovuto alla presenza della cartiera di Tolmezzo. La stessa cartiera e il sistema di depurazione comunale di Tolmezzo sono stati di recente oggetto di interventi giudiziari.

La qualità delle acque del Tagliamento è molto variabile lungo l'asta fluviale. È buona nel tratto montano, a monte di Tolmezzo, dove comunque la portata risulta estremamente ridotta a causa delle derivazioni per fini idroelettrici. A valle di Tolmezzo e della sua zona industriale la situazione diventa critica a causa dell'apporto inquinante del depuratore comunale che non riesce ad essere smaltito dalla portata relativamente esigua del corso (data solamente dal torrente But).

La situazione migliora con l'apporto del Fella, per poi peggiorare nuovamente a valle del prelievo del canale Ledra-Tagliamento, dove la portata del corso si riduce nuovamente [Stoch et al., 1995; <http://www.pensemaraevee.it>].

3 Contesto normativo per la gestione integrata delle risorse idriche

L'evoluzione del quadro normativo di riferimento per quanto riguarda la gestione delle risorse idriche del fiume Tagliamento può essere riassunto dalle seguenti leggi:

1. Legge n. 319 del 10 maggio 1976 - Legge MERLI (Norme per la tutela delle acque dall'inquinamento - limiti delle concentrazioni allo scarico);
2. legge 18 maggio 1989 n. 183 Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo (art.1: La presente legge ha lo scopo di assicurare la difesa del suolo, il risanamento delle acque, la fruizione e la gestione del patrimonio idrico per gli usi di razionale sviluppo economico e sociale, la tutela degli aspetti ambientali ad essi connessi);
3. Decreto Legislativo n. 36 del 5 gennaio 1994 - Disposizioni in materia di risorse idriche (Uso integrato delle risorse);
4. Delibera n. 1 del Comitato Istituzionale, Seduta del 10.02.1997 (Adozione del progetto di piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso);
5. Delibera n. 1 del Comitato Istituzionale, Seduta del 15.04.1998 (Adozione del piano stralcio per la sicurezza idraulica del medio e basso corso);
6. Decreto Legislativo n. 152 del 11 maggio 1999 - Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/Cee concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/Cee relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole (capacità di autodepurazione del corpo idrico - definizione di deflusso minimo vitale).
7. Delibera n. 7 del Comitato Istituzionale, Seduta del 18.12.2001; (Adozione di misure di salvaguardia finalizzate alla definizione della portata di rispetto – deflusso minimo vitale);

Una analisi dettagliata della Normativa è al di là degli scopi di questo progetto. Quello che interessa sottolineare è l'evoluzione della legislazione che, in conformità con le Direttive Europee, è passata da una visione di settore, orientata alla soluzione di un problema specifico, (p.es. fissare limiti di concentrazione allo scarico per i diversi tipi di inquinante per garantire la qualità delle acque, Legge Merli) ad una visione integrata. Nell'ottica di una gestione ambientale delle risorse naturali, problemi diversi (rischio idraulico, qualità delle acque) diventano aspetti di un unico problema di gestione. Anche l'orizzonte temporale di interesse per il legislatore si dilata. Gli interventi relativi alla gestione delle acque e del territorio vanno valutati nell'ottica di lungo periodo, tenendo conto degli effetti a lunga scadenza sul sistema ambientale. Gli attuali obiettivi della tutela delle acque (superficiali, marine e sotterranee) comprendono:

1. prevenire e ridurre l'inquinamento e attuare il risanamento dei corpi idrici inquinati;
2. conseguire il miglioramento dello stato delle acque ed adeguate protezioni di quelle destinate a particolari usi;

3. perseguire usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche, con priorità per quelle potabili;
4. mantenere la capacità naturale di autodepurazione dei corpi idrici, nonché la capacità di sostenere comunità animali e vegetali ampie e ben diversificate.

Gli strumenti necessari per il raggiungimento di questi obiettivi sono:

1. individuazione di obiettivi di qualità ambientale e per specifica destinazione dei corpi idrici;
2. tutela integrata degli aspetti qualitativi e quantitativi nell'ambito di ciascun bacino idrografico ed un adeguato sistema di controlli e di sanzioni;
3. rispetto dei valori limite agli scarichi fissati dallo Stato, nonché la definizione di valori limite in relazione agli obiettivi di qualità del corpo recettore;
4. l'adeguamento dei sistemi di fognatura, collettamento e depurazione degli scarichi idrici, nell'ambito del servizio idrico integrato di cui alla legge 5 gennaio 1994, n. 36;
5. l'individuazione di misure per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento nelle zone vulnerabili e nelle aree sensibili;
6. l'individuazione di misure tese alla conservazione, al risparmio, al riutilizzo ed al riciclo delle risorse idriche.

Per il fiume Tagliamento, gli obiettivi della gestione integrata delle risorse (D.Lgs. 11 maggio 1999 n.152) possono essere riassunti in quattro punti:

1. conseguimento della sicurezza idraulica del territorio;
2. corretto uso della risorsa idrica;
3. difesa delle acque dall'inquinamento;
4. tutela dell'ecosistema.

La valorizzazione e la conservazione delle risorse idriche non è un compito di semplice attuazione. Lo stato idraulico e la qualità delle acque di un bacino sono il risultato di un complesso equilibrio tra fattori naturali (entità degli afflussi, capacità di autodepurazione del corso) e pressione antropica (entità delle derivazioni, carico inquinante degli scarichi). La modellistica ambientale è di notevole aiuto in questo settore. I modelli idraulici e di qualità richiedono una riduzione sistematica della complessità del sistema fisico e consentono di razionalizzare le relazioni tra i diversi fattori in gioco. Una volta verificate le capacità di modellazione, i modelli ambientali sono strumenti utili per verificare gli effetti di possibili alternative di gestione.

In questo progetto vengono illustrate due applicazioni dimostrative di modellistica ambientale per la parte montana del bacino del Tagliamento. Sulla base dei dati raccolti presso le competenti Autorità (Ufficio Idrografico e Mareografico dell'Autorità di bacino del Tagliamento, Ufficio del Genio Civile, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, Provincia di Udine) sono stati sviluppati:

1. un modello che permette di valutare l'impatto degli scarichi inquinanti nella zona compresa tra Tolmezzo e Peonis;
2. un modello che permette di prevedere il deflusso a Venzone sulla base dei dati pluviometrici raccolti sul bacino.

Questi modelli, implementati su scala di bacino, potrebbero diventare utile supporto per la gestione delle risorse idriche.

4 Raccolta dati

4.1 Fonti

Numerosi Uffici si occupano a vario titolo della gestione delle risorse idriche. Gli Uffici che sono stati contattati nel corso di questo progetto per reperire i dati necessari alla ricerca sono di seguito elencati.

1. Genio Civile di Udine
Ha fornito rilievi delle sezioni del Tagliamento e del But, cartine particolareggiate del fiume, relazioni delle concessioni ENEL per le derivazioni dell'alto Tagliamento e pendenze del bacino nei vari tratti.
2. Istituto Idrografico e Mareografico, Magistrato delle Acque, Sezione di Udine.
Ha provveduto a fornire misure di portata e di altezza idrometrica in specifici punti del fiume e dei suoi affluenti. Per l'implementazione del modello di previsione dei deflussi, ha fornito i dati pluviometrici e idrometrici relativi agli eventi di piena significativi degli ultimi venti anni.
3. Agenzia Regionale della Protezione Ambientale - ARPA (sedi di Udine e Palmanova)
Ha fornito misure mensili dei parametri di qualità monitorati per gli anni 2000 - 2001 - 2002 per una decina di stazioni di rilevamento. Ha fornito informazioni relative alla localizzazione dei principali effluenti (scarichi fognari e industriali, depuratori) che incidono sul Tagliamento.
4. Ufficio Regionale Servizio Tutela dagli Inquinanti, Direzione Generale dell'ambiente (sede di Trieste)
Ha fornito misure mensili di alcuni parametri monitorati di qualità delle acque per gli anni dal 1990 al 1999 per sei stazioni lungo l'asta fluviale.
5. Ufficio Ambiente ed Autorizzazioni allo scarico, Provincia di Udine
Ha fornito informazioni per localizzare e valutare il contributo di scarichi fognari civili, scarichi industriali e depuratori.

4.2 Dati pluviometrici, portate e altezze idrometriche

I dati pluviometrici, idrometrici e le misure di portata sono fondamentali per poter implementare modelli per la gestione delle risorse idriche. In particolare, dati pluviometrici e dati idrometrici acquisiti in contemporanea sono essenziali per implementare modelli di trasformazione afflussi/deflussi che possono essere impiegati per la previsione delle piene. Dati idrometrici e misure di portata, accoppiati a contemporanee campagne di monitoraggio della qualità delle acque, sono cruciali invece per la calibrazione di modelli di trasporto, dispersione e trasformazione degli inquinanti.

Sul Tagliamento esistono una quarantina pluviometri, e una decina di idrografi (fonte Autorità di Bacino). Dal 1996 è anche in funzione un sistema telemetrico per l'acquisizione in tempo reale di dati pluviometrici e idrometrici. Inoltre, l'Osservatorio Meteorologico Regionale gestisce 2 radar meteo in grado di fornire misura della quantità d'acqua precipitabile che vengono abitualmente utilizzati per le previsioni del tempo.

Queste attrezzature rendono potenzialmente disponibili dati pluviometrici al suolo, previsioni sulla quantità di acqua precipitabile e variazioni di livello del fiume in alcuni punti del suo percorso. Sulla base di simili dati raccolti per il bacino del fiume Arno sono stati recentemente realizzati modelli basati su reti neurali per la previsione del deflusso sia in condizioni di alta che di bassa portata (vedi Campolo et al., 2003, Campolo et al., 1999).

Per le applicazioni dimostrative messe a punto nell'ambito di questo progetto, non è stato possibile utilizzare questi dati in modo esteso. Per sviluppare il modello afflussi deflussi sono stati utilizzati dati relativi ai soli eventi di piena del periodo Per sviluppare il modello di qualità, sono stati acquisiti dati puntuali di livello idrometrico, da cui sono state stimate le portate attraverso curve di deflusso (vedi Figura 4).

Nel caso specifico del Tagliamento le stazioni di misura per cui sono disponibili curve di deflusso sono situate a Venzone e a Pioverno. In entrambe le zone, il letto del fiume è sassoso e viene continuamente rimodellato dagli eventi di piena. Le misure concomitanti di portata ed altezza idrometrica da cui

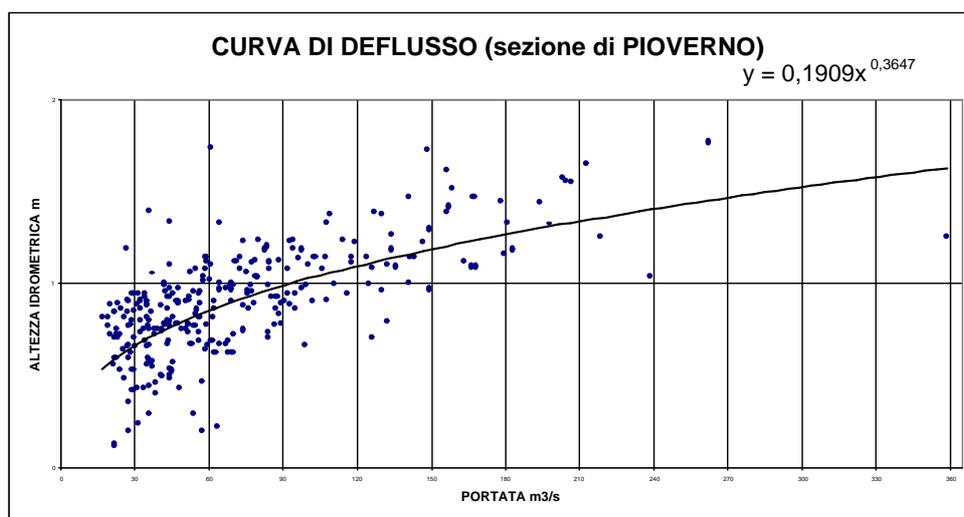


Figura 4: Altezza idrometrica in funzione della portata per la sezione di Pioverno

vengono costruite le scale di deflusso non vengono purtroppo aggiornate con la regolarità che sarebbe necessaria per un fiume a regime quasi torrentizio.

La possibilità di utilizzare i dati telemetrici e lo sviluppo di sinergie con gli uffici dell'ARPA deputati al monitoraggio dei parametri di qualità delle acque sono passi fondamentali per aumentare le possibilità di implementazione di modelli ambientali sul bacino del Tagliamento. Da un lato, l'accesso ai dati telemetrici permetterebbe di aggiornare il modello a reti neurali già sviluppato sulla base dei dati dal 1976 al 1996 per tener conto dei cambiamenti climatici degli ultimi anni che hanno determinato l'intensificarsi degli eventi di piena. Dall'altro lato, l'attivazione di sinergie con l'ARPA permetterebbe di pianificare e realizzare una serie di campagne di monitoraggio finalizzate alla taratura di modelli di qualità delle acque.

Inoltre, data la presenza di derivazioni artificiali, sarebbe opportuno individuare possibilità per il monitoraggio delle acque elaborate dagli invasi in modo da poter tener conto del loro contributo nelle modellazione (vedi Campolo et al., 1999).

4.3 Scarichi

Dall'entrata in vigore del D.Lgs. 11 maggio 1999 n. 152, la Provincia di Udine e l'ARPA Friuli Venezia Giulia si sono impegnate per la realizzazione di un censimento completo delle fonti inquinanti che incidono con il loro carico alla qualità delle acque del fiume Tagliamento [<http://www.tesoro.it>]. A tutt'oggi, il censimento non può considerarsi completo per l'esistenza di numerose immissioni di piccola entità che devono essere ancora valutate.

Per questo progetto, si è deciso di utilizzare per l'applicazione dimostrativa i dati relativi al depuratore comunale di Tolmezzo che riversa nel fiume circa $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ di acqua, derivante dalle fogne della cittadina carnica e dal depuratore consortile (il quale convoglia tutte le acque di scarico delle industrie di Tolmezzo ed in particolare quelle della Cartiera Burgo). A partire dal febbraio 2002, queste misure sono state fatte ad intervalli molto frequenti (in alcuni mesi, anche giornalmente).

4.4 Impatto antropico

In assenza di dati dettagliati relativi alle fonti che potrebbero aumentare il livello di inquinamento lungo il Tagliamento, si è deciso di valutare la tipologia e l'entità degli insediamenti produttivi presenti sul territorio ed il numero di abitanti dei centri urbani che si affacciano sul corso del fiume. I dati relativi all'impatto antropico sono stati riassunti in Figura 5 e Figura 6.

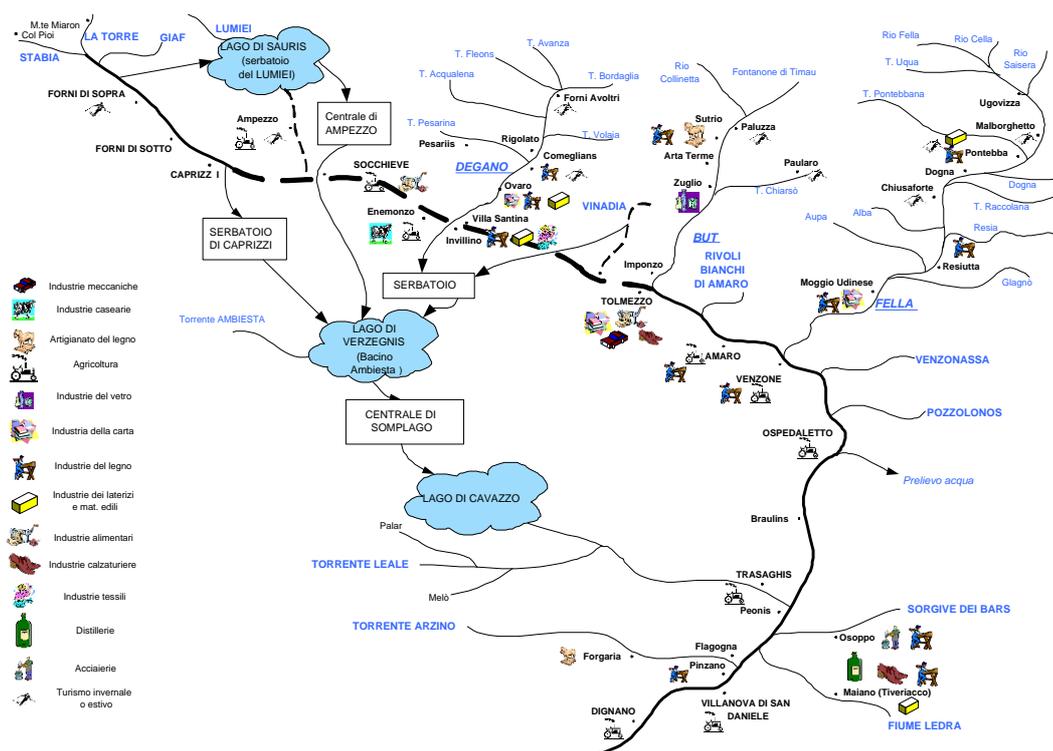


Figura 5: Bacino idrografico dell'alto Tagliamento. Sono rappresentate con simboli le diverse tipologie di industrie presenti sul territorio adiacente al fiume

I principali centri urbani nel bacino montano del Tagliamento e dei suoi affluenti sono indicati in Tabella 2. Il numero di abitanti è stato utilizzato per stimare il carico inquinante corrispondente.

Comune	Numero di abitanti
Tolmezzo	10585
Paularo	2922
Paluzza	2651
Venzone	2306
Ovaro	2264
Arta Terme	2228
Villa Santina	2184
Sutrio	1401

Tabella 2: Principali centri urbani del bacino del Tagliamento e dei suoi affluenti

Gli insediamenti urbani e gli insediamenti industriali determinano la quasi totalità del carico inquinante incidente sulla qualità delle acque del fiume [http://www.ud.camcom.it; http://www.digilander.libero.it]. Le attività produttive più diffuse sul territorio sono:

- lavorazione ed artigianato del legno
Incide sulla quantità di cloruri presenti nelle acque del fiume per la presenza di questa sostanza nelle vernici, nei solventi e nei leganti utilizzati nell'industria mobiliera.
- industria cartaria
Incide sulla quantità di BOD e ossigeno disciolto e, per il notevole utilizzo di acqua di raffreddamento, sulla temperatura.
- agricoltura

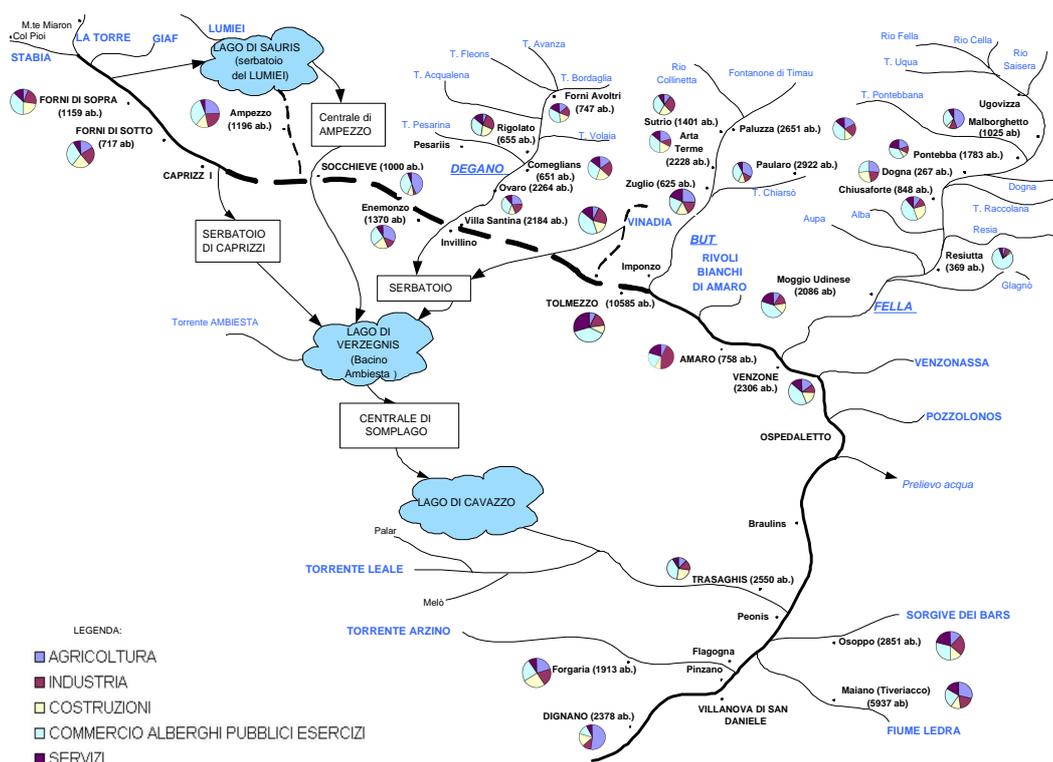


Figura 6: Bacino idrografico dell'alto Tagliamento. Sono rappresentati quantitativamente le attività produttive presenti sul territorio adiacente al fiume ed il numero di abitanti dei centri più importanti

Può avere effetti sul livello di eutrofizzazione delle acque per il rilascio di composti azotati e dei fosfati presenti nei fertilizzanti e nei diserbanti.

Per quanto riguarda i due principali affluenti del Tagliamento, la zona attraversata dal But è caratterizzata da attività di lavorazione del legno (artigianato e mobilifici della zona di Sutrio) mentre la zona attraversata dal Fella è caratterizzata dalla produzione della carta (zona di Moggio Udinese) e dalla lavorazione del legno (zone di Resiutta, Pontebba e Moggio Udinese).

La zona industriale di Tolmezzo, che è il principale centro della Carnia, accoglie una importante cartiera (cartiera Burgo), industrie alimentari, meccaniche e calzaturiere. In molte zone del bacino montano sono presenti anche insediamenti agricoli che incidono sensibilmente sulla qualità delle acque.

5 Stato del bacino

5.1 Punti monitorati: qualità delle acque

In conformità a quanto richiesto dal D.Lgs. 11 maggio 1999 n.152, il monitoraggio sistematico della qualità delle acque è una attività essenziale per il raggiungimento degli obiettivi di qualità.

La qualità delle acque del bacino del Tagliamento viene mensilmente monitorata in alcuni punti specifici del corso. Per gli scopi di questo progetto, sono state prese in considerazione le misure disponibili presso l'ARPA effettuate in corrispondenza dei seguenti punti:

- sorgente (comune di Forni di Sopra);
- località Caneva, comune di Tolmezzo (100 m a monte della confluenza con il torrente But);

- località Ponte Avons, comune di Tolmezzo (500 m a valle della confluenza con il torrente But, a monte la cartiera);
- comune di Amaro (casello ferroviario al *km* 6 della SS 52);
- località Ospedaletto, comune di Gemona del Friuli (punto di presa del Consorzio Ledra - Tagliamento);
- comune di San Daniele del Friuli (all'altezza del Ponte Cimano);
- comune di Ragogna (all'altezza del ponte di Pinzano);
- comune di Varmo (all'altezza del ponte di Madrisio);
- comune di Latisana (all'altezza del ponte ferroviario).

Sono state anche acquisite le misure dei parametri di qualità effettuate per i principali affluenti in alcuni mesi dell'anno, che riguardano

- Torrente But, località Caneva, comune di Tolmezzo (100 m a monte della confluenza con il Tagliamento);
- Fiume Fella, località Carnia, comune di Venzone (all'altezza del ponte della SS 52);
- Torrente Venzonassa, comune di Venzone (500 m a monte SS);
- Fiume Ledra, comune di San Daniele del Friuli (all'altezza del ponte Cimano).

I dati monitorati comprendono parametri chimici e biologici. Da qualche anno, per caratterizzare la qualità delle acque, viene sistematicamente utilizzato anche l'indice biotico esteso (IBE). La composizione della comunità di micro-invertebrati è infatti un indice indiretto di qualità delle acque, anche se non è ancora del tutto chiaro come informazioni di questo tipo possano essere estese a bacini diversi, spesso caratterizzati da comunità di micro-invertebrati specifiche.

Sulla base dei dati monitorati con cadenza mensile a partire dal 1990 e fino al 2002 nelle stazioni di misura prima identificate, è stato possibile ricostruire l'evoluzione del livello di qualità delle acque per il Bacino. In particolare, è stata analizzata l'evoluzione temporale dell'andamento lungo l'asta fluviale (dalla sorgente alla foce) dei seguenti parametri:

- temperatura dell'acqua;
- domanda biochimica di ossigeno (BOD);
- ossigeno disciolto (DO dissolved oxygen);
- solidi sospesi;
- cloruri;
- solfati.

Si è cercato di interpretare i dati tenendo conto della configurazione naturale del bacino, della pressione antropica (collocazione degli insediamenti civili e industriali) e dell'effetto che condizioni di variabilità della corrente hanno sulla capacità del fiume di degradare e disperdere le sostanze organiche e inquinanti [Soldati et al., 2001a, 2001b].

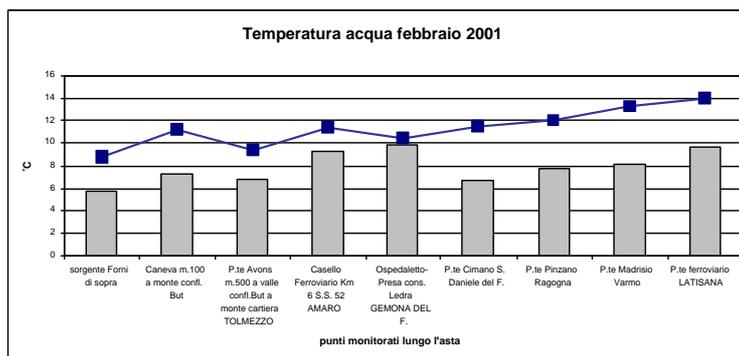


Figura 7: Variazione media della temperatura dell'acqua lungo il corso del Tagliamento per gli anni 1990 – 2002 (linea) e variazione misurata a Febbraio del 2001 (istogramma)

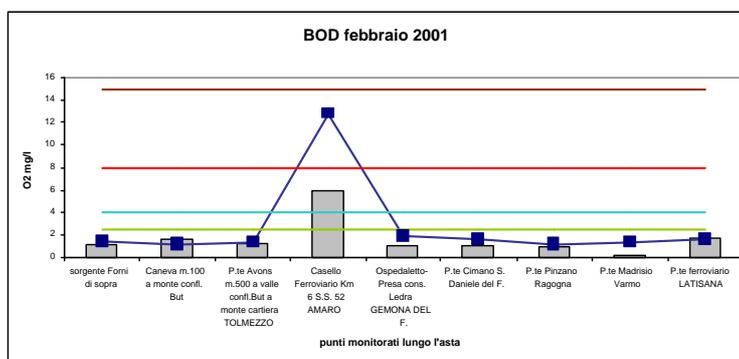


Figura 8: Andamento medio del BOD per gli anni 1990–2002 confrontato con l'andamento del BOD a Febbraio 2001 (istogramma). Le linee orizzontali colorate rappresentano i valori di concentrazione utilizzati per identificare il livello di qualità delle acque secondo il D.Lgs. 11 maggio 1999 n.152

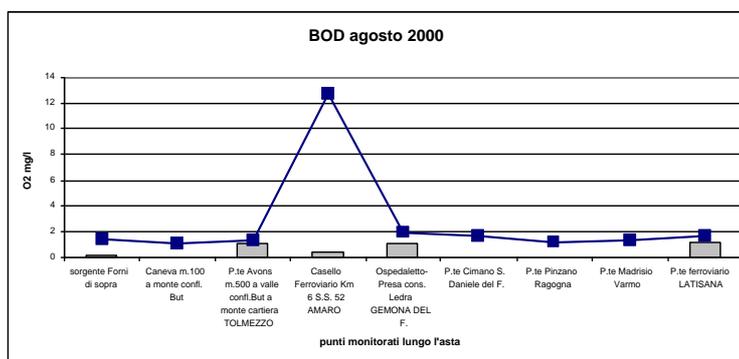


Figura 9: Andamento medio del BOD per gli anni 1990 – 2002 confrontato con l'andamento del BOD ad Agosto 2000 (istogramma). Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

5.2 Temperatura dell'acqua

Le variazioni di temperatura dell'acqua nel bacino del Tagliamento sono abbastanza contenute nell'arco dell'anno e rimangono abbastanza costanti negli anni considerati. La variazione di temperatura lungo l'asta del fiume è rappresentata dagli istogrammi in figura 7 insieme con la variazione media calcolata per il periodo considerato.

Dal grafico si osserva che, dalla sorgente a Caneva, circa 100 m a monte della confluenza con il torrente But, la temperatura dell'acqua aumenta. Da Caneva a valle della confluenza con il But, la temperatura invece diminuisce perchè tale torrente convoglia nel Tagliamento acque più fredde di quelle del corso principale.

In corrispondenza del casello ferroviario di Amaro si nota un incremento considerevole di temperatura, attribuibile al fatto che ci troviamo a valle dell'abitato di Tolmezzo e della sua zona industriale che scaricano nel bacino acque civili e industriali a temperatura maggiore di quella di captazione.

Da Ospedaletto a San Daniele del Friuli si nota di nuovo un diminuzione di temperatura. In questo tratto, il consorzio Ledra - Tagliamento devia un'ingente quantitativo di acqua nei canali di irrigazione, e lo scambio termico tra corpo idrico e atmosfera risulta modificato. In corrispondenza dell'ultimo tratto monitorato, da Ragogna alla foce, si nota nuovamente un aumento della temperatura.

5.3 Domanda biochimica di ossigeno

La domanda biochimica di ossigeno, BOD (Biochemical oxygen demand) misura la concentrazione di sostanze organiche che consumano l'ossigeno presente nell'acqua per la loro degradazione.

In generale, dai dati a disposizione si osserva un andamento del tipo rappresentato in figura 8.

Dall'analisi dei dati si nota un picco nella concentrazione del BOD in corrispondenza alla stazione di rilevamento di Amaro (casello ferroviario). Questa stazione si trova a valle dell'abitato di Tolmezzo e della sua zona industriale che hanno un impatto notevole sulla qualità delle acque del fiume.

L'analisi dei dati mette in evidenza alcune eccezioni a questa tendenza, in particolare nei mesi di agosto in cui l'andamento delle concentrazioni è quello rappresentato in figura 9. I valori di BOD all'altezza del casello ferroviario di Amaro sono, in generale, molto più bassi rispetto a quelli registrati durante tutto l'arco dell'anno. L'ipotesi più plausibile per spiegare questa tendenza è legata alla chiusura estiva (in agosto) delle fabbriche della zona industriale di Tolmezzo, che si riflette in una drastica diminuzione degli scarichi e delle sostanze organiche che assorbono ossigeno per la loro decomposizione.

L'analisi dei dati ha messo in evidenza anche valori particolarmente alti di BOD ad Amaro nei periodi di gennaio e febbraio 1992, aprile e luglio 1993 e novembre 1997 (si veda la figura 10 come esempio).

Episodi di alta concentrazione di BOD sono estremamente ridotti in tempi recenti, e questo permette di ipotizzare che siano state intraprese azioni specifiche negli ultimi anni per cercare di ridurre il fenomeno. Ad esempio, nel 1994 è entrato in funzione il depuratore consortile che ha portato le acque ad una qualità visibilmente migliore.

5.4 Ossigeno Disciolto

Il livello di ossigeno disciolto, che si misura in mg/l , misura la concentrazione di ossigeno nella corrente. La corrente si arricchisce di ossigeno attraverso i processi di reazione atmosferica e la fotosintesi, mentre ossigeno viene consumato per la degradazione delle sostanze organiche. Al fine di non creare problemi alla fauna ittica il livello di ossigeno disciolto deve mantenersi superiore a $4 \div 5 mg/l$. Per il Tagliamento, l'andamento dell'ossigeno disciolto dalla sorgente alla foce è rappresentato in figura 11. Si nota che l'ossigeno disciolto diminuisce nei punti in cui il BOD è alto.

In generale, il livello di DO è abbastanza elevato per l'intera asta fluviale, anche se non mancano eccezioni che si verificano in corrispondenza dei periodi in cui si registrano picchi nel BOD (come esempio si veda la figura 12).

Situazioni di questo tipo si sono verificate nel mese di febbraio 2002 (figura 13), quando l'ossigeno disciolto è risultato pari a $4.8 mg/l$ all'altezza del casello ferroviario di Amaro, e nel mese di Novembre 1997 (figura 14), quando l'ossigeno disciolto è risultato pari a $2.9 mg/l$ ad Amaro.

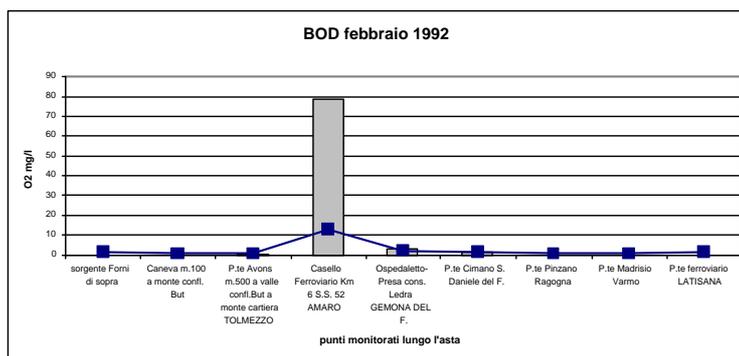


Figura 10: Andamento medio del BOD per gli anni 1990 – 2002 confrontato con l’andamento del BOD a Febbraio 1992 (istogramma) quando si registrò un picco alla stazione di rilevamento di Amaro pari a $79 O_2mg/l$. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

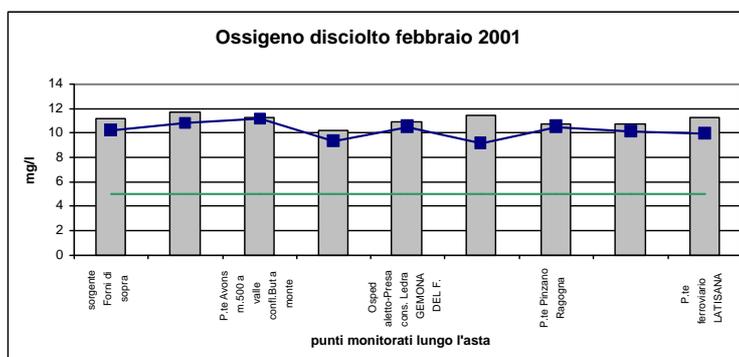


Figura 11: Andamento medio dell’ossigeno disciolto per gli anni 1990–2002 confrontato con l’andamento dell’ossigeno disciolto a Febbraio 2001 (istogramma). La linea orizzontale verde rappresenta il livello di ossigeno disciolto necessario per evitare problemi alla fauna ittica

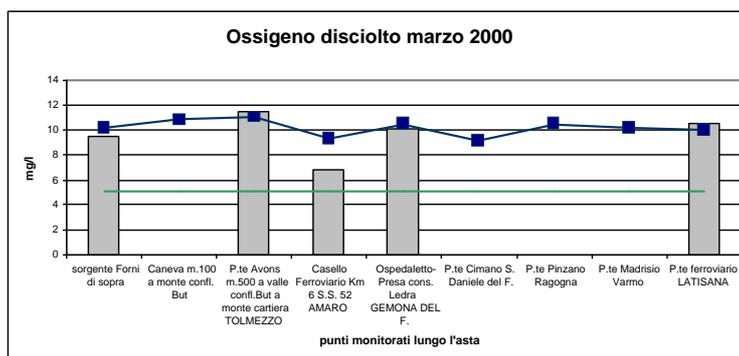


Figura 12: Andamento medio dell’ossigeno disciolto per gli anni 1990 – 2002 confrontato con l’andamento dell’ossigeno disciolto a Marzo 2000 (istogramma) dove si riscontra una valore pari a $6.8 mg/l$ ad Amaro (lo stesso andamento vale per i mesi di febbraio 1990, novembre 1995 e gennaio 2002). La linea orizzontale verde rappresenta il livello di ossigeno disciolto necessario per evitare problemi alla fauna ittica

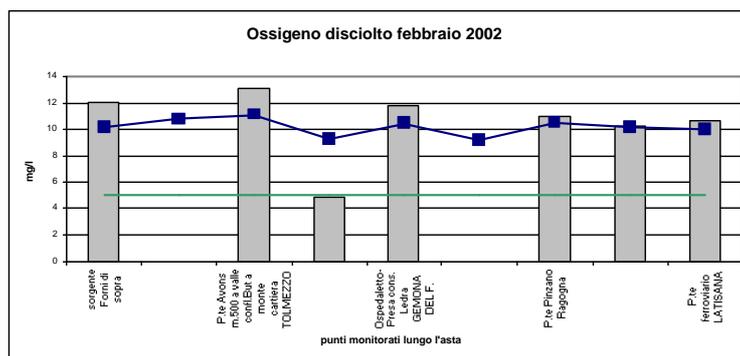


Figura 13: Andamento medio dell'ossigeno disciolto per gli anni 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dell'ossigeno disciolto a Febbraio 2002 (istogramma). La linea orizzontale verde rappresenta il livello di ossigeno disciolto necessario per evitare problemi alla fauna ittica. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

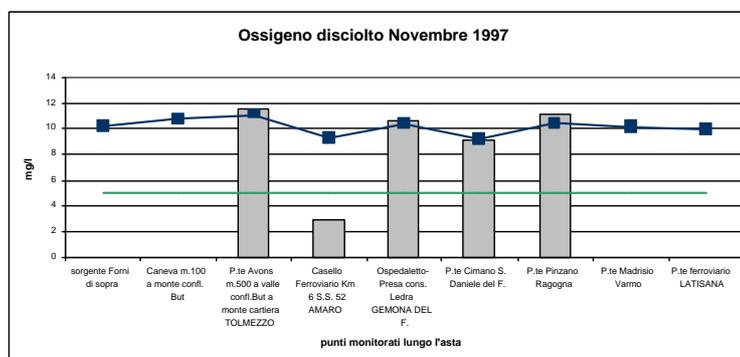


Figura 14: Andamento medio dell'ossigeno disciolto per gli anni 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dell'ossigeno disciolto a Novembre 1997 (istogramma). La linea orizzontale verde rappresenta il livello di ossigeno disciolto necessario per evitare problemi alla fauna ittica. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

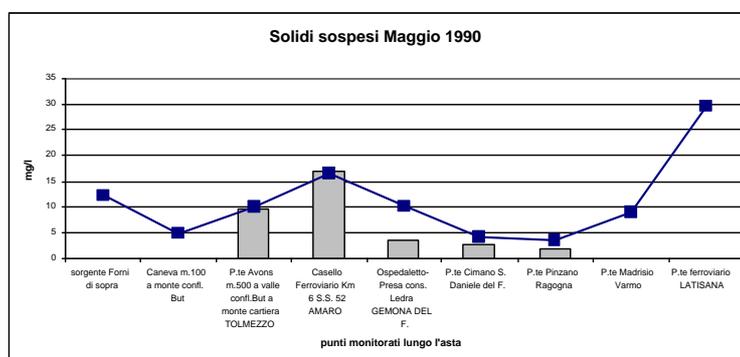


Figura 15: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi a maggio 1990 (istogramma). Il valore di riferimento è 0.1 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

5.5 Solidi sospesi

Il limite di riferimento per i solidi sospesi è di $0,1 \text{ mg/l}$. Dall'analisi dei dati raccolti, risulta che l'andamento lungo l'asta del Tagliamento per i solidi sospesi nel periodo dal 1990 al 1995 è quello mostrato in figura 15.

Negli anni successivi, l'entrata in funzione del depuratore consortile di Tolmezzo ha migliorato sensibilmente la situazione pur potendo ancora riscontrare dei picchi, in momenti diversi dell'anno, in corrispondenza di tutti i punti presi in esame (si veda come esempio significativo la figura 16 riguardante l'andamento per novembre 1997).

Da un'analisi più accurata appare particolarmente problematico il 2000 dove si registrano vari momenti critici (nei mesi di aprile, giugno, agosto, settembre, novembre e dicembre). Si vedano in particolare come esempi significativi le figure 17 e 18.

Durante gli anni 2001 e 2002, si sono verificati alcuni episodi di alta concentrazione in alcune stazioni di misura nei mesi di aprile 2001 (figura 19) e giugno 2002 (figura 20).

5.6 Cloruri

Il limite di riferimento dei cloruri è $0,02 \text{ mg/l}$. La variazione della concentrazione di cloruri lungo l'asta del Tagliamento è rappresentata in figura 21.

Le variazioni di concentrazione rispetto alla media sul periodo sono molto frequenti per questo parametro, in particolare a giugno e settembre 1990, aprile e agosto 1991, novembre e dicembre 1992, gennaio 1993 e dicembre 1995.

Dal grafico 22 si nota un picco di 32 mg/l in corrispondenza di Ponte Avons, 500 m a valle della confluenza con il But. L'aumento di concentrazione alla confluenza del But fa pensare ad un'alta concentrazione di cloruri nell'affluente dovuta agli insediamenti industriali lungo il suo corso (in particolare mobilifici ed industrie di lavorazione del legno).

Si registrano, poi, valori particolarmente alti in corrispondenza del casello ferroviario di Amaro nei mesi di febbraio 1992 e aprile 1993 (figura 23).

Esaminando l'andamento della concentrazione di cloruri negli anni, si nota che i valori misurati dal 2000 in poi risultano sensibilmente inferiori rispetto a quelli degli anni precedenti, a partire dalla stazione di misura di Amaro. Questa riduzione va attribuita ad una variazione delle fonti inquinanti. È stato possibile verificare che proprio nel 2001 la cartiera Burgo di Tolmezzo ha operato un cambiamento nel suo ciclo produttivo, dismettendo completamente l'utilizzo del cloro e determinando, in questo modo, una riduzione delle emissioni di composti organici clorurati nelle acque di scarico.

5.7 Solfati

L'analisi del profilo di concentrazione dei solfati lungo l'asta del Tagliamento deve tener conto della natura del territorio attraversato dal Tagliamento e dai suoi affluenti. Lumiei, Degano, But e la maggior parte degli altri affluenti di sinistra del Tagliamento scorrono infatti in zone ricche di formazioni gessose molto solubili che marcano con un'alta concentrazione di solfati le acque del bacino principale. Questi valori elevati di concentrazione sono rilevabili anche nella bassa e media pianura friulana.

Per questo motivo il valore limite di $0,02 \text{ mg/l}$ per la concentrazione dei solfati non può essere considerato come riferimento significativo per valutare la qualità delle acque.

Il profilo di concentrazione dei solfati è rappresentato dal grafico 24. Solo dal 2000 in poi sono disponibili i dati della sorgente, che in questo caso sono estremamente significativi per comprendere lo stato di qualità delle acque.

La massima concentrazione di solfati si ha in corrispondenza della sorgente. Tale concentrazione diminuisce verso valle per l'apporto di acque a minor tenore di solfati. Si osservano picchi notevoli di concentrazione a Forni di Sopra (anche 700 mg/l).

5.8 Conclusioni sull'analisi dei dati chimici

L'analisi dei dati storici di qualità delle acque per la parte montana del bacino del Tagliamento mette in evidenza che la parte più vulnerabile del bacino è quella tra la zona industriale di Tolmezzo e Venzone.

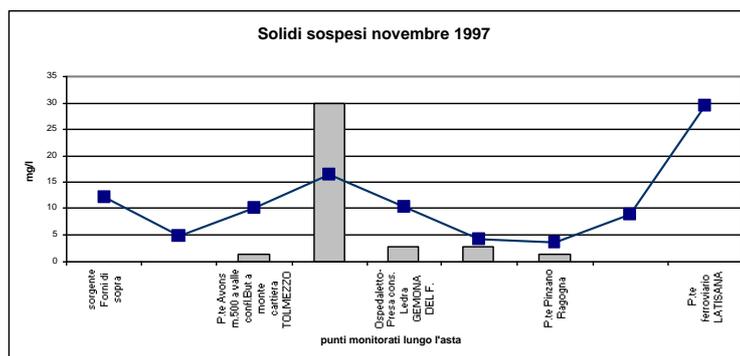


Figura 16: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi a novembre 1997 (istogramma) che presenta un picco di 30 *mg/l* ad Amaro. Il valore di riferimento è 0.1 *mg/l*. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

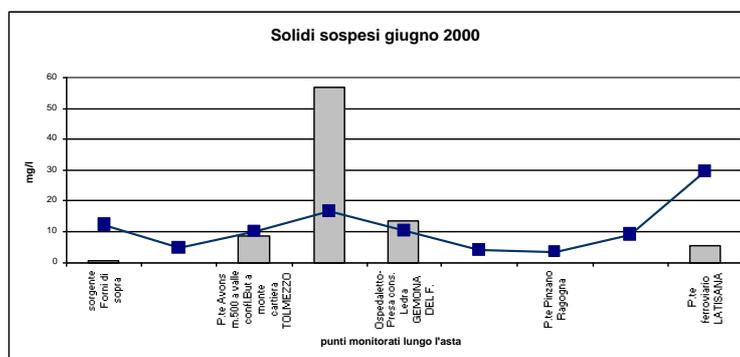


Figura 17: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi a giugno 2000 (istogramma) che presenta un picco di 57 *mg/l* ad Amaro. Il valore di riferimento è 0.1 *mg/l*. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

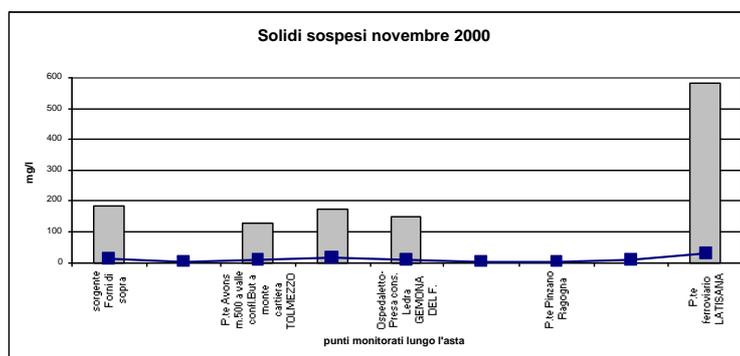


Figura 18: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi a novembre 2000 (istogramma) che presenta un picco di 583 *mg/l* in corrispondenza del ponte ferroviario di Latisana. Il valore di riferimento è 0.1 *mg/l*. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

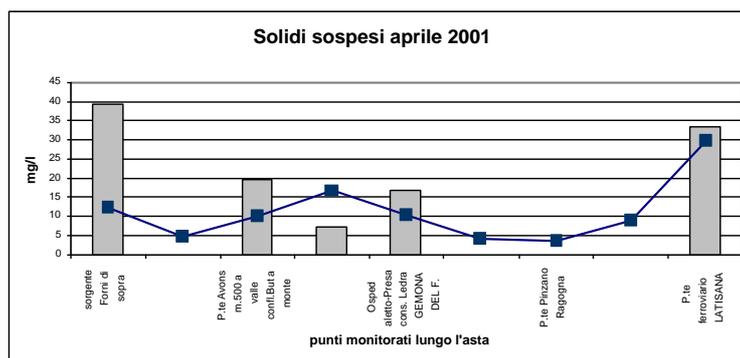


Figura 19: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi ad aprile 2001 (istogramma) che presenta un picco di 39.4 mg/l in corrispondenza della sorgente. Il valore di riferimento è 0.1 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

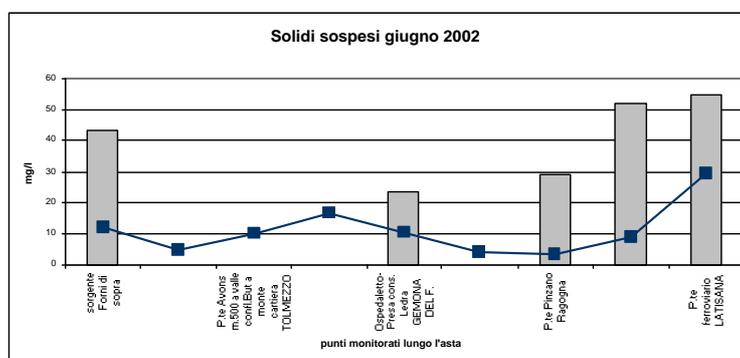


Figura 20: Andamento medio dei solidi sospesi 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solidi sospesi a giugno 2002 (istogramma). Il valore di riferimento è 0.1 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

I motivi di tale vulnerabilità sono molteplici: in questo tratto, la portata del fiume, pur ricevendo contributi significativi da parte del But e del Fella, non è sufficiente a smaltire il carico inquinante del depuratore comunale di Tolmezzo che convoglia gli scarichi della zona industriale e dell'abitato della cittadina carnica.

La ridotta portata del Tagliamento a Tolmezzo è diretta conseguenza delle derivazioni che esistono nella parte montana del bacino che fanno sì che gran parte dell'acqua del Tagliamento e dei suoi affluenti, a monte di Tolmezzo venga convogliata in invasi per l'alimentazione delle centrali idroelettriche (di Ampezzo e Somplago). Quest'acqua viene restituita al Tagliamento solamente ad Ospedaletto (comune di Gemona del Friuli), quando la fase più critica è stata ormai già superata.

Alla luce degli attuali criteri per la protezione delle acque, una revisione delle concessioni per le derivazioni per uso idroelettrico, potrebbe ristabilire condizioni di maggiore equilibrio ambientale anche per la zona di Tolmezzo.

In sintesi, dall'analisi dei parametri significativi si può affermare che:

- la stazione a valle dell'abitato di Tolmezzo e della sua zona industriale (casello ferroviario di Amaro Km 6 SS 52) è quella più critica in quanto presenta valori particolarmente alti per alcuni parametri di qualità delle acque;
- la concentrazione di solfati non può essere considerata un parametro chimico significativo per la

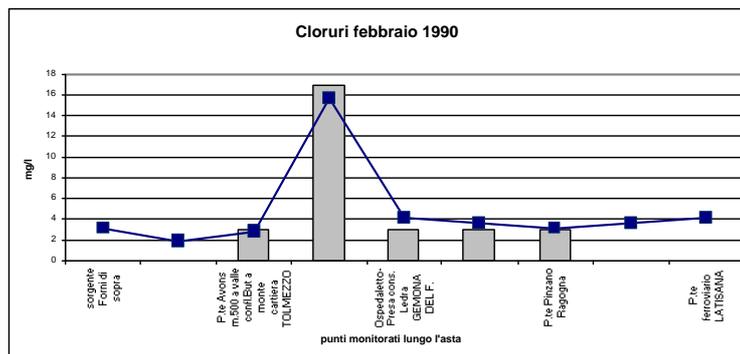


Figura 21: Andamento medio dei cloruri dal 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei cloruri a febbraio 1990 (istogramma). Il limite di riferimento è 0.02 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

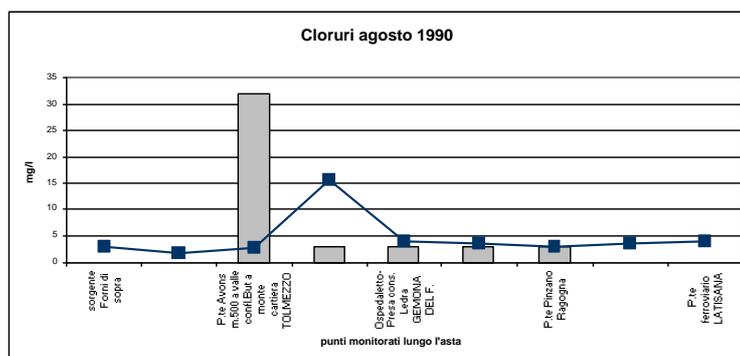


Figura 22: Andamento medio dei cloruri dal 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei cloruri ad agosto 1990 (istogramma). Il limite di riferimento è 0.02 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

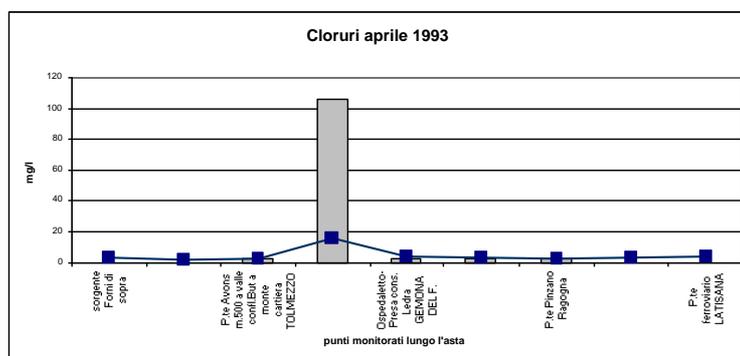


Figura 23: Andamento medio dei cloruri dal 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei cloruri ad aprile 1993 (istogramma). Il limite di riferimento è 0.02 mg/l. Le stazioni di rilevamento nelle quali non è presente la colonna grigia sono prive di dati per il mese in esame.

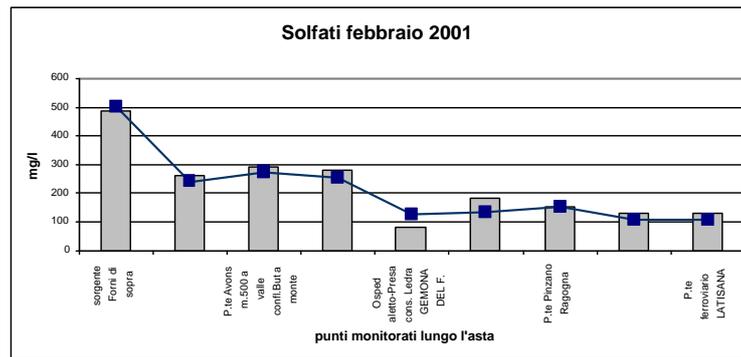


Figura 24: Andamento medio dei solfati dal 1990 – 2002 confrontato con l'andamento dei solfati a febbraio 2001 (istogramma). Il limite di riferimento è 0.02 mg/l.

caratterizzazione del livello di inquinamento, in quanto l'acqua del Tagliamento è caratterizzata da livelli elevati di concentrazione dei solfati già alla sorgente;

- alcuni parametri hanno subito notevoli variazioni del livello di concentrazione nel corso degli anni esaminati con un miglioramento sensibile del livello di qualità delle acque; questo fa pensare che stia aumentando la sensibilità ambientale nei confronti delle risorse idriche e del territorio.

Per gli scopi dimostrativi di questo progetto di ricerca, si è deciso di prendere in esame, per l'applicazione di modelli ambientali per la caratterizzazione della qualità delle acque, solo il tratto di fiume compreso tra Tolmezzo (all'altezza della confluenza con il But) e Peonis (subito a valle della confluenza Lago di Cavazzo - Torrente Leale). Questo tratto appare maggiormente vulnerabile dal punto di vista ambientale ma è anche quello più importante, per la presenza di insediamenti e centri urbani, per il bacino del Tagliamento (si veda la figura 1).

6 Modelli numerici per la gestione del bacino

Gli aspetti modellistici che sono stati presi in considerazione nell'ambito di questo progetto esplorativo sono due:

- la modellazione della propagazione del deflusso, del trasporto, dispersione e trasformazione delle specie chimiche lungo l'asta del fiume;
- la modellazione del processo di formazione del deflusso.

Per l'impossibilità di reperire dati adeguati sul bacino in esame, l'applicazione effettiva dei modelli è stata limitata solo ad alcuni aspetti di quelli inizialmente previsti. Si descrive di seguito il tipo di modelli sviluppati e come essi siano stati utilizzati nel caso del bacino montano del Tagliamento.

6.1 Modello idraulico e di qualità delle acque

Il trasporto dell'acqua lungo la rete idrica costituita da un fiume e dai suoi affluenti è descritto dalle equazioni conservazione della massa e della quantità di moto.

Con riferimento ad un tratto di corrente di lunghezza dx , l'equazione di conservazione della massa è data da:

$$\frac{\partial A(h)}{\partial t} = -\frac{\partial Q}{\partial x} + q_{ws} \quad (1)$$

dove x è la coordinata lungo corrente, A è la sezione dell'alveo, h è il livello dell'acqua rispetto al fondo, Q è la portata e q_{ws} è l'apporto positivo (immissione, scarico) o negativo (captazione, deviazione) per

unità di lunghezza alla portata del fiume nel tratto considerato. L'equazione di conservazione della quantità di moto è data da:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gAS_o - gAS_f - gA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

dove S_o è la pendenza del fondo, g è il vettore gravità, S_f è la pendenza di attrito, data da:

$$S_f = \frac{Q |Q| n^2}{A^2 \cdot R_h^{4/3}} \quad (3)$$

dove R_h è il raggio idraulico della sezione di flusso e n è il numero di Manning che tiene conto della rugosità superficiale dell'alveo attraverso un opportuno coefficiente di resistenza che dipende dalle caratteristiche del corso (vedi Tabella 3).

tipologia del bacino	valore della costante n
pulito e con andamento lineare	0.025 – 0.030
serpeggiante con laghetti e secche	0.033 – 0.040
meandreggiante e ricco di vegetazione	0.075 – 0.150

Tabella 3: Valori della costante di Manning al variare della tipologia di bacino fluviale naturale

Le equazioni 1 e 2 costituiscono un sistema di equazioni alle derivate parziali del primo ordine, non lineari nelle variabili h e Q . Per ogni tratto di fiume è infatti nota, data la forma della sezione dell'alveo, l'area della sezione di flusso per ogni altezza dell'acqua, $A(h)$, la pendenza del corso S_o , ed è possibile dare una stima del coefficiente di resistenza, n , a partire dalle caratteristiche del corso. Questo parametro è il principale parametro di taratura del modello idraulico.

Il sistema di equazioni, risolto numericamente a partire da condizioni iniziali e condizioni al contorno note, permette di ricostruire le variazioni di portata e di livello dell'acqua nei diversi punti del corso e al passare del tempo. I dati disponibili per il Tagliamento non sono sufficienti per poter tarare in modo soddisfacente le costanti di un modello idraulico come quello descritto poiché mancano misure idrometriche di riferimento per poter confrontare i valori di livello calcolati numericamente con quelli sperimentalmente osservati. Per gli scopi del lavoro, si è quindi deciso di utilizzare una versione semplificata delle equazioni di bilancio, che corrisponde a condizioni di stazionario idraulico. L'equazione di conservazione della massa risulta:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = Q_{in} - Q_{out} = q_{ws} \quad (4)$$

e l'equazione di conservazione della quantità di moto è sostituita dalle seguenti relazioni

$$h = \alpha \cdot Q^\beta \quad (5)$$

e

$$\bar{u} = a \cdot Q^b \quad (6)$$

dove \bar{u} è la velocità della corrente, legata alla portata e alla sezione di flusso dalla legge

$$A = \frac{Q}{\bar{u}} \quad (7)$$

e a , b , α e β sono costanti empiriche determinate sulla base dei dati di portata, livello e velocità della corrente disponibili.

6.2 Modello di qualità delle acque

Il modello di qualità delle acque utilizzato per questo progetto è stato derivato dal modello Qual2E, sviluppato dal Department of Civil Engineering, Tufts University, Medford, MA in collaborazione con l'Environmental Research Laboratory Office of Research and Development, Environmental Protection

Agency (EPA) [Brown, and Barnewell, 1987; <http://www.epa.gov>]. In questo lavoro è utilizzato nella versione stazionaria, per cui coincide esattamente con quello proposto dall'EPA come strumento per la valutazione della qualità delle acque. Il codice è ampiamente utilizzato negli Stati Uniti per localizzare gli scarichi inquinanti, per determinare permessi di scarico o per fare valutazioni connesse con la presenza di inquinanti [Campolo, 1995; Andreussi, 1999].

Il modello simula il trasporto, dispersione e trasformazione degli inquinanti calcolando un bilancio sulle specie presenti nel tronco di corrente in esame. L'equazione di trasporto, dispersione e trasformazione risulta:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(A \cdot D \cdot \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} - \frac{1}{A} \cdot \frac{\partial(A \cdot u \cdot C)}{\partial x} + \frac{dC}{dt} + \frac{s}{V} \quad (8)$$

dove C è la concentrazione della specie per cui si fa il bilancio, D è il coefficiente di dispersione, dC/dt è il termine di reazione e s è il contributo di sorgente per la specie dovuto a fattori esterni (p.es. scarichi inquinanti). I termini nel termine di destra rappresentano rispettivamente i contributi della dispersione, della convezione, della reazione e delle sorgenti esterne alla distribuzione della specie in esame.

Il modello di qualità delle acque utilizza questa equazione per calcolare la distribuzione di:

- livello di ossigeno disciolto;
- domanda biochimica di ossigeno;
- temperatura dell'acqua;
- quantità di alghe presenti;
- quantità di azoto presente in forma organica, come NH_3 , NO_2 e NO_3 ;
- quantità di fosforo organico e disciolto;
- concentrazione di coliformi;
- concentrazione di un costituente non conservativo (in grado di aumentare o diminuire la sua massa per effetto di trasformazioni che avvengono dentro la corrente)
- concentrazione di tre costituenti conservativi (la massa non varia se non per effetti di apporto o prelievo dall'esterno)

I termini di sorgente s permettono di tenere conto degli apporti inquinanti da scarichi localizzati lungo l'asta fluviale. Il termine di reazione dC/dt permette di modellare le reazioni di trasformazione e le inter-relazioni tra i diversi parametri.

Tra le specie per cui può essere simulato il trasporto/trasformazione possiamo distinguere:

- costituenti conservativi, cioè specie la cui massa non varia nel sistema se non a causa di immissioni o prelievi esterni. Sono conservativi gli inquinanti per i quali le trasformazioni chimico-biologiche richiedono tempi maggiori del tempo di attraversamento del sistema fluviale e per i quali non è probabile la deposizione al fondo.
- costituenti non conservativi, cioè specie la cui massa può variare nel sistema per effetto di trasformazione chimica, biologica o sedimentazione. Per queste specie, l'aspetto della trasformazione può diventare prevalente rispetto a quello del trasporto o della dispersione.
- costituenti che appartengono a cicli di trasformazione, come il fosforo o l'azoto: esiste un verso preferenziale secondo cui la catena delle reazioni di trasformazione si realizza e condizioni esterne, come la presenza di altri costituenti, possono influenzare il processo.
- alghe e ossigeno disciolto, caratterizzati dall'essere legati a molti altri parametri da numerosissime relazioni. Ad esempio, la quantità di alghe dipende dalla quantità di ossigeno disciolto ed è strettamente legata anche a fosforo inorganico, ammoniaca e NO_3 ; allo stesso tempo, però, le alghe sono anche soggette a morte e decomposizione e diventano a loro volta sorgente di azoto e fosforo. Analogamente, l'ossigeno disciolto interviene nella catena di trasformazione dell'azoto,

è consumato dalle alghe e da altri organismi attraverso reazioni biologiche, è integrato attraverso l'attività di fotosintesi delle alghe ed è assorbito e liberato continuamente attraverso la superficie a contatto con l'aria atmosferica.

- temperatura, influenza tutti gli altri costituenti, in quanto tutte le costanti utilizzate per rappresentare le relazioni di trasformazione sono funzioni della temperatura.

Per esemplificare, il termine di trasformazione per l'ossigeno disciolto è dato da:

$$\frac{dO}{dt} = k_2(O^* - O) + (\alpha_3\mu - \alpha_4\rho)A - k_1L - \frac{k_4}{d} - \alpha_5\beta_1N_1 - \alpha_6\beta_2N_2 \quad (9)$$

dove i vari termini a destra rappresentano rispettivamente il contributo di reazione atmosferica (k_2), l'ossigeno prodotto e consumato dalle alghe (A), l'ossigeno assorbito dalla degradazione delle sostanze organiche (L), l'ossigeno assorbito dai sedimenti (k_4), e l'ossigeno assorbito per l'ossidazione dei composti azotati, come nitriti e nitrati (N_1 e N_2). Il termine di reazione per i composti organici (BOD) è invece dato da:

$$\frac{dL}{dt} = -k_1L - k_3L \quad (10)$$

dove si tiene conto del materiale che si ossida reagendo con l'ossigeno disciolto (k_1) e del materiale che sedimenta al fondo (k_3).

Le interazioni tra i costituenti possono essere arbitrariamente complesse. Tuttavia, possono essere simulate in modo semplice utilizzando una opportuna rappresentazione per il termine di reazione. Questo termine può sempre essere espresso in modo semplificato come una cinetica di trasformazione del primo ordine:

$$\frac{dC}{dt} = a \cdot C + p \quad (11)$$

e la corretta stima di a e p permette di rappresentare l'effetto di qualsiasi reazione o trasformazione complessa.

Il modello di qualità delle acque si basa su un'idraulica stazionaria ma permette di valutare attraverso la simulazione della temperatura nelle sue variazioni giorno/notte, la variazione delle cinetiche di reazione per le varie specie e l'effetto sulle concentrazioni delle stesse.

Per applicare le equazioni idrauliche e di trasporto, dispersione e trasformazione delle specie è necessario schematizzare il corso fluviale come una serie di tronchi interconnessi tra loro. All'interno di ogni tronco si considerano costanti sia le caratteristiche geometriche ed idrauliche (pendenza del tratto, forma della sezione di flusso, coefficiente di attrito), sia le costanti utilizzate per la descrizione dei processi chimici o biologici che avvengono.

Per la risoluzione numerica delle equazioni di bilancio, ogni tratto è suddiviso in elementi computazionali e ad ogni elemento è associato un identificatore (sorgente, elemento standard, giunzione, scarico, prelievo) che permette di introdurre in modo semplice e sistematico le condizioni al contorno esterne (portate e concentrazioni entranti negli elementi sorgente, portate e concentrazioni degli scarichi e dei prelievi) ed interne (condizione per le sezioni di giunzione).

Le caratteristiche idrauliche della corrente sono calcolate, una sola volta per tutta la durata della simulazione, procedendo da monte verso valle passando attraverso tutti gli elementi computazionali.

La distribuzione spaziale delle concentrazioni di ogni costituente è ottenuta, ad ogni istante successivo, dalla risoluzione di un sistema tridiagonale, per il quale possono essere utilizzati metodi numerici molto efficienti (metodi di Gauss modificati). Inoltre, solo i termini noti di tale sistema devono essere modificati ad ogni istante successivo.

6.3 Modello di previsione del deflusso

Il processo di produzione del deflusso è estremamente complesso da modellare in modo dettagliato utilizzando equazioni di conservazione che descrivono in il bilancio di massa e di quantità di moto per l'acqua precipitata. La pioggia raccolta da un bacino idrografico in parte evapora, in parte scorre superficialmente e viene raccolta dal reticolo idrografico come deflusso superficiale, in parte si infiltra andando a modificare lo stato di saturazione del terreno e contribuendo a formare il deflusso di falda.

La dinamica del bilancio è controllata dalle caratteristiche geomorfologiche del bacino ma dipende in modo sensibile anche dalle caratteristiche dell'evento di pioggia in termini di distribuzione spaziale, intensità e durata, oltre che dalle particolari condizioni di saturazione pre-esistenti nel bacino quando la precipitazione si verifica.

La relazione che lega l'afflusso (pioggia precipitata) al deflusso (portata rilevabile alla sezione di chiusura del bacino) è quindi complessa e altamente non lineare, e, per queste caratteristiche, di difficile modellazione. In questo progetto, si propone l'utilizzo di modelli di previsione del deflusso di tipo black-box, basati su reti neurali.

Le reti neurali sono modelli statistici non lineari multivariati in grado di rappresentare funzioni di trasformazione causa-effetto arbitrariamente complesse. Il punto di partenza è l'individuazione di un set di dati in ingresso, variabili indipendenti considerate causa del fenomeno, e un set di variabili di uscita, variabili dipendenti rappresentative degli effetti del fenomeno. La forma matematica della funzione di trasformazione non deve essere nota a priori, come nei modelli statistici tradizionali, ma viene piuttosto ricavata attraverso una procedura tipo "trial and errors" come combinazione di una base di funzioni, i cui valori dei parametri liberi vengono fittati in modo da minimizzare l'errore del modello.

Lo schema funzionale di una rete neurale è rappresentato in Figura 25 insieme con il funzionamento dei singoli nodi computazionali. I nodi sono organizzati in strati (di input, interni o nascosti e di

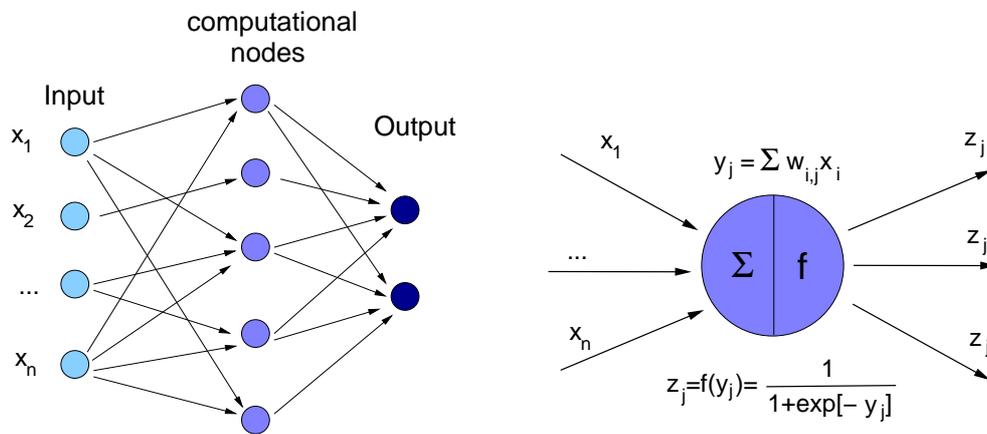


Figura 25: Schema di rete neurale e funzionamento del singolo nodo computazionale.

output) e connessi tra loro a formare una rete. I nodi realizzano una semplice combinazione lineare delle informazioni in arrivo, la trasformano utilizzando una funzione non lineare f , propagano il risultato verso altri nodi della rete.

Da un punto di vista matematico, il modello può essere descritto come una funzione F :

$$\overline{O}_c = F(\overline{I}, \overline{W}, \overline{\sigma}, N, f) \quad (12)$$

in grado di mappare il vettore delle variabili di input, \overline{I} , nel vettore delle variabili di output del modello, \overline{O}_c , utilizzando una serie di parametri liberi \overline{W} e $\overline{\sigma}$, che descrivono come la trasformazione del dato avviene a livello di singolo nodo. Nell'equazione 12 N è il numero di nodi coinvolti ed f è la funzione non lineare elementare che agisce a livello del singolo nodo.

Le fasi di sviluppo di un modello neurale prevedono:

1. la raccolta di dati per tutte le variabili ritenute significative per la descrizione della relazione causa-effetto;
2. l'analisi dei dati per stabilire la struttura di tentativo della rete (numero di nodi di input, che dipende dai predittori che si utilizzano, numero di nodi di output, che dipende dalle variabili che si vogliono predire, e numero di nodi nascosti, che dipendono dalla complessità della relazione da descrivere);

3. l'addestramento della rete, in cui vengono fissati i valori dei parametri liberi in modo da minimizzare l'errore del modello;
4. la validazione della rete su dati indipendenti.

Al termine di questo processo, il modello neurale è in grado di operare su una qualsiasi serie di dati producendo una previsione affidabile.

Per gli scopi di questo progetto, è stato sviluppato un modello neurale in grado di predire l'evoluzione del valore di portata misurato a Venzone, sezione di chiusura della parte montana del bacino. La previsione, realizzata su base oraria per un orizzonte temporale di 6 ore, ha lo scopo di verificare la possibilità di utilizzare modelli di tipo neurale per la previsione in tempo reale degli eventi di piena, in un'ottica di pronto intervento e mitigazione del rischio.

7 Applicazione del modello di qualità delle acque all'alto bacino del fiume Tagliamento

7.1 Fasi di implementazione del modello

L'applicazione di un modello di qualità delle acque ad un contesto reale passa attraverso le fasi di taratura delle costanti e validazione dei risultati prima che esso possa essere utilizzato in modo estensivo come strumento di previsione o analisi.

Nella fase di taratura, analizzando i dati a disposizione per il bacino in esame e utilizzando i valori proposti in letteratura per bacini fluviali con caratteristiche simili, viene attribuito un valore alle costanti del modello in modo da riprodurre le misure sperimentali a disposizione. Nella fase di validazione, le prestazioni del modello come strumento di previsione vengono poi valutate su un set di dati indipendenti da quelli utilizzati per la taratura, e se il modello ha prestazioni adeguate può essere utilizzato con confidenza su qualsiasi set di dati.

Per gli scopi di questo progetto, si è scelto di limitare l'applicazione del modello di qualità delle acque al tratto di fiume compreso tra Tolmezzo, appena a monte della confluenza con il Torrente But, e Peonis, subito a valle dell'immissione del Lago di Cavazzo e del Torrente Leale. Considerando il *km* 0 alla foce del fiume e risalendone il corso, il tratto in esame è compreso tra il *km* 130 (Tolmezzo) e il *km* 103 (Peonis). Si tratta della parte di bacino che risulta più vulnerabile dal punto di vista ambientale per la portata ridotta e l'alta incidenza dei carichi inquinanti di origine civile e industriale. La zona di studio è rappresentata in Figura 1 e schematizza in figura 26.

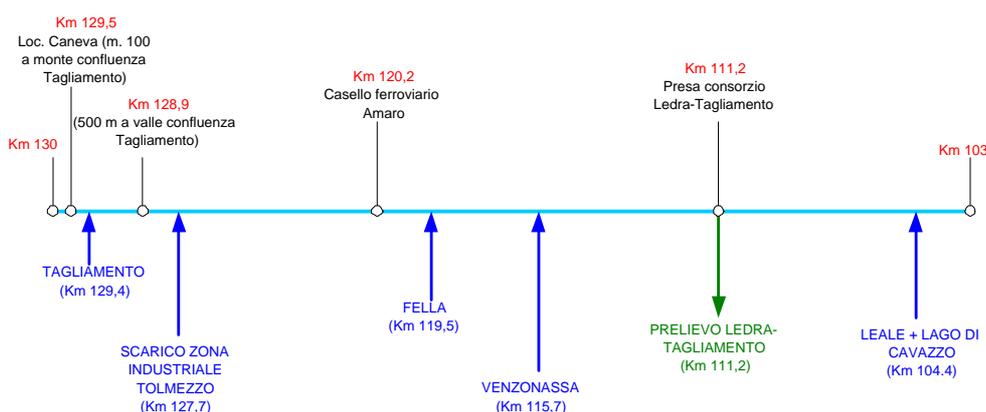


Figura 26: Il Tagliamento dal *km* 130 al *km* 103

Nella rappresentazione schematica del tratto considerato sono indicate le stazioni nelle quali vengono monitorati i parametri di qualità delle acque, che sono

- loc. Caneva, 100 m a monte della confluenza con il Torrente But (comune di Tolmezzo) *km* 129.5;
- Ponte Avons 500 m a valle della confluenza con il Torrente But, a monte della zona industriale (comune di Tolmezzo) *km* 128.9;
- Casello Ferroviario *km* 6 SS 52 (comune di Amaro) *km* 120.2;
- loc. Ospedaletto, presa consorzio Ledra-Tagliamento (comune di Gemona del Friuli) *km* 111.2;

Inoltre è possibile identificare i punti lungo il Tagliamento dove viene immessa (affluenti o scarichi) o prelevata dell'acqua:

- Fiume Tagliamento, *km* 129.4;
- Scarico zona industriale Tolmezzo (più precisamente scarico depuratore comunale), *km* 127.7;
- Fiume Fella, *km* 119.5;
- Torrente Venzonassa, *km* 115.7;
- Presa Ledra-Tagliamento, *km* 111.2;
- Torrente Leale + Lago di Cavazzo, *km* 104.4.

Per l'utilizzo del modello, il fiume Tagliamento, che è in secca quasi tutti i periodi dell'anno, viene considerato come se fosse un affluente del But che, per la parte alta del corso, risulta essere responsabile del maggiore apporto di acqua.

La parte di Tagliamento è stata suddivisa in tratti omogenei valutando la variazione delle caratteristiche geometriche (sezioni di flusso, pendenza) ed idrauliche (relazioni portata livello) lungo l'asta.

Le sezioni del fiume, fornite dal Genio Civile, sono state digitalizzate su fogli Excel per poter essere rappresentate graficamente come si può vedere dall'esempio in figura 27, e caratterizzate derivando una relazione tra livello dell'acqua e area di flusso.

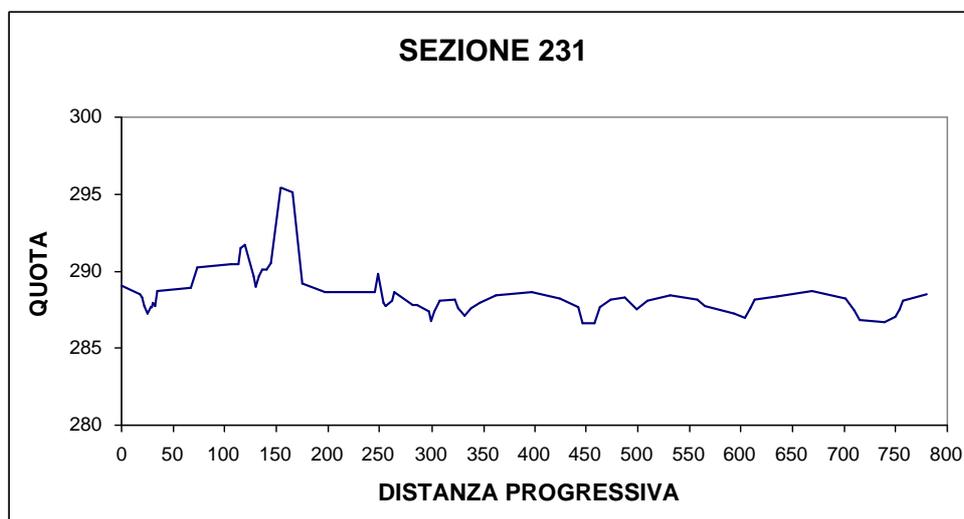


Figura 27: Sezione del fiume Tagliamento relativa al *km* 127.1 (a valle della zona industriale di Tolmezzo)

L'analisi delle sezioni ha permesso di individuare quelle più significative per caratterizzare sostanziali variazioni dell'alveo. Il fiume è stato diviso in 27 tratti di diversa lunghezza, che sono stati ulteriormente suddivisi in elementi computazionali di 100 m ciascuno, identificati come elementi standard, di sorgente,

di giunzione, di scarico/prelievo. Come si può osservare dall Figura 26 gli elementi con scarichi si trovano nei tratti 2, 5, 13, 17 e 26; mentre l'unico con un prelievo nel tratto 21.

Sulla base dei dati sperimentali a disposizione, si è scelto di simulare il comportamento solo di una serie ridotta di parametri di qualità delle acque, tra cui temperatura dell'acqua, domanda biochimica di ossigeno (BOD) e ossigeno disciolto (DO). Questi sono i parametri più significativi per capire lo stato di qualità delle acque del fiume [Nardini et al., 1990].

I dati di portata e livello disponibili per la stazione di Pioverno sono stati utilizzati per determinare le costanti empiriche a , b , α , β delle equazioni 5, 6. I dati a disposizione riguardavano misure di altezza idrometrica, portata e sezione liquida per gli anni dal 1953 al 1982, e hanno permesso di ricavare come curve interpolanti le seguenti equazioni

$$h = 0.1909 \cdot Q^{0.3647} \quad (13)$$

$$\bar{u} = 0.2452 \cdot Q^{0.3945} \quad (14)$$

La Figura 28 mostrano le curve interpolanti e i dati originari. Poiché non esistono sezioni del corso, oltre la sezione di Pioverno, in cui risultano disponibili misure congiunte di portata e livello, si è dovuto assumere che la curva di deflusso non cambi lungo tutto il tratto simulato. La disponibilità di misure sistematiche di portata e livello per i vari punti del fiume fornirebbe dati per una caratterizzazione più dettagliata.

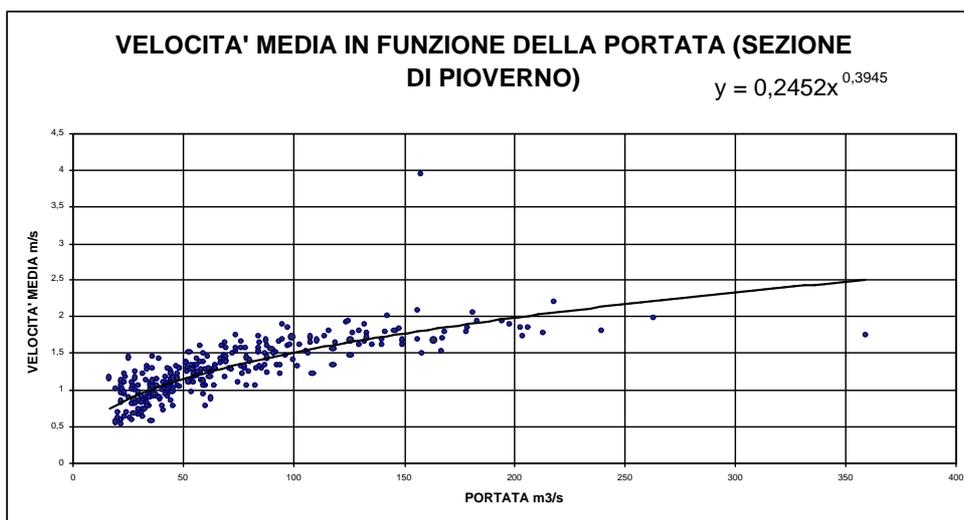


Figura 28: Velocità media in funzione della portata per la stazione di misura di Pioverno

Per stabilire le condizioni al contorno per il problema idraulico è stato necessario determinare le portate delle sorgenti, degli scarichi e dei prelievi. Per tarare il modello si è scelto di considerare dati sperimentali relativi al mese di luglio 2002.

I dati utilizzati in fase di taratura sono riportati nelle tabelle 4 e 5.

nome della sorgente	portata m^3/s	temperatura	DO mg/l	BOD $O_2 mg/l$
T. But (100 m a monte confl.)	9.3	17.4	9.3	2.3

Tabella 4: Luglio 2002: valori relativi al torrente But, 100 m a monte con la confluenza con il fiume Tagliamento.

Come si nota dalle tabelle 4 e 5, per una corretta implementazione del modello sarebbe necessario disporre contemporaneamente di dati di portata e dati di qualità dell'acqua. Per la costruzione di un modello accurato per il fiume Tagliamento sarebbe quindi necessario pianificare e realizzare delle

tipo	nome	portata m^3/s	temperatura	DO mg/l	BOD $O_2 mg/l$
scarico	Tagliamento	0			
scarico	Depuratore comunale Tolmezzo	0.5	21.2	6.6	154
scarico	Fella	20	13.8	10.2	0.8
scarico	Venzonassa	0.5	13.1	9.9	1.5
prelievo	Ledra-Tagliamento	-21	12.4	8.5	0.3
scarico	T. Leale+Lago di Cavazzo	18.794	16	9.3	1.5

Tabella 5: Luglio 2002: valori relativi ai prelievi ed agli scarichi nel tratto di fiume considerato per la simulazione.

campagne di monitoraggio mirato durante le quali, oltre a rilevare i parametri di qualità, dovrebbero essere quantificati i flussi idrici. Tali campagne dovrebbero essere ripetute in diversi periodi dell'anno in modo da costruire un data base descrittivo delle variazioni stagionali del regime idraulico e dei carichi inquinanti. Questo aspetto risulta particolarmente importante per il Tagliamento, dove il regime degli affluenti è torrentizio con notevoli variazioni delle portate nei diversi periodi dell'anno. Poiché questi dati non sono attualmente disponibili, la portata del corso, degli affluenti e degli scarichi e prelievi è stata stimata sulla base dei dati storici.

7.2 Taratura delle costanti del modello

Sulla base dei dati di qualità disponibili per Luglio 2002, sono stati tarati i valori delle seguenti grandezze:

- la costante di dispersione longitudinale;
- coefficiente di scabrezza di Manning;
- costanti cinetiche, BOD decay e BOD settling;
- modello di reazione atmosferica e valore del coefficiente di reazione.

La costante di dispersione longitudinale dipende dalla velocità del flusso e dalla profondità del bacino e descrive in modo sintetico il meccanismo di trasporto convettivo/dispersivo all'interno del fiume. Modificando il valore della costante di dispersione si producono variazioni nei profili di temperatura, ossigeno disciolto e BOD. Per l'alto bacino del Tagliamento si è scelto un valore pari a 500 che rientra nell'intervallo proposto in letteratura (6 – 6000) [Rutherford, 1994].

Il coefficiente di scabrezza di Manning, n , è stato fissato considerando i valori proposti in letteratura per bacini con alveo simile al Tagliamento [Brown, and Barnewell, 1987] (si veda la tabella ??). Si è scelto un valore pari a 0.036, corrispondente ad un fiume serpeggiante con laghetti e secche.

Le costanti cinetiche da fissare per riprodurre le variazioni di concentrazione di BOD lungo l'asta del fiume nel modello DO-BOD considerato sono le costanti di decomposizione e di sedimentazione del BOD. Queste costanti controllano la riduzione di concentrazione di BOD influenzando anche il profilo di ossigeno disciolto, soprattutto se i meccanismi di reazione atmosferica non sono efficaci. I valori utilizzati in letteratura sono riassunti in tabella 6 [Campolo et al., 2002].

BOD decay (1/day)	0.05 – 3.00
BOD settling (1/day)	0 – 10

Tabella 6: Valori di BOD decay e BOD settling utilizzati in letteratura

Per il Tagliamento, è stato necessario fissare valori diversi delle costanti per ogni singolo tratto di fiume, tenendo conto delle variazioni di pendenza, di portata e di velocità e considerando la localizzazione degli scarichi, degli affluenti e dei prelievi.

Il tasso di decomposizione del BOD è piuttosto elevato in prossimità dello scarico del depuratore comunale di Tolmezzo, dove vengono immesse sostanze che si degradano abbastanza facilmente in una fase iniziale. Lungo il corso il tasso di decomposizione si riduce progressivamente, per simulare la presenza residua di sostanze organiche di più difficile decomposizione.

Il tasso di sedimentazione del BOD va invece aumentando da monte a valle (da 1 a 5 $1/day$) per tener conto delle maggiori possibilità di sedimentazione al diminuire della pendenza dell'alveo e della velocità della corrente (la pendenza passa da 0.56 % prima dell'immissione del Fella a 0.40 %, mentre la larghezza dell'alveo aumenta di circa 12 m).

I grafici in Figura 29 e 30 mostrano la procedura utilizzata per tarare le costanti chimiche: il valore finale delle costanti è stato determinato confrontando i profili calcolati al variare del valore della costante, fino ad ottenere il migliore accordo possibile con le misure sperimentali.

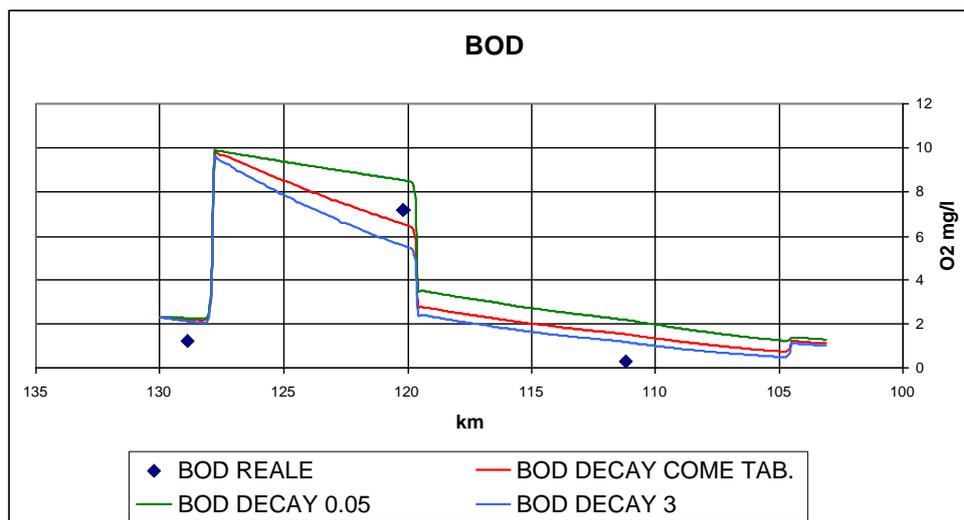


Figura 29: Andamento del BOD lungo il fiume Tagliamento per valori di BOD decay pari a 0.05 $1/day$ e 3 $1/day$ confrontati con i valori reali (indicati dai punti blu) e con l'andamento ottenuto con la taratura rappresentata in tabella 7

I valori finali per il modello tarato sono riassunti in tabella 7.

tratto	BOD decay ($1/day$)	BOD settling ($1/day$)
1 – 5	1	1
6 – 13	2	1
14 – 27	1.5	5

Tabella 7: Valori di BOD decay e BOD settling tarati per il tratto di Tagliamento esaminato nella simulazione

Il modello di reareazione determina le variabili che influenzano il valore del coefficiente di reareazione, che comprendono in genere la profondità e la velocità della corrente. Per il caso del Tagliamento, si è preferito fissare direttamente il valore del coefficiente nei diversi tratti del bacino fluviale stimando una maggiore reareazione nella parte a monte della confluenza con il Fella in quanto il fiume scorre su un terreno più pendente, ha una minore portata ed un alveo più stretto rispetto al tratto a valle. In questo modo si è potuto portare l'andamento dell'ossigeno disciolto sufficientemente vicino a quello osservato. Il grafico in Figura 31 descrive il processo di taratura del coefficiente di reareazione. La tabella 8 riporta i valori finali per il modello tarato.

tratto	tipo di reareazione	coefficiente di reareazione
1 – 13	Single Coefficient	25
13 – 27	Single Coefficient	1

Tabella 8: Tipo di reareazione e valori del coefficiente di reareazione scelti per la taratura del modello

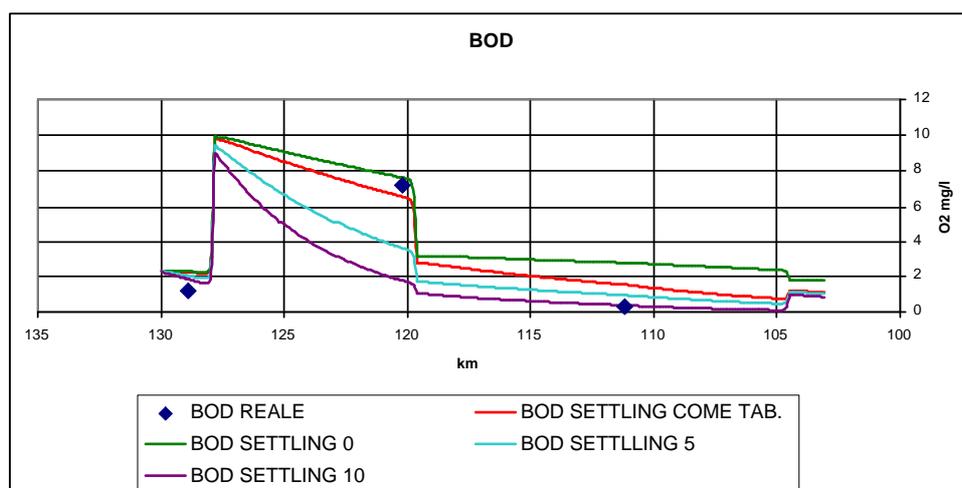


Figura 30: Andamento del BOD lungo il fiume Tagliamento per valori di BOD settling pari a 0,5 e 10 1/day confrontati con i valori reali (indicati dai punti blu) e con l'andamento ottenuto con la taratura rappresentata in tabella 7

I risultati del modello tarato sulla base dei dati del Luglio 2002 è rappresentato nelle Figure 32, 33 e 34. I simboli corrispondono ai valori sperimentali misurati nei tre punti lungo l'asta fluviale disponibili per il confronto. Il valore di sorgente e il valore di valle sono infatti utilizzati come condizioni al contorno per il calcolo dei profili.

7.3 Validazione

Per valutare le prestazioni del modello tarato, si è considerato un set di dati indipendenti, corrispondente al Febbraio 2001. La simulazione fatta utilizzando diverse condizioni al contorno e il valore delle costanti precedentemente determinato ha permesso di ottenere profili di temperatura, concentrazione di ossigeno disciolto e BOD che sono in buon accordo con i valori sperimentali, come riportato in Figura 35.

7.4 Utilizzo del modello per la valutazione di alternative di intervento

L'analisi dei dati sperimentali, la taratura e la validazione del modello mostrano che le principali cause di crisi ambientale per l'alto bacino del Tagliamento derivano dalla ridotta portata del fiume a monte di Tolmezzo e dall'incidenza dei carichi inquinanti industriali e civili nella stessa zona. Il modello di qualità tarato è stato impiegato per valutare l'effetto di possibili azioni di intervento per ridurre la vulnerabilità ambientale.

7.4.1 Variazione della portata del Tagliamento

Il Tagliamento a monte del Torrente But è in secca quasi tutti i periodi dell'anno. La bassissima portata del fiume è determinata dal sistema di captazioni di monte (necessarie per il funzionamento delle centrali idroelettriche di Ampezzo e Somplago) che hanno profondamente modificato nel tempo il regime delle acque.

Dal grafico 36 è possibile valutare quale sarebbe l'effetto prodotto sul profilo di concentrazione del BOD se la portata del Tagliamento e, di conseguenza, del Torrente Leale e del Lago di Cavazzo, assumessero i valori rappresentati in tabella 9.

Se le acque del Tagliamento non venissero captate per fini idroelettrici, la vulnerabilità della zona di Tolmezzo sarebbe notevolmente ridotta. Le variazioni di concentrazioni del BOD porterebbero la corrente dalla classe di qualità 4 ($BOD \leq 15$) alla classe di qualità 3 ($BOD \leq 8$). Riducendo la portata

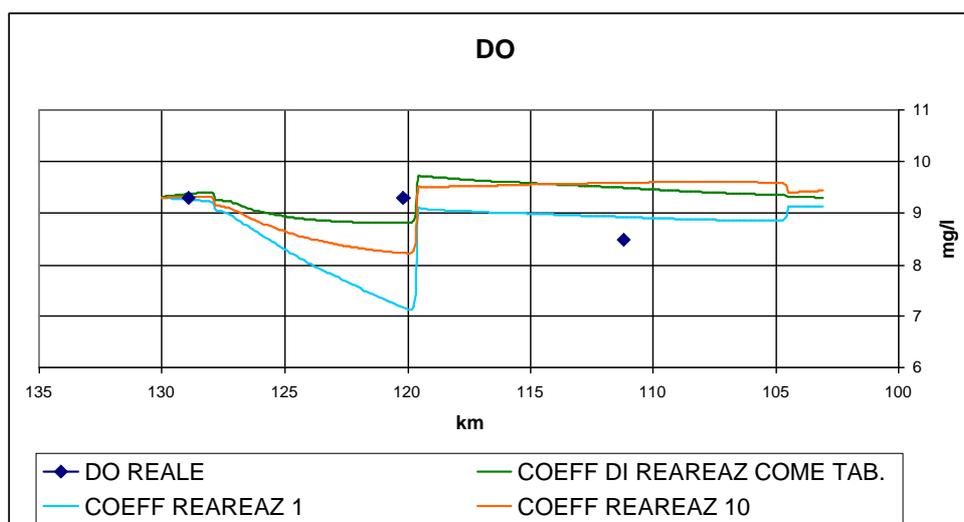


Figura 31: Andamento dell'ossigeno disciolto lungo il fiume Tagliamento per diversi valori di coefficiente di reareazione confrontato con i valori reali e con l'andamento ottenuto dalla taratura rappresentata in tabella 8

	portata Tagliamento m^3/s	portata T.Leale + L.Cavazzo m^3/s
condiz. reali	0	18.794
prima simulaz.	1	17.794
seconda simulaz.	5	13.794
terza simulaz.	10	8.794
quarta simulaz.	18.794	0

Tabella 9: Valori di portata, per il Tagliamento a monte del Torrente But e per il Torrente Leale + il Lago di Cavazzo, utilizzati per le diverse simulazioni

di captazione di soli $5 m^3/s$, il picco di BOD che si osserva subito a valle del depuratore comunale di Tolmezzo passerebbe da $9.76 mgO_2/l$ a $6.98 mgO_2/l$ per poi arrivare fino a $4.34 mgO_2/l$ nel caso di una riduzione della portata captata di $18 m^3/s$.

Anche il livello di ossigeno disciolto aumenterebbe nella zona critica, passando da circa $8.8 mg/l$ a $9.4 mg/l$ come si può osservare dal grafico 37.

In virtù di queste osservazioni, potrebbe essere opportuno ridiscutere le concessioni delle captazioni e la gestione degli invasi per garantire un deflusso minimo a Tolmezzo tra 5 e $10 m^3/s$ che potrebbe garantire buone capacità di auto depurazione per il fiume [Soldati et al., 2001a, 2001b].

7.4.2 Variazione della portata del Torrente But

Il regime torrentizio del bacino e la limitata disponibilità di valori di portata misurati relativi al torrente But ci hanno indotto ad utilizzare come dato idraulico rappresentativo per la sorgente il valore di portata media. Tuttavia, è utile conoscere i possibili scostamenti prodotti nella qualità delle acque in seguito alle variazioni di portata della sorgente, che potrebbero rappresentare variazioni naturali di portata in periodi diversi dell'anno. Il modello di qualità è stato utilizzato per quantificare le variazioni indotte nei profili di concentrazione di ossigeno disciolto, temperatura e BOD.

La variazione del profilo di concentrazione del BOD quando la portata del But assume i valori rappresentati in tabella 10 è riportato nel grafico 38.

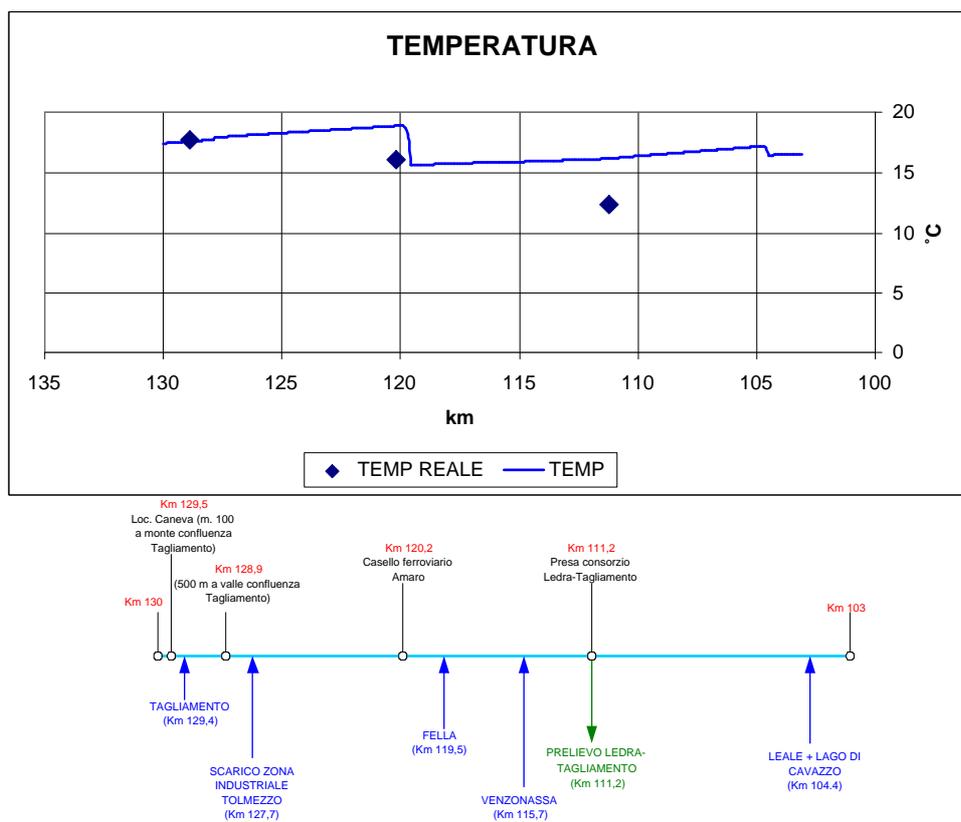


Figura 32: Andamento della temperatura lungo l'asta fluviale e confronto con le misure reali (rappresentate dai quadratini blu)

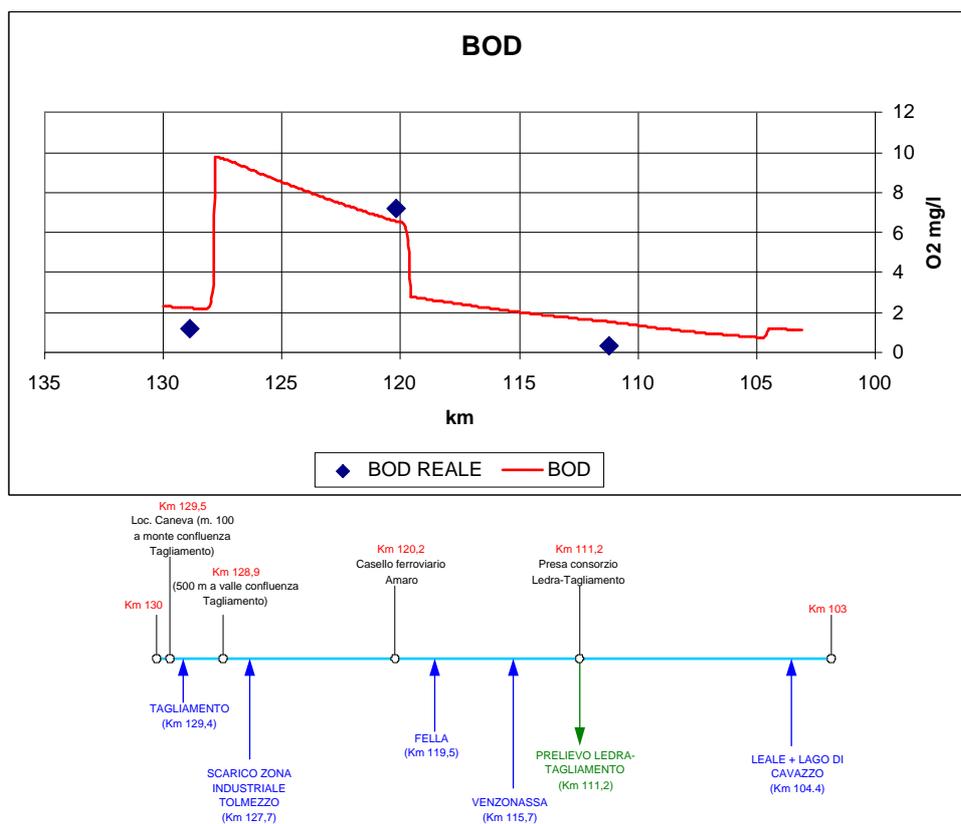


Figura 33: Andamento del BOD lungo l'asta fluviale e confronto con le misure reali (rappresentate dai quadratini blu)

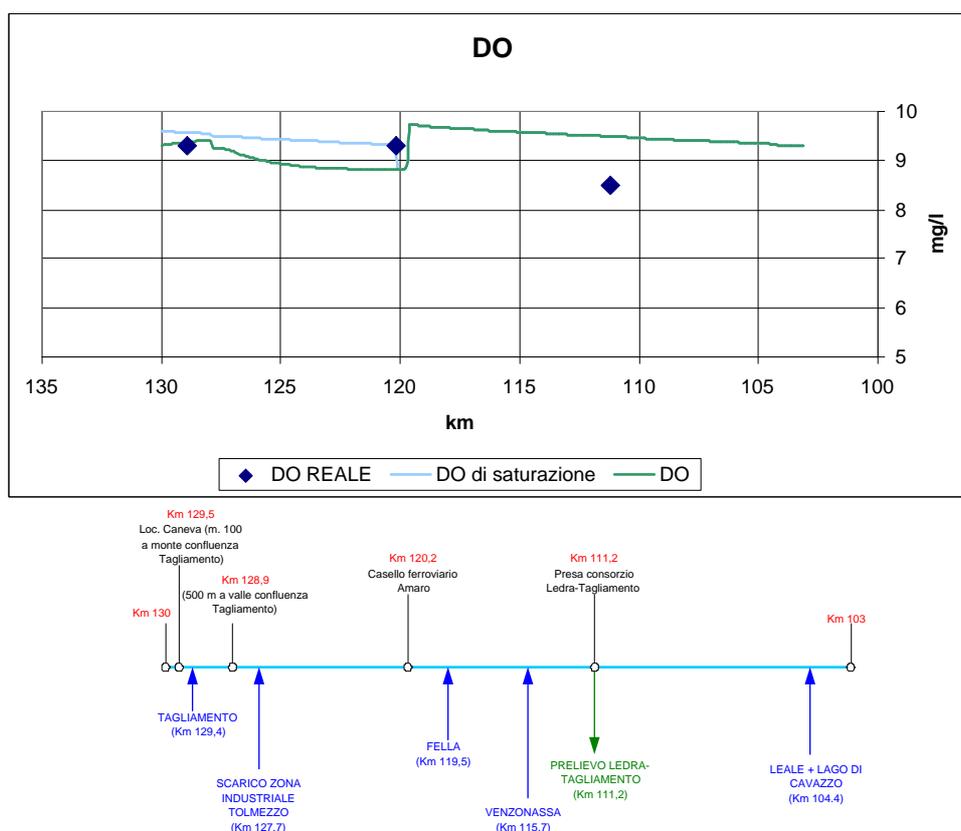


Figura 34: Andamento dell'ossigeno disciolto lungo l'asta fluviale e confronto con le misure reali (rappresentate dai quadratini blu) e con l'andamento dell'ossigeno di saturazione (linea azzurra)

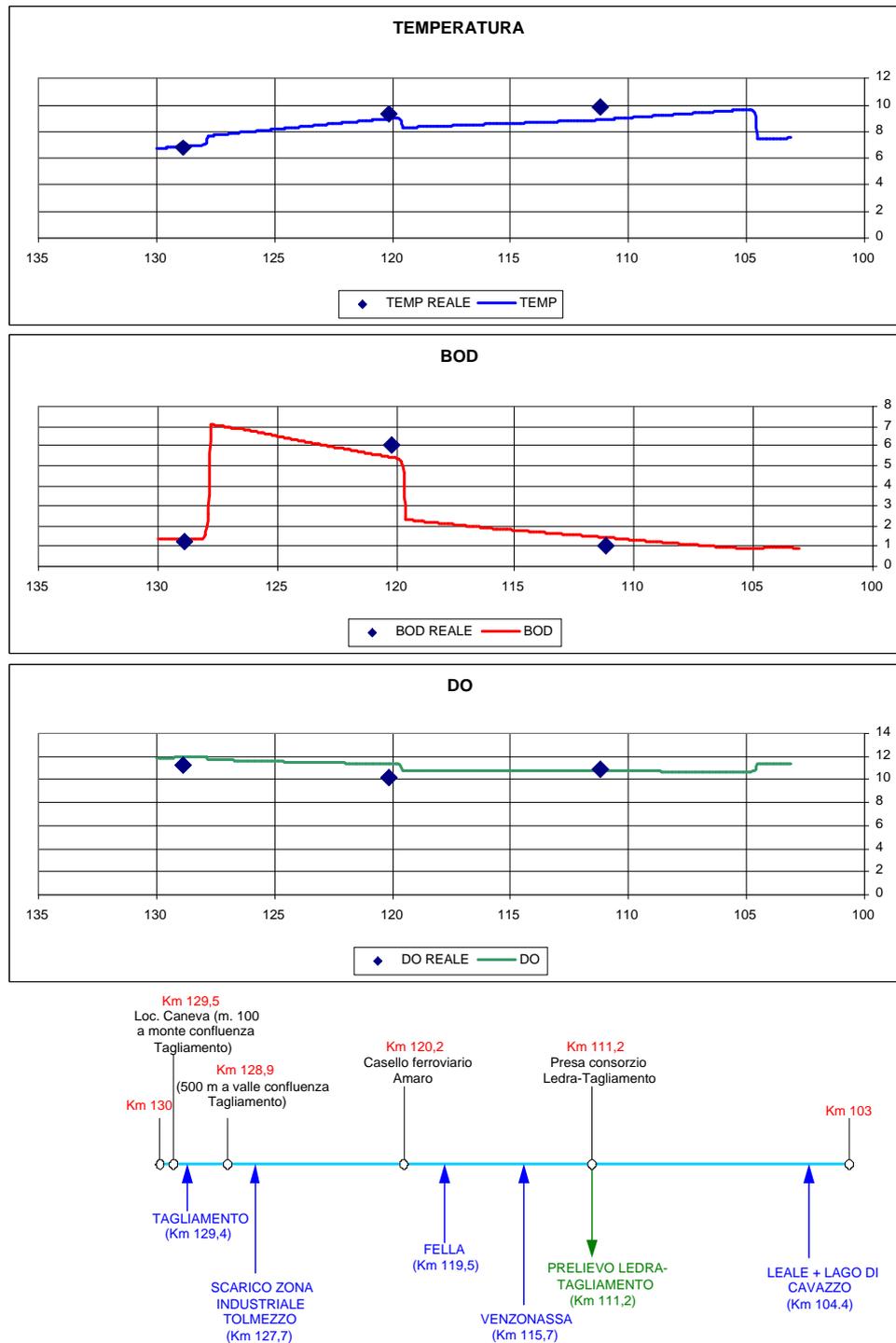


Figura 35: Andamento della temperatura, dell'ossigeno disciolto e del BOD lungo l'asta fluviale e confronto con le misure reali del mese di febbraio 2001 (rappresentate dai quadratini)

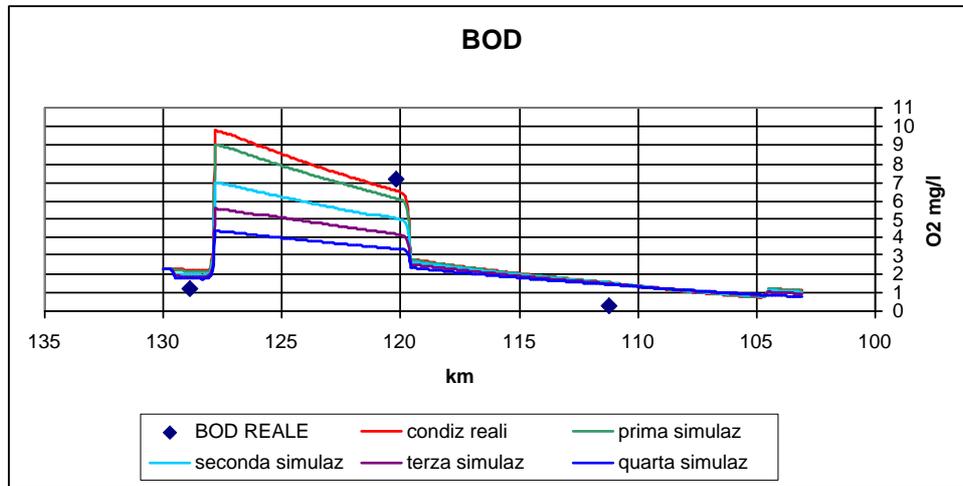


Figura 36: Variazione dell'andamento del BOD al variare della portata del Tagliamento e del Torrente Leale + Lago di Cavazzo come rappresentato in tabella 9

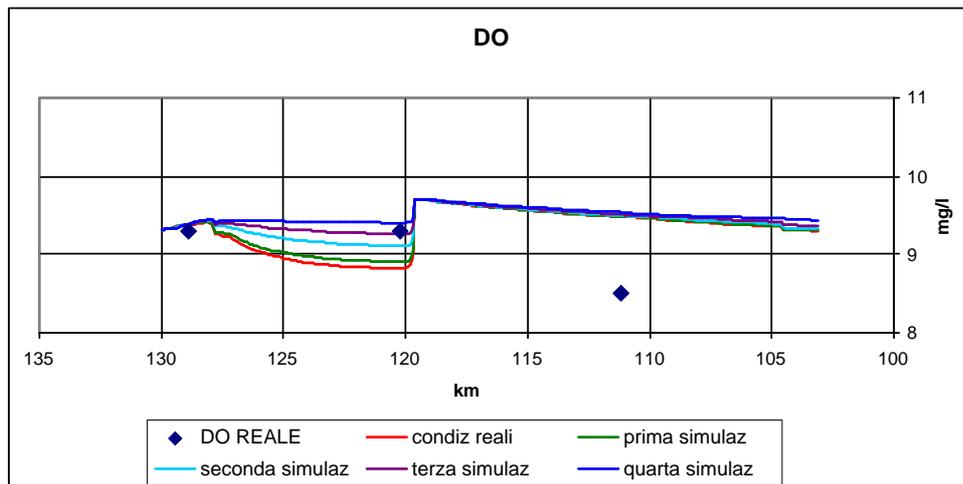


Figura 37: Variazione dell'andamento dell'ossigeno disciolto al variare della portata del Tagliamento e del Torrente Leale + Lago di Cavazzo come rappresentato in tabella 9

	portata But m^3/s
condiz. reali	9.3
prima simulaz.	2
seconda simulaz.	4
terza simulaz.	15

Tabella 10: Valori di portata per il Torrente But utilizzati per le diverse simulazioni stimando come portata minima $2 m^3/s$ e massima $10 m^3/s$

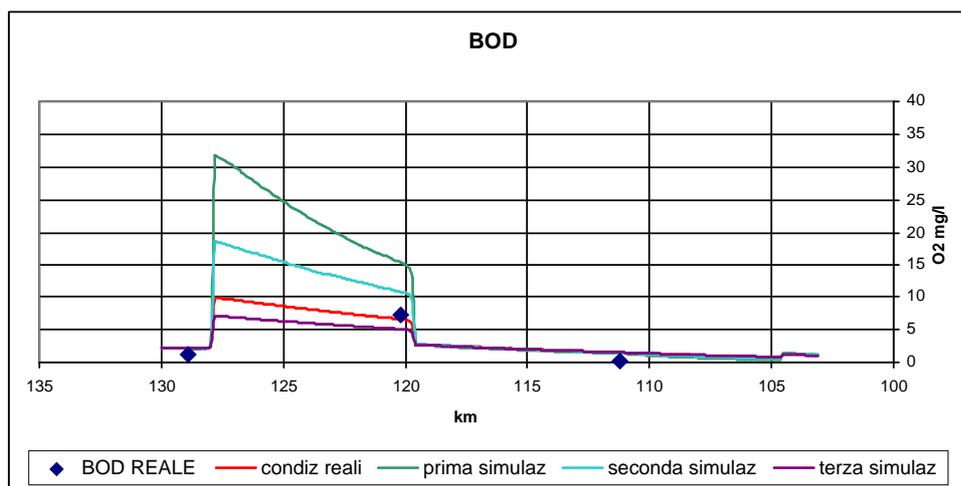


Figura 38: Variazione dell'andamento del BOD al variare della portata del But

Dal grafico 38, si nota che per una portata di $2 m^3/s$ (corrispondente a periodi di magra) il picco di BOD in prossimità del depuratore di Tolmezzo raggiunge valori molto alti, pari a $31.88 O_2mg/l$ (classe di qualità 5, $BOD > 15$) contro $6.99 O_2mg/l$ (classe di qualità 3, $BOD \leq 8$) che si registrerebbero se la portata del But fosse $15 m^3/s$ (corrispondente a periodi di forti piogge).

Anche l'ossigeno disciolto, come si può osservare dal grafico 39 raggiunge valori di circa $7.3 mg/l$ quando la portata del But è minima, contro i circa $9 mg/l$ in periodo di portata massima.

7.4.3 Variazione della concentrazione di BOD nello scarico del depuratore comunale di Tolmezzo

Poiché il contributo in carico inquinante proveniente dal centro urbano di Tolmezzo rappresenta un apporto significativo per determinare la qualità delle acque dell'alto corso del Tagliamento, il modello di qualità fluviale è stato utilizzato per valutare i possibili benefici derivanti da un incremento dell'efficienza di abbattimento del depuratore comunale di Tolmezzo.

I casi simulati sono riassunti in tabella 11 e i risultati in termini di variazione del profilo di concentrazione del BOD sono rappresentati in figura 40.

	concentraz. BOD depuratore com. Tolmezzo O_2mg/l
condiz. reali	154
prima simulaz.	40
seconda simulaz.	90
terza simulaz.	200

Tabella 11: Valori di concentrazione di BOD del depuratore comunale di Tolmezzo stimati per le diverse simulazioni supponendo una diversa efficienza di abbattimento del depuratore di Tolmezzo

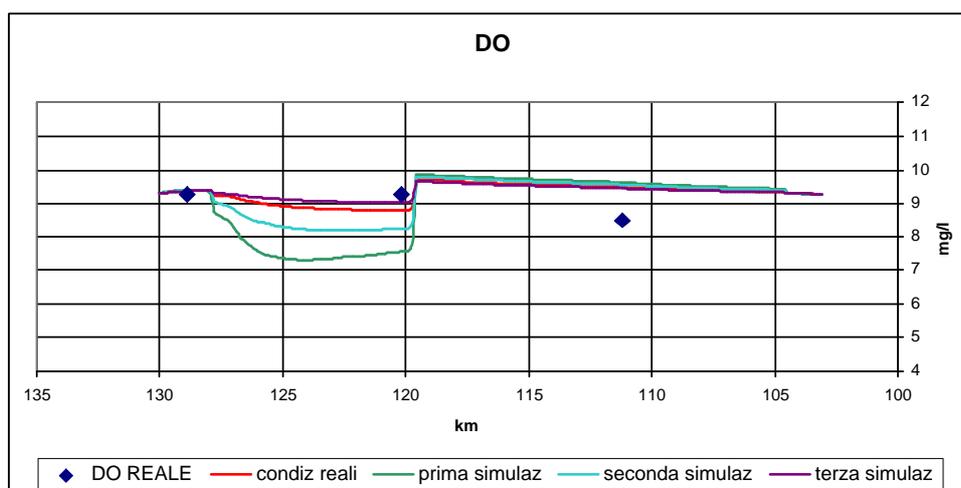


Figura 39: Variazione dell'andamento dell'ossigeno disciolto al variare della portata del But

Come si può notare, se la concentrazione allo scarico del depuratore si riducesse a $90 O_2 mg/l$, il picco di BOD subito a valle dello scarico passerebbe da $9.76 O_2 mg/l$ (condizioni reali, corrispondenti alla classe 4 $BOD \leq 15$) a $6.54 O_2 mg/l$ (corrispondente alla classe 3 $BOD \leq 8$), fino ad arrivare a $4 O_2 mg/l$ nel caso di una concentrazione pari a $40 O_2 mg/l$.

Questo avrebbe qualche conseguenza anche sull'andamento dell'ossigeno disciolto, rappresentato in Figura 41. Pur essendo lontani da situazioni di bassi valori di ossigeno disciolto, grazie all'efficienza del meccanismo di reareazione atmosferica, con una concentrazione di BOD allo scarico pari a $40 O_2 mg/l$ si passerebbe da una concentrazione di DO di $8.6 mg/l$ (condizioni reali) a $9.2 mg/l$.

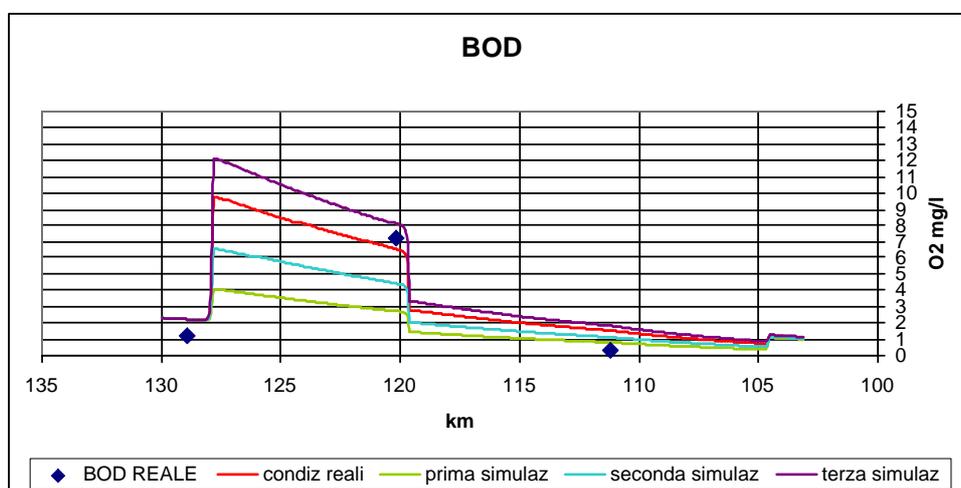


Figura 40: Variazione dell'andamento del BOD al variare della concentrazione di BOD nello scarico del depuratore comunale di Tolmezzo

Queste valutazioni suggeriscono che il miglioramento dell'efficienza di abbattimento del depuratore di Tolmezzo potrebbe contribuire in modo significativo a diminuire sensibilmente la concentrazione di BOD direttamente scaricata nel fiume Tagliamento, con benefici effetti su tutta la zona a valle.

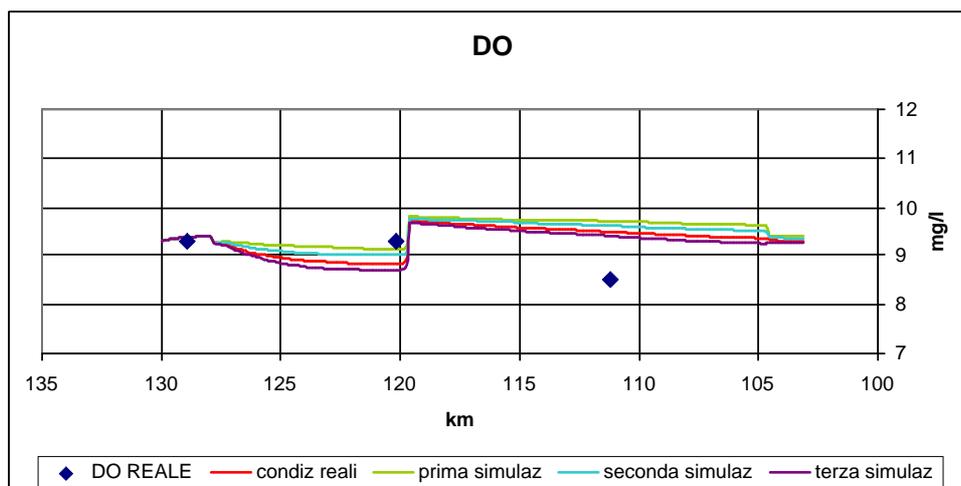


Figura 41: Variazione dell'andamento dell'ossigeno disciolto al variare della concentrazione di BOD nello scarico del depuratore comunale di Tolmezzo

8 Applicazione del modello di previsione delle piene all'alto bacino del fiume Tagliamento

Il modello descritto in questa sezione è stato sviluppato nel 1997, e i risultati sono stati pubblicati nel 1999 (Campolo et al., 1999). Nell'ambito di questo progetto si intendeva riproporre il modello, attualizzandolo sulla base di dati pluviometrici e idrometrici aggiornati, potenzialmente disponibili grazie al sistema automatico di acquisizione dati in telemetria. Purtroppo, per motivi legati anche alla riorganizzazione degli Uffici predisposti alla acquisizione e gestione dei dati, non è stato possibile incrementare la base di dati a disposizione e raggiungere l'obiettivo. Il lavoro viene qui riproposto per fornire un quadro completo dei sistemi disponibili per impostare programmi di gestione integrata delle acque a livello di bacino, in grado di considerare il monitoraggio e controllo della qualità delle acque e la gestione degli eventi di piena come aspetti collegati di un unico problema di gestione.

8.1 Fasi di implementazione del modello

La Figura 42 mostra la parte montana del bacino del fiume Tagliamento per cui è stato sviluppato il modello a reti neurali. Il bacino ha un'estensione complessiva di 2480 km^2 e può essere scomposto nei diversi sottobacini corrispondenti agli affluenti che contribuiscono a determinare il deflusso alla sezione di chiusura di Venzone. I dati utilizzati per il lavoro sono stati acquisiti dalle registrazioni storiche della rete pluviometrica e idrometrica gestita dal Magistrato delle Acque di Venezia. In particolare, sono stati acquisiti dati relativi ad un sottoinsieme dei pluviometri, posti a Paularo, Ampezzo, Pesariis, Resia e Moggio e all'idrometro di Venzone.

La distribuzione spaziale dei pluviometri è stata scelta in modo da poter tener conto della variabilità spaziale degli eventi di pioggia. La base di dati comprende gli eventi di piena significativi verificatisi nel corso degli ultimi 20 anni. Gli eventi sono stati selezionati attraverso l'esame delle variazioni di livello, identificando come evento di piena ogni variazioni pari a 100% del valore iniziale verificatasi in un intervallo temporale minore delle 24 ore.

Gli eventi di piena possono essere generati da piogge distribuite sull'intero bacino o localizzate in alcuni punti specifici. I dati pluviometrici sono stati analizzati per poter identificare il contributo dei singoli pluviometri alla generazione del deflusso a Venzone. Utilizzando l'analisi di correlazione tra la serie pluviometrica e la serie idrometrica, si è visto che il ritardo tra la pioggia e la produzione del deflusso dipende dalla posizione del pluviometro (distanza rispetto alla sezione di chiusura del bacino)



Figura 42: Bacino del fiume Tagliamento. I punti indicano la posizione dei pluviometri e dell'idrometro. La linea tratteggiata indica l'estensione del bacino.

ma varia in funzione della storia dell'evento di precipitazione e delle condizioni di saturazione del bacino. I risultati dell'analisi di correlazione sono riassunti in Tabella 12.

Pluviometro	Ritardo minimo	Ritardo massimo	Ritardo medio
Paularo	6	18	13
Ampezzo	5	17	12
Pesariis	7	18	13
Resia	6	18	12
Moggio	7	17	13

Tabella 12: Ritardo minimo, massimo e medio (in ore) tra la pioggia e la produzione di deflusso a Venzone.

Questa analisi ha permesso di identificare per ogni pluviometro la finestra temporale dei dati di pioggia che risulta significativa per predire l'evoluzione del deflusso. La portata registrata a Venzone dipende dalla pioggia caduta a Paularo 6 ore prima quando il bacino è in condizioni di saturazione (piove dopo un periodo di pioggia) e 18 ore prima quando il bacino non è in condizioni di saturazione (piove dopo un periodo di assenza di pioggia).

La risposta del bacino, oltre ad essere caratterizzata da una notevole variabilità nei tempi di ritardo, è caratterizzata anche da una corrispondente variabilità nell'ampiezza della variazione di portata prodotta a seguito di una fissata quantità di pioggia. L'entità del picco di piena è maggiore per piogge intense (flash floods) che per piogge distribuite. Infine, lo stato di saturazione del bacino è un dato essenziale per caratterizzare correttamente sia il ritardo che l'ampiezza del colmo di piena.

Sulla base dell'analisi di correlazione e di queste evidenze, si è deciso di sviluppare due diversi modelli, per la previsione a breve (1 ora in avanti) e a lungo termine (fino a 10 ore in avanti) della variazione

del livello a Venzone. Si è deciso di utilizzare come input del modello neurale per predire il valore di livello all'ora T i seguenti dati:

- valori precedenti di livello nelle ore da $T-1$ a $T-4$;
- valori precedenti di pioggia nelle ore da $T - \Delta_i$ a $T - \Delta_i + 3$ dove i rappresenta un indice che identifica il pluviometro e Δ_i è il ritardo medio calcolato dall'analisi di correlazione.

Per predire il valore di livello all'ora T e fino a $T+10$, la serie dei dati di input è stata estesa a:

- valori precedenti di livello nelle ore da $T-1$ a $T-5$;
- valori precedenti di pioggia nelle ore da $T - 15$ a $T - 1$.

Per estendere l'orizzonte temporale di previsione del deflusso è infatti necessario tenere conto anche delle informazioni più recenti relative alla pioggia caduta, che pur non avendo effetto sul valore del livello all'ora T , sono essenziali per determinare il livello all'ora $T + \Delta$.

8.2 Taratura delle costanti del modello e validazione

Il modello neurale è stato tarato utilizzando metà dei dati di piena a disposizione. La procedura di taratura prevede l'inizializzazione random dei parametri liberi del modello, la presentazione delle serie di input, il calcolo dei valori di output e il confronto dei valori calcolati con i valori attesi. L'errore tra valori calcolati e attesi è funzione del valore dei parametri liberi, che vengono modificati muovendosi nello spazio dei parametri secondo il gradiente della superficie di errore verso il punto di minimo. Questo algoritmo, noto come gradient descent back-propagation algorithm, è molto efficiente e permette di ottenere un buon fitting dei dati se il modello ha una struttura (input e numero di nodi nascosti) adeguata per catturare la complessità della trasformazione.

Le prestazioni del modello tarato sono sintetizzate in Tabella 13, dove sono riportate le misure di errore calcolate sui dati di taratura e sui dati utilizzati per la validazione indipendente. La capacità del

	Taratura	Validazione
RMSE	$1.39 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-2}$
E_{max}	$1.04 \cdot 10^{-1}$	$1.02 \cdot 10^{-1}$
$R_{\%}^2$	98.4	98.5

Tabella 13: Misure di errore calcolate per il modello neurale: RMSE, scostamento quadratico medio, E_{max} errore massimo, $R_{\%}^2$ efficienza del modello.

modello di predire correttamente la variazione di livello a breve termine è sinteticamente rappresentata dal grafico di dispersione di Figura 43. Questo grafico ha in ascissa i valori di livello misurati ed in ordinata i valori di livello previsti dal modello. I punti concentrati intorno alla bisettrice indicano prestazioni decisamente buone, confermate dal confronto diretto tra valori misurati e previsti mostrato in Figura 44 per alcuni eventi di piena.

Date le buone prestazioni del modello, si è valutato anche il contributo dei dati di livello del fiume come variabili descrittive dello stato di saturazione del bacino. In Figura 45 sono riportati i diagrammi di dispersione tra i valori previsti e quelli misurati per il livello del fiume nella sezione di Venzone quando vengono usati come dati di input (a) nessun dato di livello, (b) il valore di livello a $T-4$, (c) i valori di livello da $T-4$ a $T-2$. Dal confronto con la Figura 43 è chiaro che, tanta più informazione si toglie sullo stato di saturazione del bacino, tanto peggiori diventano le prestazioni del modello.

8.3 Previsione del livello a lungo termine (fino a 10 ore)

I risultati ottenuti con il modello a breve termine hanno suggerito la possibilità di estendere l'orizzonte di previsione del modello neurale in modo da renderlo adatto ad una funzione di early warning per la protezione dalle piene. Le prestazioni del modello tarato, valutate per valore crescente dell'ampiezza

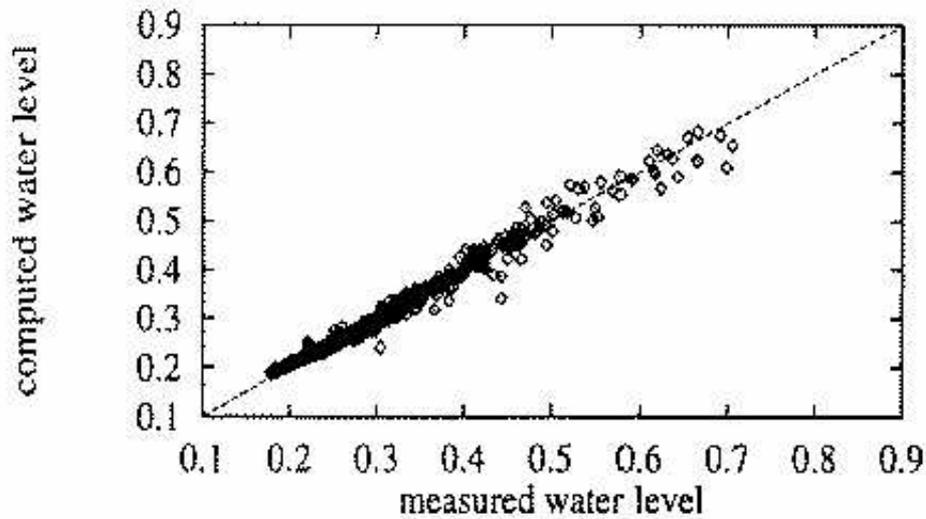


Figura 43: Diagramma di dispersione dei valori di livello calcolati con il modello neurale e misurati. La bisettrice rappresenta ottimo accordo tra previsione e dato.

dell'orizzonte di previsione, hanno mostrato un sensibile peggioramento delle prestazioni del modello per orizzonte temporale superiore alle 5 ore. L'analisi dei dati ha dimostrato che questo valore limite per l'orizzonte di previsione corrisponde al ritardo minimo nella produzione del deflusso, e quindi ad un limite fisico di significatività delle informazioni di input rispetto al valore di output da calcolare. I risultati ottenuti per il modello operante in modalità predittiva con orizzonte temporale pari a 1, 3 e 5 ore sono mostrati in Figura 46. I risultati sono soddisfacenti e suggeriscono che modelli neurali, tarati sulla base di serie idrometriche e pluviometriche rese disponibili in continuo dal sistema di telerilevamento, potrebbero diventare strumenti di utile supporto per la gestione del rischio idraulico nel bacino del Tagliamento.

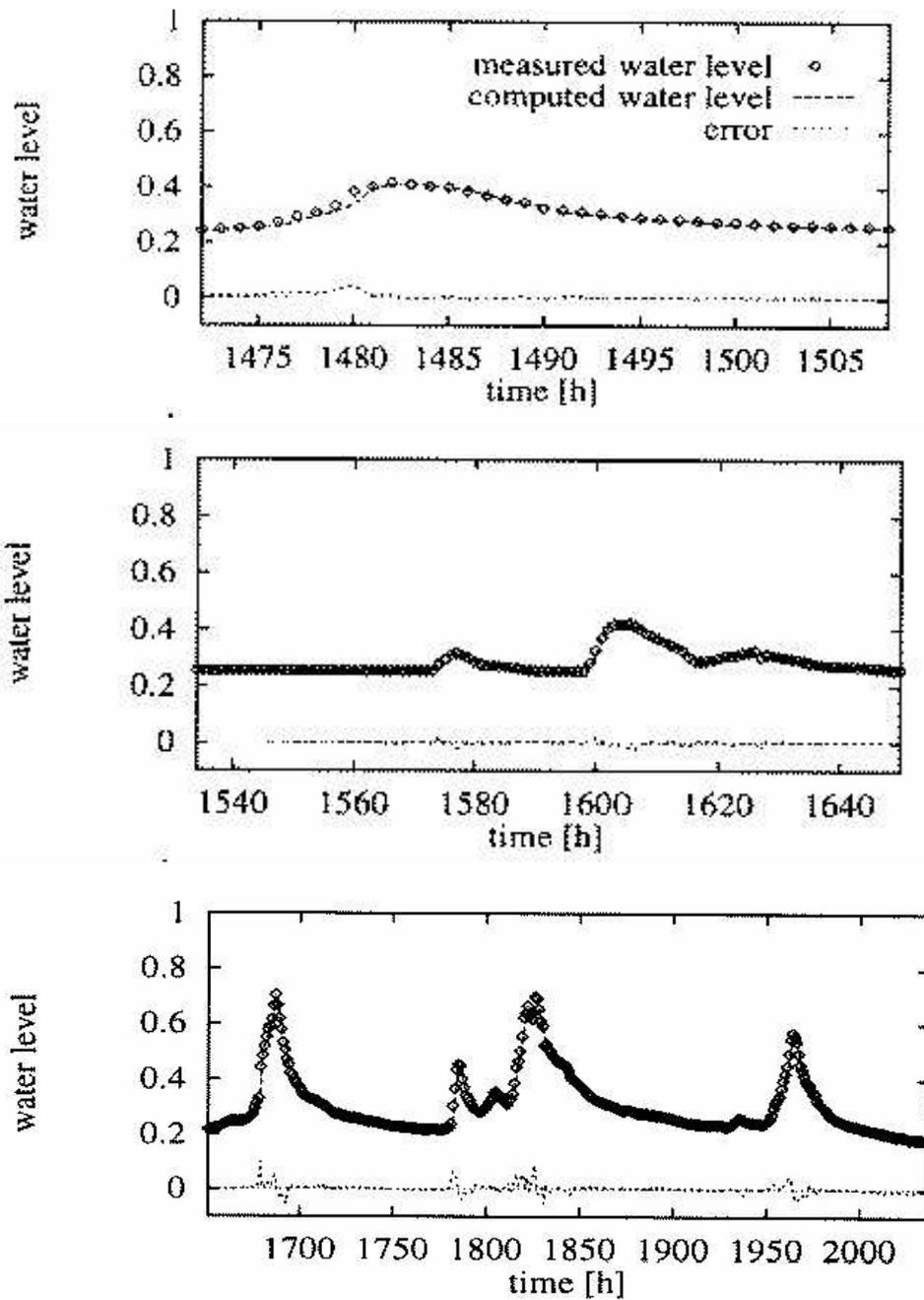


Figura 44: Serie temporale misurata (simboli) e prevista dal modello neurale per tre eventi di piena di diversa entità. Il valore del livello è scalato tra minimo e massimo presenti nel data base.

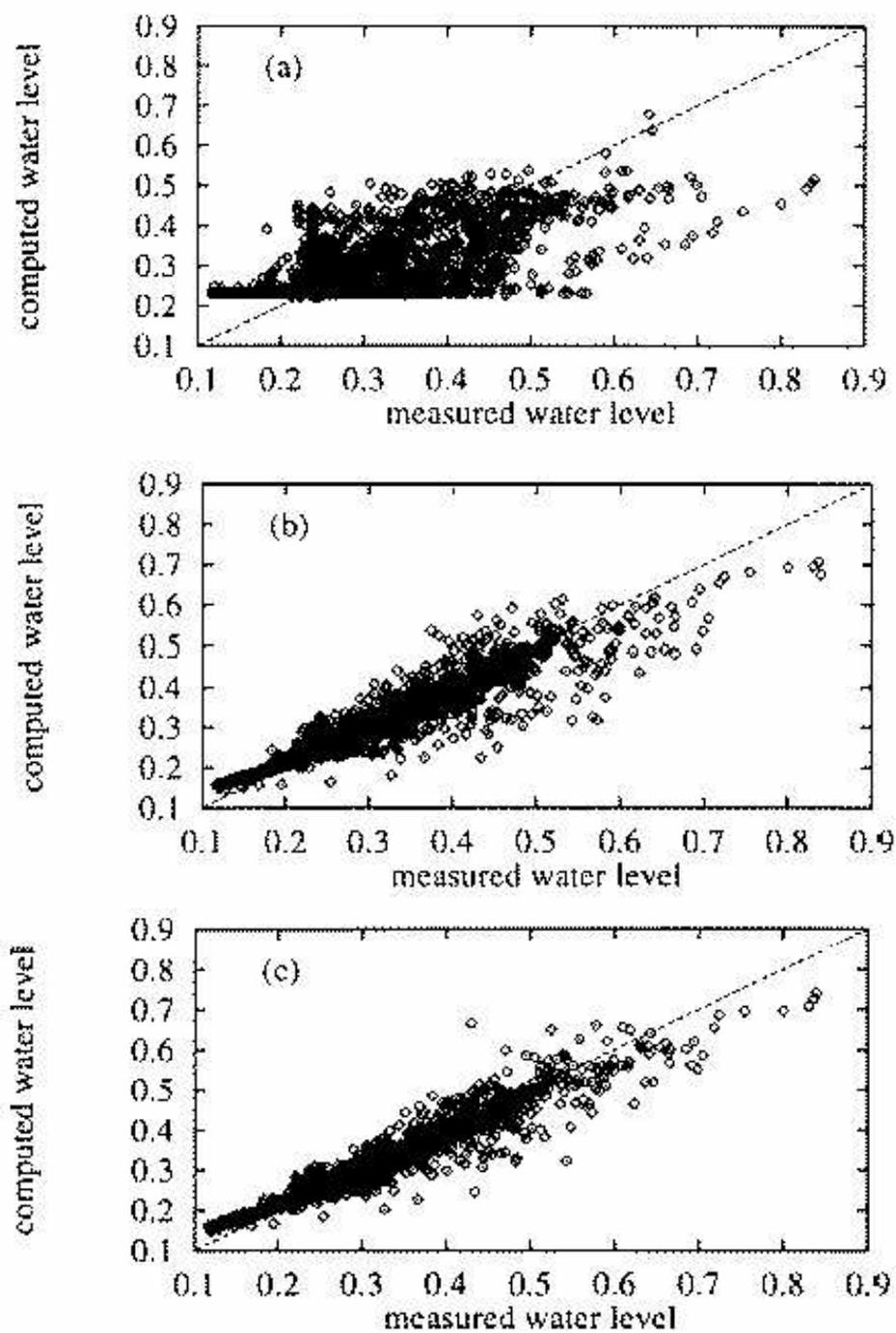


Figura 45: Effetto della scelta degli input del modello neurale sulle previsioni di livello: (a) nessuna informazione di livello precedente; (b) livello a T-4; (c) livello a T-4, T-3 e T-2.

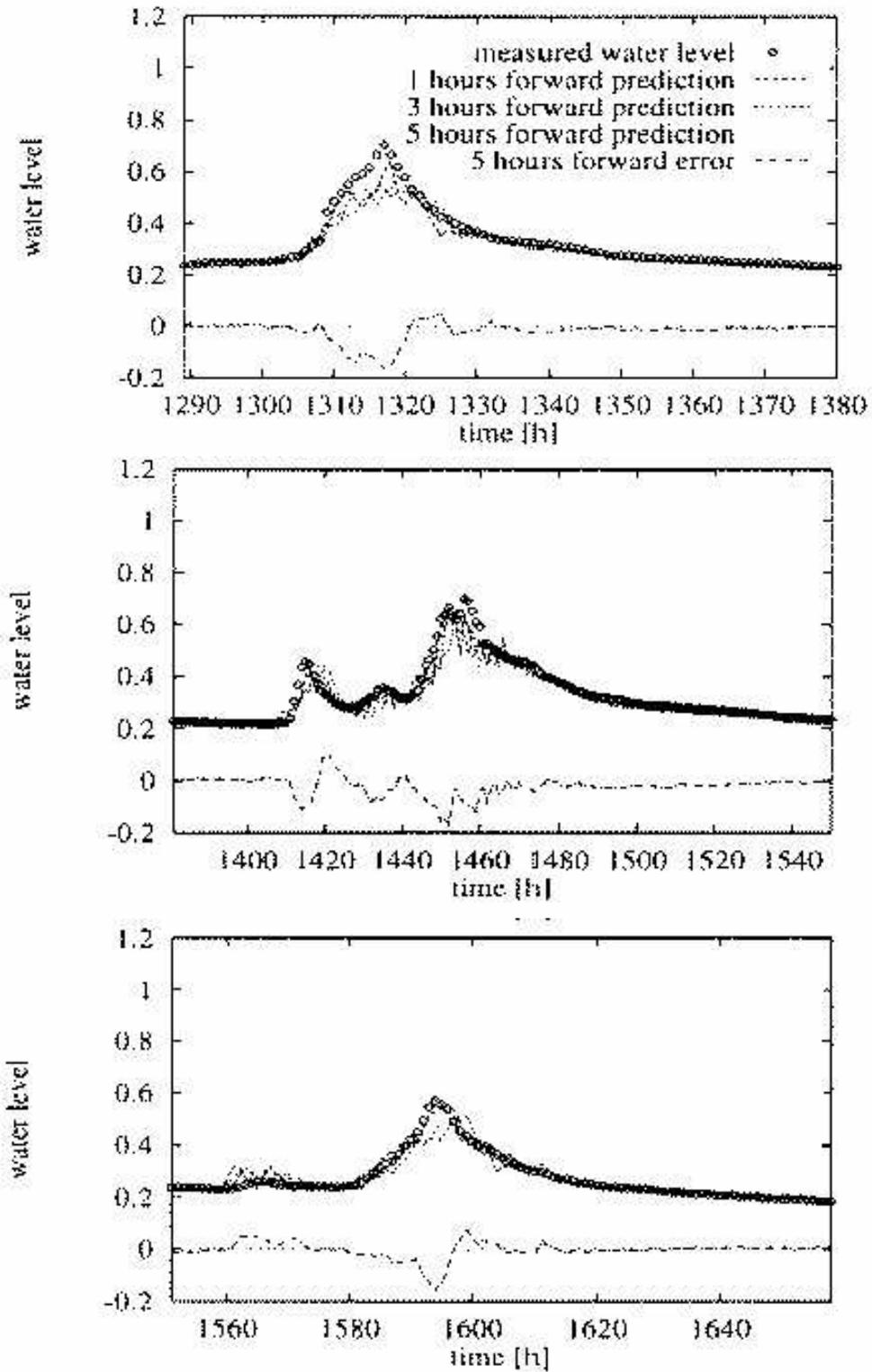


Figura 46: Confronto tra livello misurato (simboli) e previsione del modello neurale 1,3 e 5 ore in avanti per tre diversi eventi di piena. Il valore del livello è scalato tra minimo e massimo valore presenti nel data base.

Riferimenti bibliografici

- [1] P. Andreussi, (1999), "I rischi ambientali del fiume Arno", TEA-Tecnologie Energetiche ed Ambientali, PISARICERCHE, Pisa.
- [2] L. C. Brown and T. O. Barnwell, (1987), The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. EPA, Athens, Georgia
- [3] M. Campolo (1995), Dispersione di inquinanti in sistemi fluviali: modelli stazionari e transitori, Tesi di laurea, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Chimiche, Università degli Studi di Udine
- [4] M. Campolo, P. Andreussi, and A. Soldati, (1999), "River flood forecasting with a Neural Network Model", *Water Resour. Res.*, **35**, 4, 1191-1197.
- [5] M. Campolo, A. Soldati, and P. Andreussi, (1999), "Forecasting river flow rate during low flow periods using neural networks", *Water Resour. Res.*, **35**, 11, 3547-3552.
- [6] M. Campolo, P. Andreussi and A. Soldati, (2002), "Water quality control in the river Arno", *Water Research*, **36**, 2674-2681.
- [7] M. Campolo, A. Soldati and P. Andreussi, (2003), " Artificial neural network approach to flood forecasting in the River Arno", *Hydrol. Sci. J.*, **48**, 381-398.
- [8] A. Nardini, R. Soncini Sessa, M. Bacci (1990), Inquinamento fluviale: realizzazione e uso di modelli matematici. Uno studio di caso sull'Arno, Giunta regionale toscana, Marsilio Editori
- [9] J. C. Rutherford (1994), River mixing, NIWA Ecosystems National Institute of Water and Atmospheric Research Hamilton, New Zeland, John Wiley and Sons
- [10] A. Soldati, M. Campolo and P. Andreussi, (2001), "Neural network river flow forecasting for optimal management of water resources at a basin scale", *Terra*, **5**, 36-41.
- [11] A. Soldati, M. Campolo and P. Andreussi, (2001), "Possibili procedure per la gestione ottimale delle risorse idriche del bacino del fiume Arno", *Ingegneria Ambientale*, **11/12**, 574-582.
- [12] F. Stoch, S. Paradisi, M. Buda Dancevich (1992), Carta ittica del Friuli Venezia Giulia, Ente Tutela Pesca del Friuli Venezia Giulia, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia
- [13] F. Stoch, M. Buda Dancevich, S. Paradisi, F. Desio (1995), Mappaggio Biologico di qualità dei corsi d'acqua della provincia di Udine Cooperativa OIKOS Studi Ambientali, Provincia di Udine
- [14] D.Lgs. 11 maggio 1999 n.152
- [15] <http://www.adbve.it>
- [16] <http://www.digilander.libero.it>
- [17] <http://www.epa.gov>
- [18] <http://www.pensemara.vee.it>
- [19] <http://www.tagliamento.org>
- [20] <http://www.tesoro.it>
- [21] <http://www.ud.camcom.it>

A Dati di qualità delle acque

Fiume Tagliamento - Forni di Sopra - sorgente - 2000													
Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	3.1	3.2	5.4	9.1	11.2	13.7	13.5	12.4	12.7		5.8	6.4
Solidi sospesi	mg/l	1	0.4	0.4	5	1.8	0.8	2	40.2	2		182	1.6
pH		7.71	7.85	7.83	8.07	8.06	7.98	8.06	8.16	8		7.74	8.07
O2	O2 mg/l	9.1	11.3	9.5	9.6	9.1	9.5	8.3	8.9	10.2		11.6	9
BOD5	mg/l	1.7	2	0.6	1.2	0.3	1	0.7	0.2	2.1		2.4	0.3
COD	mg/l	4	4	4	4	4	4	4	8	4		4	4
Cloruri	mg/l	4.7	5.2	5.3	2.7	3.3	3.6	2.3	3	3		2.1	3.05
SO4	mg/l	492	588	532	456	520	708	573	487	620		370	410
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	< 0,04	< 0,04	0.04	0.04	0.04	< 0,04	< 0,04	0.05	< 0,04		0.3	0.04
N NO2	mg/l	0.0015	< 0,0015	< 0,0015	0.0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015			0.005	< 0,0015
N NO3	mg/l	0.03	0.45	0.56	0.47	0.5	0.43	0.45	0.51	0.4		0.35	0.45
N totale	mg/l	0.43	0.47	0.63	0.53	0.59	0.43	0.48	0.61	0.5		0.41	0.48
Idrocarburi	mg/l	a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a
MBAS	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
As	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		1	< 1
Cd	µ g/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1
Cr	µ g/l	< 1	< 1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	1		1	< 1
Hg	µ g/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1
Ni	mg/l	2	1	< 1	10	6	10	5	4	6		1	1
Pb	µ g/l	1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	1	< 1	< 1		4	2
Cu	µ g/l	1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	1	1	2		2	1
Zn	µ g/l	12	4	< 1	5	5	5	12	34	13		8	13
Conducibilità	µ S/cm	1080	1110	1076	941	962	1175	1144	935	1152		857	909
Durezza (CaCO3)	mg/l	668	624	688	510	624	752	760	580	770		485	588
Coliformi totali	ufc/100 ml	5	6	1	800	50	200	63	700	30		4	10
Coliformi fecali	ufc/100 ml	0	0	0	59	29	45	30	80	18		2	2
Streptococchi fecali	ufc/100 ml	0	0	0	22	3	44	18	56	54		0	2
E. coli	ufc/100 ml	0	0	0	58	28	37	20	60	18		2	0
Salmonelle		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
Aeromonas hydrophila	ufc/100 ml	0	0	0	8	5	3	35	150	0		0	2
IBE (Cl. Qualità)				2		2				5	5		

Fiume Tagliamento - Tolmezzo - ponte Avons - 2000

Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	0	4	7.7	10.9	12.2	15.2	15.1	13.8	12.8		7.3	8.1
Solidi sospesi	mg/l	6	3.2	1.2	29.8	8.4	8.6	14.4	15	1.2		126	5.4
pH		8.04	8.28	8.33	8.22	8.33	8.33	8.37	8.05	8.33		7.63	8.14
O2	O2 mg/l	14.4	13.1	11.5	9.9	10.1	10	9.6	9.6	12.2		11.9	9.2
% saturazione O2	%	98	105	91	87	93	104	98	98	123		98	81
BOD5	mg/l	3	3.4	1.2	1.8	0.9	2.4	1.2	1.1	3.5		2	0.4
COD	mg/l	4	4	4	4	4	12	4	4	4		6	4
Cloruri	mg/l	1.6	1.9	2	1.4	1.4	2.3	1.55	1.3	2.7		1.6	1.2
SO4	mg/l	376	418	320	120	159	362	198	196	340		151	155
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	< 0,04	< 0,04	0.08	0.04	0.08	< 0,04	< 0,04	0.05	< 0,04		0.3	0.04
N NO2	mg/l	0.0037	0.0037	0.006	0.0015	0.0015	0.0037	0.004	0.0015	0.0037		0.54	0.59
N NO3	mg/l	0.51	0.57	0.48	0.7	0.7	0.63	0.66	0.66	0.5		0.54	0.59
N totale	mg/l	0.51	0.6	0.6	0.81	0.8	0.64	0.72	0.73	0.61		0.61	0.7
Idrocarburi	mg/l	a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a
MBAS	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
As	µg/l	1	< 1	< 1	1	1	< 1	1	< 1	< 1		1	1
Cd	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1
Cr	µg/l	3	1	< 1	1	1	< 1	< 1	< 1	1		< 1	< 1
Hg	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1
Ni	mg/l	10	1	< 1	4	3	5	2	2	3		2	1
Pb	µg/l	37	< 1	1	1	1	2	2	< 1	1		6	2
Cu	µg/l	5	1	1	4	1	1	1	1	1		2	1
Zn	µg/l	101	37	7	20	8	7	8	28	1		9	14
Conducibilità	µS/cm	856	851	648	431	483	772	555	533	790		501	557
Durezza (CaCO3)	mg/l	508	332	460	230	264	476	320	304	450		320	344
Coliformi totali	ufc/100 ml	500	3000	2000	1500	800	4000	2000	3000	500		320	700
Coliformi fecali	ufc/100 ml	18	1000	600	320	160	600	300	400	160		200	650
Streptococchi fecali	ufc/100 ml	160	2000	400	146	82	110	100	160	84		20	130
E. coli	ufc/100 ml	8	800	400	300	100	400	90	800	150		70	460
Salmonelle		0	0	0	0	0	0	1	1	0		0	0
Aeromonas hydrophila	ufc/100 ml	25	400	0	50	15	10	62	800	200		40	50
IBE (Cl. Qualità)													

Fiume Tagliamento - Amaro, casello ferroviario - 2000

Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	6.1	8.9	14.5	12.1	12.6	18.6	15.4	16.9	15.8		7.3	8.5
Solidi sospesi	mg/l	14	26	10	21.6	6.6	57	7.6	20.4	60		174	24
pH		7.07	7.5	7.73	8	8	8.02	8.03	8.04	7.59		7.85	8.07
O2	O2 mg/l	10.9	6.7	8.8	9.6	9.3	8.5	8.9	8.6	7.1		11.9	8.8
% saturazione O2	%	87	60	72	92	88	93	91	91	74		103	77
BOD5	mg/l	20	21	14	2.1	5.3	5.1	5.1	0.4	6.9		3.1	0.8
COD	mg/l	90	56	48	16	8	36	32	12	22		28	12
Cloruri	mg/l	22.3	24.7	22.1	3.4	4.6	6.1	6.5	2.6	14.1		1.7	2
SO4	mg/l	415	466	377	169	193	372	221	197	395		144	177
P PO4	mg/l	< 0,02	0.1	0.1	< 0,02	< 0,02	0.05	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	0.04	0.04	< 0,02	< 0,02	0.03	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,0
2 N NH4	mg/l	1	0.94	0.47	0.16	0.19	0.35	0.5	0.05	0.4		< 0,04	0.04
N NO2	mg/l	0.018	0.072	0.018	0.0037	0.0037	0.0075	0.01	0.0037	0.012		< 0,0015	0.0015
N NO3	mg/l	0.59	0.61	0.28	0.72	0.7	0.62	0.56	0.6	0.24		0.58	0.93
N totale	mg/l	1.42	1.7	0.81	0.92	0.75	0.96	0.63	0.71	0.3		0.64	1.15
Idrocarburi	mg/l	a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a
MBAS	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
As	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	1	1	< 1		1	1
Cd	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1
Cr	µg/l	1	1	1	1	1	1	< 1	< 1	1		1	< 1
Hg	µg/l	1	1	< 0,1	1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1		< 0,1	< 0,1
Ni	mg/l	2	2	< 1	4	5	7	2	4	4		4	1
Pb	µg/l	2	2	< 1	< 1	1	4	1	< 1	2		4	1
Cu	µg/l	3	3	3	1	1	1	2	2	2		2	1
Zn	µg/l	22	60	8	12	5	5	6	17	2		7	25
Conducibilità	µS/cm	995	1009	975	506	550	827	630	545	962		469	556
Durezza (CaCO3)	mg/l	532	536	492	285	308	484	344	312	545		324	336
Coliformi totali	ufc/100 ml	30000	30000	28000	30000	30000	150000	80000	6000	70000		400	1200
Coliformi fecali	ufc/100 ml	10000	15000	2600	4000	4500	90000	60000	1500	9000		400	550
Streptococchi fecali	ufc/100 ml	380	3000	9000	2000	750	1000	1500	500	640		35	120
E. coli	ufc/100 ml	2000	3000	1400	3900	2500	5300	4400	210	4000		400	510
Salmonelle		0	0	0	0	0	1	1	0	0		0	0
Aeromonas hydrophila	ufc/100 ml	100	100	0	10	390	0	400	2000	0		80	150
IBE (Cl. Qualità)						8		8		11			11

Fiume Tagliamento - Ospedaletto, presa Cons, Ledra - 2000

Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	2.4	7.7	11.6	12.3	12.1	17.1	12.8	15.3	12.1		7.9	9.2
Solidi sospesi	mg/l	2.6	4.6	2.4	40	24.4	13.6	6.6	17.6	0.4		150	34.8
pH		7.88	8.1	8.16	8.18	8.1	8.08	8.05	7.85	7.96		7.9	8.1
O2	O2 mg/l	13.8	11.5	10.1	9.9	11.4	9.5	9.9	9.3	10.8		11.1	9
% saturazione O2	%	101	100	96	94	113	96	95	94	104		99	81
BOD5	mg/l	2.4	3.3	1.7	1.4	2.8	3.2	1.8	1.1	4		2.1	0.3
COD	mg/l	4	4	8	8	4	28	4	4	4		6	4
Cloruri	mg/l	4.6	5.1	5.5	3.2	3.3	4.2	3.4	3.1	4.5		3.1	2.2
SO4	mg/l	158	164	142	100	115	176	112	113	158		75	86
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	0.05	0.16	0.16	0.04	0.08	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0.05		< 0,04	0.08
N NO2	mg/l	0.0037	0.0037	0.0015	0.0015	0.0015	0.0037	0.0015	0.0015	0.0015		< 0,0015	0.0015
N NO3	mg/l	0.6	0.64	0.55	0.71	0.6	0.63	0.65	0.64	0.55		0.91	0.58
N totale	mg/l	0.65	0.81	0.75	0.77	0.73	0.63	0.71	0.69	0.63		1.13	0.64
Idrocarburi	mg/l	a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a
MBAS	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
As	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1
Cr	µg/l	1	1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	1		1	< 1
Hg	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1
Ni	mg/l	1	< 1	< 1	8	8	3	1	2	2		1	< 1
Pb	µg/l	1	4	1	1	1	< 1	1	< 1	1		2	1
Cu	µg/l	2	1	1	1	4	< 1	1	1	2		1	1
Zn	µg/l	22	23	17	12	11	2	4	16	2		4	10
Conducibilità	µS/cm	536	540	512	414	469	570	475	459	549		381	404
Durezza (CaCO3)	mg/l	296	224	288	215	252	320	262	272	285		252	256
Coliformi totali	ufc/100 ml	1500	10000	10000	1600	2500	12000	2500	800	40000		500	2500
Coliformi fecali	ufc/100 ml	52	250	40	200	280	1400	400	300	4000		300	450
Streptococchi fecali	ufc/100 ml	140	216	140	62	16	72	180	90	125		78	170
E. coli	ufc/100 ml	15	20	16	57	260	156	144	160	1600		300	380
Salmonelle		0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
Aeromonas hydrophila	ufc/100 ml	27	70	0	20	35	15	45	200	2000		700	100
IBE (Cl. Qualità)													

Fiume Tagliamento - Latisana - ponte ferroviario - 2000

Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	7.3	9.5	11.6	15.1	16	21.9	20.3	17.3	18.9		9.1	9.8
Solidi sospesi	mg/l	3	3.6	2.6	9	6.4	5.6	2.4	1.2	5.6		583	51.4
pH		7.7	7.89	8.03	8.05	7.96	8.1	7.99	8.06	7.96		7.82	8.04
O2	O2 mg/l	10.7	11.1	10.5	10.1	9.1	9.9	8.8	8.7	9.9		8.2	10.8
% saturazione O2	%	88	94	96	99	91	112	95	93	103		71	96
BOD5	mg/l	1.5	1.9	0.9	4	0.3	3.3	1.2	1.2	1.9		1.6	0.3
COD	mg/l	4	4	4	4	4	8	4	4	6		6	4
Cloruri	mg/l	5	4.5	4.8	3.8	4.4	4.6	4.7	3.4	4.3		3.3	2.8
SO4	mg/l	106	113	113	102	108	109	105	102	110		76	90
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	< 0,04	0.04	0.04	0.04	0.04	< 0,04	< 0,04	0.05	< 0,04		0.3	0.08
N NO2	mg/l	0.0037	0.006	0.009	0.006	0.009	0.012	0.012	0.0037	0.012		0.006	0.0037
N NO3	mg/l	1.59	1.7	1.43	1.15	1.2	1.44	1.46	1.35	1.41		0.96	1.05
N totale	mg/l	1.6	1.78	1.5	1.27	1.3	1.45	1.51	1.53	1.57		1.16	1.16
Idrocarburi	mg/l	a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a
MBAS	mg/l	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02
As	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1		< 1	< 1
Cr	µg/l	< 1	< 1	1	1	1	< 1	< 1	< 1	1		1	< 1
Hg	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1
Ni	mg/l	2	1	< 1	10	6	10	5	4	6		1	1
Pb	µg/l	1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	1	< 1	< 1		4	2
Cu	µg/l	1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	1	1	2		2	1
Zn	µg/l	12	4	< 1	5	5	5	12	34	13		8	13
Conducibilità	µS/cm	529	515	522	489	495	519	520	495	521		395	442
Durezza (CaCO3)	mg/l	296	208	304	260	272	296	296	280	295		292	280
Coliformi totali	ufc/100 ml	100	1000	1200	800	200	100	300	3000	4000		900	800
Coliformi fecali	ufc/100 ml	40	26	12	150	80	56	150	1000	500		200	170
Streptococchi fecali	ufc/100 ml	28	24	7	60	28	4	23	90	7		30	70
E. coli	ufc/100 ml	25	13	7	18	28	7	25	800	450		70	170
Salmonelle		0	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0
Aeromonas hydrophila	ufc/100 ml	15	50	30	0	25	26	25	1500	300		100	340
IBE (Cl. Qualità)													

TAGLIAMENTO - Sorgente - 2001

parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	4.3	5.7		6	10.3	12.1	11.1	14.9	8.2	10.8	4.6	5
Solidi sospesi	mg/l	1.2	0.2		39.4	2.6	1.2	2.4	3.4	1	3	1	1.2
pH		8.14	8.13		8.02	8.12	8.04	7.79	8.05	7.81	8.22	8.12	8.14
O2	mg/l	8.9	11.1		9.9	10.2	10.4	10.1	8.5	11	12.1	10.7	10.7
O2 % sat.	%	96	101		84	102	98	101	86	103	119	94	92
BOD5	mg/l	0.5	1.1		0.1		0.9	0.4	0.5	0.3	2.8	0.3	0.7
COD	mg/l	4	<4		4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Cloruri	mg/l	2.5	2.9		3.2	2.2	1.8	2.2	2.1	2.52	2.09	2.5	2.37
SO4	mg/l	445	490.7		305	445	450	552	540	606	776	623	671
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0.02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02		< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0.02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	< 0,04	< 0,04		< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
N NO2	mg/l	< 0,0015	< 0,0015		< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	0.0015	0.0015	0.0015	< 0,0015
N NO3	mg/l	0.37	0.43		0.38	0.46	0.41	0.46	0.53	0.33	0.31	0.31	0.53
N totale	mg/l	0.39	0.49		0.4	0.5	<0,10	0.6	0.62	0.4	0.43	0.38	0.64
Idrocarb.	mg/l	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a
MBAS	mg/l	<0.02	<0.02		<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
As	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cr	µg/l	1	< 1		2	< 1	< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Hg	µg/l	< 0.5	< 0.5		< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
Ni	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pb	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cu	µg/l	< 1	< 1		< 1		1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1
Zn	µg/l	19	< 1		< 1		5	4	< 1	< 1	48	8	6
Conducibilità	µS/cm	949	1023		780	908	993	1090	1170	1190	1405	1215	1250
Durezza (CaCO3)	mg/l	620	751.7		450	540	652	666	773	766	954	945	858
Coliformi totali		15	9		9	10	175	1200	100	10	15	250	8
Coliformi fecali		9	8		6	8	80	125	54	0	12	60	1
E. coli		4	4		1	2	9	20	16	0	10	55	1
Salmonelle		assenti	assenti		assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti
IBE (Cl. Qualità)					I	I			I		I		

Gestione Integrata risorse idriche bacino montano fiume Tagliamento

TAGLIAMENTO - Tolmezzo, Ponte Avons - 2001

parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	6.3	6.8		8.5	10.5	12.4	14.4	15.2	8.6	10.6	3.6	4.3
Solidi sospesi	mg/l	3.2	0.2		19.8	8.2	6.8	7.8	5.6	1.8	2.4	1.4	0.8
pH		8.2	8.33		8.03	8.24	8.21	8.05	8.31	7.98	8.4	8.29	8.37
O2	mg/l	9.5	11.3		10.1	11.3	12	10.2	9.3	11.7	12.2	11.9	11.8
O2 % sat.	%	98	99		94	105	116	101	85	106	116	94	94
BOD5	mg/l	0.4	1.2		0.1	2.9	2.1	1.3	0.3	1.5	2.7	0.4	0.5
COD	mg/l	4	<4		4	4	4	4	<4	<4	4	<4	<4
Cloruri	mg/l	1.7	2.3		1.4	2.2	1	1.5	1.2	1.19	1.76	1.42	1.16
SO4	mg/l	188	291.2		185	140	200	205	314	282	306	303	354
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02		0.02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	<0,02	<0,02		0.03	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
N NH4	mg/l	<0,04	<0,04		0.05	<0,04	<0,04	0.04	0.06	0.04	0.04	0.08	0.04
N NO2	mg/l	<0,0015	<0,0015		0.0015	0.015	<0,0015	0.004	0.0037	0.0015	0.0015	0.005	<0,0015
N NO3	mg/l	0.55	0.61		0.56	0.58	0.64	0.76	0.73	0.53	0.47	0.5	0.73
N totale		0.58	0.7		0.62	0.6	<0,10	0.82	0.84	0.6	0.6	0.61	0.85
Idrocarb.	mg/l	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a
MBAS	mg/l	<0,02	<0,02		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
As	μ g/l	< 1	< 1		< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd	μ g/l	< 1	< 1		< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cr	μ g/l	1	< 1		2		< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Hg	μ g/l	< 0,5	< 0,5		< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ni	μ g/l	< 1	< 1		< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pb	μ g/l	< 1	< 1		< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cu	μ g/l	< 1	< 1		< 1		1	< 1	2	< 1	2	< 1	< 1
Zn	μ g/l	14	8		< 1		3	7	1	< 1	23	3	3
Conducibilità	μ S/cm	581	660		532	420	568	584	775	710	715	695	790
Durezza (CaCO3)	mg/l	358	376.6		310	217	302	311	464	413	408	526	467
Coliformi totali		750	500		1000	220	720	1000	220	1500	480	2000	500
Coliformi fecali		350	370		600	150	10	250	184	800	150	1400	300
E. coli		350	370		200	100	10	25	140	550	100	1200	100
Salmonelle		presenti	assenti		assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	presenti	presenti	assenti
IBE (Cl. Qualità)				II		III			III		III		

TAGLIAMENTO - Amaro, casello ferroviario - 2001													
Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	8.3	9.3		9.3	10.3	12.4	14.5	14.1	13.8	13.2	7.4	9.1
Solidi sospesi	mg/l	1.4	2.8		7.2	6.2	2.5	3.8	4.6	3.8	5.6	9.2	
pH		7.99	7.92		7.75	8.01	7.63	7.77	7.98	7.62	7.87	7.86	7.95
O2	mg/l	8.9	10.2		10.6	10.4	10.6	9.6	9.6	9.2	10	9.1	8.3
O2 % sat.	%	96	91		95	98	101	95	97	88	96	82	74
BOD5	mg/l	2.4	6		3.2	1.8	3.3	5.2	1.4	9	9.4	6	14
COD	mg/l	4	16		8	<4	10	12	5	16	16	88	70
Cloruri	mg/l	4.5	6.5		3.4	2.2	4.9	4.7	1.9	12.15	14.3	20.4	22.08
SO4	mg/l	197	282		180	170	210	196	267	253	239	332	328
P PO4	mg/l	<0,02	<0,02		0.05	<0,02	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
P totale	mg/l	0	0.09		0.1	<0,02	0.06	0.04	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04
N NH4	mg/l	0.08	0.31		0.1	0.12	<0,04	0.35	0.08	0.62	0.43	1.24	0.47
N NO2	mg/l	0.004	0.009		0.0037	0.015	<0,0015	0.004	0.008	0.012	0.009	0.018	0.009
N NO3	mg/l	0.84	0.81		0.56	0.6	0.62	0.69	0.88	0.46	0.47	0.39	0.54
N totale		0.97	1.12		0.7	0.75	<0,10	1.37	1.1	n.r.	1.23	1.81	1.18
Idrocarb.	mg/l	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a
MBAS	mg/l	<0,02	<0,02		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
As	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cr	µg/l	2	< 1		3	< 1	< 1	1	< 1	1	1	1	2
Hg	µg/l	< 0,5	< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ni	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	1	1	< 1
Pb	µg/l	2	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cu	µg/l	< 1	< 1		< 1	1	< 1	< 1	< 1	< 1	2	< 1	2
Zn	µg/l	5	2		< 1	4	7	< 1	< 1	1	16	6	6
Conducibilità	µ S/cm	571	609		559	502	612	590	710	750	705	805	860
Durezza (CaCO3)	mg/l	340	360		320	257	317	306	391	387	342	534	416
Coliformi totali		5000	30000		2000	3000	6500	2000	2000	3000	2800	4000	5000
Coliformi fecali		1500	6000		700	700	300	700	1600	1800	500	2000	2000
E. coli		720	1000		600	100	0	300	600	1500	200	1800	1500
Salmonelle		presenti	assenti		assenti	assenti	assenti	assenti	assenti	presenti	assenti	presenti	assenti
IBE (Cl. Qualità)				IV		IV			IV		IV		

TAGLIAMENTO - Gemona, loc. Ospedaletto - 2001

Parametri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	7.1	9.8		10.4	13.3	11.3	13.6	13.2	12.5	10.8	7.7	9.3
Solidi sospesi	mg/l	9.4	2		16.8	4.8	2	5.2	1.2	2.2	2.6	2	1.4
pH		8.22	8.17		7.84	8.1	7.93	7.88	7.95	7.72	8.16	8.06	8.13
O2	mg/l	8.7	10.5		9.9	10.7	10.1	9.7	9.8	10.2	11.8	9.6	9.9
O2 % sat.	%	91	94		94	103	94	96	95	99	108	87	87
BOD5	mg/l	0.7	0.5		0.1	2.1	1.1	1	0.8	1.5	3.3	0.3	1.9
COD	mg/l	4	<4		4	<4	4	4	<4	<4	5	<4	4
Cloruri	mg/l	2.9	3.8		1.8	2.6	2.7	2.3	2	3.18	3.44	4.25	3.08
SO4	mg/l	0	140.1		37	61	117	106	146	141	119	143	151
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02		0.02	< 0,02	0.05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0.02	< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	< 0,02		0.03	< 0,02	0.05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0.02	< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	<0,04	<0,04		0.05	<0,04	<0,04	<0,04	0.04	0.12	0.08	0.04	0.08
N NO2	mg/l	<0,0015	<0,0015		0.0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	0.0037	0.0037	0.0015	0.0037	<0,0015
N NO3	mg/l	0.63	0.73		0.66	0.64	0.6	0.68	0.94	0.55	0.56	0.58	0.92
N totale		0.68	0.8		0.72	0.7	0	0.75	1.1	0.7	0.79	0.69	1.1
Idrocarb.	mg/l	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a
MBAS	mg/l	<0,02	<0,02		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
As	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cr	µg/l	1	< 1		3	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1	< 1	< 1
Hg	µg/l	< 0,5	< 0,5		< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Ni	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pb	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cu	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Zn	µg/l	11	4		< 1		1	4	< 1	< 1	5	1	4
Conducibilità	µ S/cm	397	440		308	350	471	441	530	520	490	475	515
Durezza (CaCO3)	mg/l	236	235.6		160	178	242	240	284	281	258	292	284
Coliformi totali		800	200		50	40	440	600	2000	480	4000	1800	300
Coliformi fecali		420	80		40	0	20	65	200	60	180	230	170
E. coli		100	80		30	0	20	10	180	45	130	220	100
Salmonelle		presenti	assenti		assenti	presenti	assenti						
IBE (Cl. Qualità)					II	III				III			III

TAGLIAMENTO - Latisana, ponte ferroviario - 2001													
Parmetri	unità	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Temp. acqua	°C	8	9.7		11.3	14.9	17.5	19.1	18.9	15.3	15.4	10.5	10.4
Solidi sospesi	mg/l	27	0.6		33.2	6	2.7	5.2	26.2	6.2	3.2	2.2	2
pH		8.14	8.01		7.82	8.06	7.91	7.7	7.8	7.63	8.17	8.05	8.07
O2	mg/l	11.1	11.2		10.6	9.8	9.4	9.5	9.3	7.9	11.1	10.2	10.6
O2 % sat.	%	95	101		104	97	96	103	101	79	110	91	95
BOD5	mg/l	2.2	1.7		2.3	1	1.5	2.4	2.1	0.7	2.8	1.4	0.9
COD	mg/l	4	<4		6	<4	5	6	<4	4	4	<4	4
Cloruri	mg/l	3.5	5.7		4.3	3.2	4	4.2	2.9	3.26	4.76	3.92	3.28
SO4	mg/l	97	130.3		100	110	100	101	99.2	98.57	101.77	112.2	108.89
P PO4	mg/l	< 0,02	< 0,02		0.03	< 0,02	0.02	0.02	0.02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
P totale	mg/l	< 0,02	0.05		0.05	< 0,02	0.03	0.03	0.02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
N NH4	mg/l	< 0,04	< 0,04		0.1	0.08	< 0,04	< 0,04	< 0,04	0.04	0.08	0.04	0.06
N NO2	mg/l	<0,0015	0.01		0.004	0.0015	<0,0015	0.007	0.0015	0.0015	0.006	0.007	<0,0015
N NO3	mg/l	1.09	1.99		0.86	0.96	1.5	1.47	1.57	1	1.26	1.18	1.78
N totale		1.14	2.05		1	1.09	1.96	1.6	1.6	1.1	1.61	1.35	1.92
Idrocarb.	mg/l	a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a
MBAS	mg/l	<0,02	<0,02		<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
As	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cd	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cr	µg/l	3	< 1		2		< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Hg	µg/l	< 0,1	< 0,1		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Ni	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Pb	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Cu	µg/l	< 1	< 1		< 1	< 1	1	2	< 1	< 1	< 1	< 1	1
Zn	µg/l	65	11		< 1	< 1	3	5	< 1	< 1	16	3	2
Conducibilità	µS/cm	442	482		456	466	503	508	495	495	515	465	495
Durezza (CaCO3)	mg/l	260	267.3		260	245	269	267	265	275	279	262	281
Coliformi totali		1000	280		210	80	3100	800	140	30	240	1200	600
Coliformi fecali		270	150		130	10	90	500	40	10	120	200	120
E. coli		130	50		45	8	0	200	20	5	60	88	100
Salmonelle		assenti	assenti		assenti								
IBE (Cl. Qualità)											IV		IV