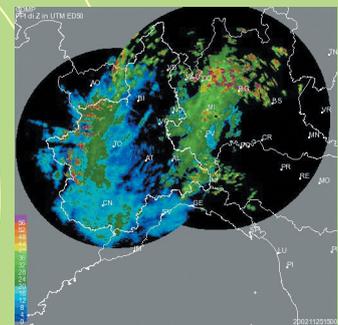


Sviluppo di un sistema di gestione dei rischi idrogeologici nell'area del Lago Maggiore

INTERREG IIIA Italia-Svizzera 2000-2006



Progetto e coordinamento generale:

Stefano Bovo, Secondo Barbero

Arpa Piemonte, Area Previsione e Monitoraggio Ambientale

Con la collaborazione di:

Mariella Graziadei, Monica Ponzone

Arpa Piemonte, Area Previsione e Monitoraggio Ambientale

Si ringraziano i numerosi autori, citati nei singoli capitoli,
che hanno reso possibile la realizzazione di questo lavoro

Progetto grafico e copertina:

Anna Torazza

Chroma - Torino

Fotoritocco e selezioni:

Rodolfo Suppo

Fuocofisso - Torino

La stampa è stata realizzata da:

Ages Arti Grafiche - Torino

Stampato su carta riciclata al 100% che ha ottenuto
il marchio di qualità ecologica - Ecolabel Europeo



ISBN 88-7479-018-x

L'Arpa Piemonte o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia
stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle
informazioni contenute in questo documento

La riproduzione è autorizzata citando la fonte

Finito di stampare nel mese di ottobre 2005

Arpa Piemonte

Area Previsione e Monitoraggio Ambientale

C.so Unione Sovietica, 216

10134 TORINO

Telefono 011.3168203

Fax 011.3181709

www.arpa.piemonte.it

Partecipanti al progetto



ARPA PIEMONTE

Area Previsione e Monitoraggio Ambientale
C.so Unione Sovietica, 216
10134 TORINO



SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE DELLA SVIZZERA ITALIANA

Istituto di Scienze della Terra
Centro Studi Treveno, c.p. 72
6952 CANOBBIO



REGIONE LOMBARDIA

Unità Organizzativa Protezione Civile
Via Fara, 26
20124 MILANO



PROVINCIA DEL VERBANO CUSIO OSSOLA

Settore Protezione Civile
Via dell'Industria, 25
28924 VERBANIA Fondotoce



UFFICIO FEDERALE DI METEOROLOGIA E CLIMATOLOGIA METEOSVIZZERA

via ai Monti della Trinità, 146
6605 LOCARNO MONTI



REGIONE PIEMONTE

Direzione Opere Pubbliche
C.so Marche, 79
10146 TORINO
Direzione Difesa Suolo
Via Petrarca, 44
10100 TORINO



REPUBBLICA E CANTONE DEL TICINO

Dipartimento del Territorio
Ufficio dei corsi d'acqua
Viale Franscini, 17
6501 BELLINZONA



REGISTRO ITALIANO DIGHE

Ufficio Idraulica
Via Curtatone, 3
00185 ROMA



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
Strada delle Cacce, 73
10135 TORINO



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Idraulica Trasporti e Infrastrutture Civili
C.so Duca degli Abruzzi, 24
10129 TORINO



POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Elettronica
Piazza L. Da Vinci, 32
20133 MILANO

| | Indice |
|--|--------|
|--|--------|

| | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 2 | Interconnessione dei sistemi osservativi | 3 |
| | 2.1 Integrazione sistemi radar meteorologici | 5 |
| | 2.2 Modalità di scambio dati meteorologici ed idrologici | 12 |
| 3 | La pianificazione di emergenza per l'esondazione del Lago Maggiore nella provincia del Verbano Cusio Ossola | 19 |
| | 3.1 Aspetti generali | 21 |
| | 3.2 Il piano intercomunale lacustre | 31 |
| 4 | I piani di emergenza comunali per il rischio idrogeologico e lacustre nella provincia di Varese | 39 |
| | 4.1 Ricerca storica ed analisi morfologica | 41 |
| | 4.2 Analisi urbanistica e valutazione della criticità dei centri abitati | 56 |
| | 4.3 La redazione dei piani di emergenza comunali ed intercomunali | 62 |
| 5 | La gestione dell'allarme per l'esondazione del Lago Maggiore nel Cantone Ticino con l'ausilio di un Sistema d'Informazione Territoriale | 71 |
| | 5.1 Dalla previsione meteorologica alla previsione di piena | 73 |
| | 5.2 Il sistema informativo per la gestione dell'allarme e la pianificazione dell'emergenza | 73 |
| 6 | La previsione dei livelli del Lago Maggiore | 79 |
| | 6.1 Il modello operativo del Centro Funzionale del Piemonte | 81 |
| | 6.2 Il modello operativo dell'Istituto di Scienze della Terra | 86 |
| | 6.3 Sviluppo di un modello distribuito di previsione | 94 |
| 7 | Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene | 109 |
| | 7.1 Aspetti generali | 111 |
| | 7.2 Metodologia e risultati per il Bacino del Maggia | 115 |
| | 7.3 Metodologia e risultati per il Bacino del Toce | 124 |



IL RUOLO DEI BACINI ARTIFICIALI NELLA FORMAZIONE DELLE PIENE

**Politecnico di Torino - Pierluigi Claps, Filippo Miotto, Francesco Laio -
(paragrafo 7.3)**

Registro Italiano Dighe - Alberto Petaccia - (paragrafo 7.3)

**Regione Piemonte - Giulia Bodrato, Roberto Del Vesco, Chiara Silvestro -
(paragrafo 7.1)**

**Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana - Markus Niggli,
Maurizio Pozzoni, Andrea Graf, Giorgio Salvadè - (paragrafo 7.2)**

7.3. METODOLOGIA E RISULTATI PER IL BACINO DEL TOCE

7.3.1. Premessa

Negli studi per la valutazione del rischio idrologico sul territorio si è tenuto conto, finora, solo marginalmente della presenza degli invasi artificiali nei bacini idrografici. In effetti, non appena si passa dal caso del singolo invaso a quello di un sistema di invasi, risulta estremamente complesso comporre un quadro congruente dal punto di vista probabilistico per la determinazione delle portate e dei volumi di piena in diverse sezioni della rete idrografica. Anche con riferimento all'effetto determinato dalla presenza di un singolo invaso, peraltro, l'impianto metodologico per la valutazione del rischio a valle non può dirsi chiaramente definito. Da un lato sembra abbastanza chiaro come la curva di frequenza dei picchi di piena possa essere ricalcolata a valle dell'invaso attraverso la valutazione "idraulica" dell'effetto di laminazione, con opportune ipotesi (o dati concreti) di legame tra il picco della piena ed il suo volume. Dall'altro, va considerato che il livello iniziale dell'invaso è esso stesso una variabile casuale, e che in tutti i casi di scarichi governati da paratoie non esiste un legame univoco tra livello e portata. Queste due ultime considerazioni lasciano ampi margini soggettivi al calcolo probabilistico dell'effetto di laminazione, anche con riferimento ad una sola diga.

Per quanto detto, dovendo procedere alla valutazione dell'effetto di una o più dighe sul rischio idrologico a valle, si potrebbe pensare a due distinti approcci al problema:

- tendere a rilevare in maniera semplificata e facilmente estensibile a grandi sistemi di dighe, l'impatto "oggettivo" di queste opere, indipendentemente dalla loro effettiva gestione. Questo sembra l'unico modo di includere gli invasi in programmi a vasta scala di valutazione del rischio di piena;
- rifarsi al fatto che la legislazione vigente consente ai gestori di operare "attivamente" per il controllo delle piene a valle, anche attraverso svassi preventivi (Direttiva P.C.M. 27 febbraio 2004). Tale opportunità apre il campo alla formulazione di metodi di ottimizzazione, associati alla previsione meteorologica, che consentano di orientare le decisioni operative assistendo gestori ed operatori di protezione civile nella fase di intervento sugli organi mobili. In questo quadro piuttosto articolato si sono inserite le attività del Politecnico di Torino e del Registro Italiano Dighe - Ufficio Idraulica, tese a definire, per quanto possibile, i termini del problema in un contesto "generale", non limitando la ricerca a soluzioni valide esclusivamente per il bacino e le dighe del Toce. Le fasi descritte nei paragrafi

che seguono si riferiscono essenzialmente al primo degli approcci proposti, alla fine del quale si possono definire margini di beneficio ottenibile per le aree poste a valle degli invasi.

7.3.2. Obiettivi relativi alla valutazione del rischio a valle delle dighe

La presenza nei bacini idrografici di uno o più invasi artificiali determina un effetto di attenuazione delle piene dovuto all'accumulo temporaneo che essi determinano su una parte del volume idrico transitante durante un evento di piena. Questo fenomeno, denominato effetto di laminazione, determina che in un sistema che contenga un invaso si verifichi una mitigazione dei rischi idrologici per i territori a valle. Ciò vale per un tratto più o meno lungo del corso d'acqua a valle, in relazione al fatto che il sottobacino sotteso dalla diga sia più o meno rilevante rispetto alle dimensioni del bacino complessivo.

Da un punto di vista idraulico, l'effetto di laminazione può essere ricondotto all'integrazione per via numerica dell'equazione di continuità dei serbatoi

$$q_e(t) - q_u(t, H) = \frac{dV(t, H)}{dt} \quad [7.3.1]$$

che fornisce la variazione di volume $V(t, H)$ in un invaso come differenza tra la portata in ingresso $q_e(t)$ e la portata in uscita Q_u dagli organi di scarico, la quale dipende anche dal livello idrico H nel serbatoio. Dall'integrazione della (7.3), si ricava il valore della portata al colmo in uscita $q_u(t, H)$ che, rapportato al corrispondente valore al colmo della portata in ingresso Q_e , fornisce il coefficiente di laminazione

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_e} \quad [7.3.2]$$

Dato l'idrogramma di piena in ingresso al serbatoio, le condizioni iniziali (livello H_0) e la geometria degli scarichi, se questi sono a soglia fissa, dall'integrazione della (7.3) si ottiene univocamente il valore di η . Se invece le luci di efflusso sono regolate da organi mobili, la loro manovra influenza sostanzialmente l'equazione (7.3), e possono determinarsi valori del coefficiente di laminazione molto variabili.

Una regola operativa generale, basata sulla normativa vigente fino alla citata Direttiva del 2004, prevede che la portata in uscita non debba mai superare la portata in ingresso durante gli eventi di piena. Nei serbatoi ad uso idroelettrico, ad esempio, in cui si ha la tendenza a mantenere il livello idrico nel serbatoio il più possibile prossimo al livello di massima regolazione, all'arrivo dell'onda di piena di solito si procede aprendo gradatamente le luci



di scarico (coinvolgendo nella procedura anche gli scarichi profondi) per mantenere il livello idrico costante il più a lungo possibile, ottenendo così una portata in uscita pari a quella in ingresso. Raggiunta eventualmente la completa apertura delle luci di scarico, se la portata continua a crescere si ha la laminazione vera e propria, secondo quanto descritto dalla relazione (7.3). In questo modo, però, si ottengono valori di η prossimi all'unità.

7.3.3. Caratteristiche fisiche degli invasi

Per procedere alla valutazione dell'effetto di laminazione sui territori a valle, è necessario individuare le caratteristiche degli invasi presenti nel bacino. Nella parte di progetto dedicata al "catasto delle opere" sono state determinate le caratteristiche idrauliche necessarie all'integrazione della (7.3): queste sono legate agli aspetti strutturali della singola opera e sono identificabili nella curva dei volumi di invaso e nella scala di efflusso degli scarichi. Questi ultimi sono in molti casi governati da paratoie, delle quali sono note le caratteristiche necessarie ai fini della definizione del comportamento idraulico.

Curva dei volumi di invaso

La curva altezze-volumi adottata è rappresentata dall'equazione in forma monomia

$$V = v1 \cdot H_{liv}^{m1} \tag{7.3.3}$$

in cui V indica il volume idrico presente nel serbatoio in corrispondenza del livello H_{liv} , questo ultimo misurato a partire dalla quota di minimo invaso. L'interpolazione dei dati osservati, al fine di ricavare i parametri $v1$ e $m1$, è condotta considerando tutto il campo di variazione delle altezze, ma imponendo la condizione che la curva teorica approssimi più accuratamente la parte in cui si trovano i volumi compresi tra la quota soglia dello scarico di superficie e la quota di massimo invaso.

Scala di efflusso degli scarichi

La scala di efflusso di uno scarico fornisce il legame intercorrente tra il carico idraulico sulla luce di scarico e la relativa portata esitata. Tenuto conto del fatto che le scale di efflusso di una luce di scarico (a battente od a stramazzo) sono individuate da relazioni tipo

$$q_u = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \tag{7.3.4}$$

funzione del coefficiente di efflusso μ , dell'area A della luce di scarico e del carico idraulico H , si può ridurre la (7.6) ad una legge di potenza data da

$$q_u = c \cdot H^n \tag{7.3.5}$$

in cui c rappresenta la portata uscente per un carico H sulla luce pari ad 1, ed n è un esponente pari a circa $3/2$ per scarichi a stramazzo e pari a circa $1/2$ per scarichi a battente, pur a fronte della variazione della geometria per diversi gradi di apertura. Le figure 7.12 e 7.13 mostrano le curve di efflusso di scarichi a battente e stramazzo regolati da paratoie, per diversi gradi di apertura delle stesse.

Figura 7.12. Scala di efflusso per uno scarico a battente al variare dell'apertura della luce di scarico

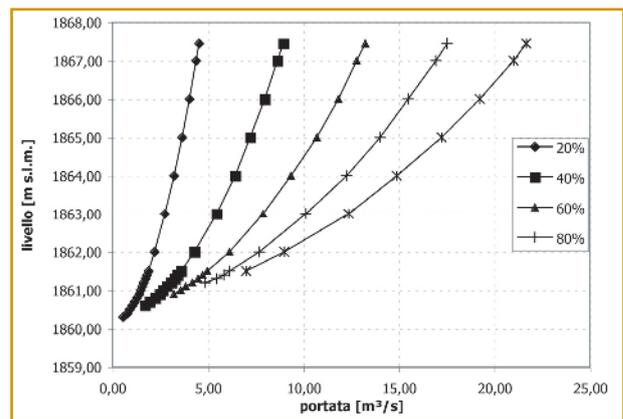
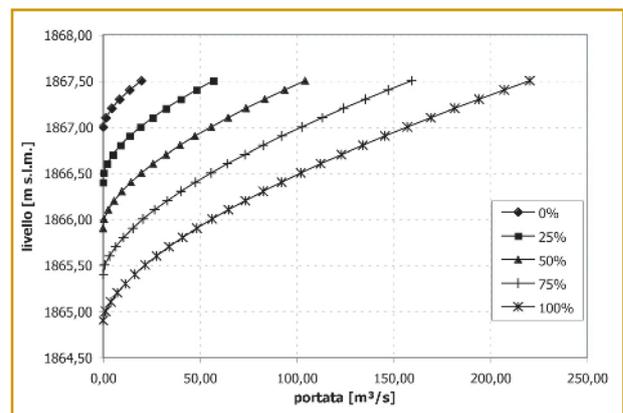


Figura 7.13. Scala di efflusso per uno scarico a stramazzo al variare dell'apertura della luce di scarico



Per il particolare problema esaminato si è scelto di operare solo con scarichi con funzionamento a stramazzo, senza possibilità di regolazione delle luci. Tuttavia, con opportune semplificazioni (Miotto, 2005) è possibile considerare il funzionamento di uno o più scarichi dotati di organi di regolazione (e quindi il funzionamento del serbatoio nel suo insieme) utilizzando sempre una legge di potenza sul modello della (7.7).

7.3.4. Schematizzazione del sistema di invasi

Nell'area considerata, il bacino del Fiume Toce, la valutazione dei benefici ottenibili tramite gli invasi sull'attenuazione

delle piene deriva dalla combinazione degli effetti di numerose dighe. Considerando anche il Lago Antrona, che è solo minimamente regolato, sono infatti 18 gli invasi presenti nel bacino. La configurazione di questo sistema è stata definita attraverso un GIS ed è riportata nella Tavola 7.1 fuori testo (inserita nel cd-rom allegato alla pubblicazione). La presenza di più di un invaso per sotto-bacino e l'incidenza di casi di dighe in serie pongono problemi non banali nelle fasi di determinazione probabilistica dell'effetto di laminazione. Per la schematizzazione del sistema si sono ricercate informazioni necessarie alle successive valutazioni idrologiche. In particolare si sono determinati parametri morfometrici dei bacini sottesi dalle dighe e si sono individuate sezioni di interesse, a valle delle stesse, nelle quali considerare gli effetti di laminazione (Tavole 7.3 e 7.4 fuori testo). Dovendo stabilire il grado di attenuazione delle piene anche in corrispondenza di queste sezioni, per esse si sono tracciati i bacini idrografici di competenza e definiti i relativi parametri necessari alla valutazione della piena "naturale" al picco.

La delimitazione dei bacini idrografici ed i relativi parametri morfometrici sono stati ricavati a partire dal modello digitale del terreno della Regione Piemonte, a maglia di 50 m di lato, attraverso procedure descritte in Viglione (2004).

7.3.5. Analisi idrologica

L'analisi idrologica attiene ai vari aspetti collegati alla determinazione dell'idrogramma di piena "di progetto".

Nella zona di interesse sono disponibili alcuni studi relativi agli estremi idrologici, effettuati negli ultimi anni. Lo studio qui utilizzato è quello di Villani (2003) denominato "VAPI Piemonte".

Analisi pluviometrica

Le caratteristiche climatiche dei bacini considerati sono rappresentate dalle curve di possibilità pluviometrica, che possono essere espresse in due diverse modalità. Riferendosi ai valori medi degli estremi pluviometrici, per le durate inferiori all'ora si adotta l'espressione:

$$\mu[h(d)] = \mu(I_0) \cdot \frac{d}{\left(1 + \frac{d}{d_c}\right)^\beta} \quad [7.3.6]$$

in cui $\mu(I_0)$ è la media dei massimi annuali dell'intensità di pioggia per durate d tendenti a zero, d_c rappresenta un tempo caratteristico del fenomeno e β è un coefficiente empirico. Per durate comprese tra 1 e 24 ore si adotta invece la legge monomia

$$\mu[h(d)] = a \cdot d^n \quad [7.3.7]$$

dipendente dai due parametri a (altezza di pioggia per $d=1$ ora) ed n . In tabella 7.3 sono riportati i valori dei parametri derivanti dal citato studio, mediati e compensati, per l'effetto di riduzione areale, sulle aree di interesse.

Tabella 7.3 Parametri delle curve di possibilità pluviometrica

| INVASO | PLUVIOMETRIA | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------------|------------------------|--------------------------------|-----------|------------------------------------|
| | durate inferiori ad 1 ora | | | durate comprese tra 1 e 24 ore | | |
| | parametro | | $\mu(I_0)$ [mm/ora] | parametro | esponente | $\mu[h(t=24 \text{ ore})]$ [mm] |
| β [-] | d_c [ore] | a [mm] | | n [-] | | |
| Agaro | 0.45 | 0.05 | 84.29 | 22.40 | 0.51 | 113.79 |
| Agrasina | 0.49 | 0.07 | 93.43 | 29.40 | 0.50 | 122.08 |
| Alpe Cavalli | 0.44 | 0.06 | 68.71 | 21.30 | 0.56 | 118.42 |
| Alpe Larecchio | 0.49 | 0.07 | 93.43 | 29.40 | 0.50 | 122.08 |
| Busin Inferiore | 0.48 | 0.06 | 91.87 | 24.00 | 0.46 | 114.89 |
| Campliccioli | 0.45 | 0.08 | 65.79 | 20.40 | 0.56 | 121.15 |
| Camposecco | 0.45 | 0.08 | 65.79 | 20.40 | 0.56 | 121.15 |
| Ceppo Morelli | 0.46 | 0.09 | 62.08 | 20.60 | 0.56 | 115.93 |
| Devero-Codelago | 0.45 | 0.05 | 84.29 | 22.40 | 0.51 | 113.79 |
| Lago Antrona | 0.45 | 0.08 | 67.04 | 21.30 | 0.56 | 122.60 |
| Lago Cingino | 0.45 | 0.08 | 65.79 | 20.40 | 0.56 | 121.15 |
| Lago d'Avino | 0.43 | 0.04 | 79.00 | 21.50 | 0.54 | 115.16 |
| Morasco | 0.48 | 0.06 | 89.65 | 22.50 | 0.46 | 115.01 |
| Obersee | 0.47 | 0.06 | 89.85 | 22.80 | 0.47 | 116.01 |
| Quarazza | 0.46 | 0.10 | 62.23 | 21.70 | 0.55 | 117.48 |
| Sabbione | 0.48 | 0.06 | 89.65 | 22.50 | 0.46 | 115.01 |
| Val Toggia | 0.49 | 0.06 | 92.66 | 23.90 | 0.44 | 115.01 |
| Vannino | 0.47 | 0.06 | 89.85 | 22.80 | 0.47 | 116.01 |



Tabella 7.4 Fattore di crescita delle portate indice al variare del tempo di ritorno

| INVASO | FATTORE DI CRESCITA K_T | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| | Tempo di Ritorno T [anni] | | | | | | | | | | | |
| | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 1000 | 2000 |
| Agaro | 1.29 | 1.72 | 2.33 | 2.77 | 3.10 | 3.36 | 4.19 | 5.02 | 5.51 | 6.12 | 6.94 | 7.77 |
| Agrasina | 1.37 | 1.72 | 2.09 | 2.33 | 2.51 | 2.66 | 3.16 | 3.74 | 4.11 | 4.59 | 5.26 | 5.94 |
| Alpe Cavalli | 1.28 | 1.81 | 2.65 | 3.25 | 3.69 | 4.03 | 5.09 | 6.15 | 6.76 | 7.54 | 8.59 | 9.64 |
| Alpe Larecchio | 1.37 | 1.72 | 2.09 | 2.33 | 2.51 | 2.66 | 3.16 | 3.74 | 4.11 | 4.59 | 5.26 | 5.94 |
| Busin Inferiore | 1.29 | 1.72 | 2.34 | 2.81 | 3.17 | 3.47 | 4.40 | 5.33 | 5.87 | 6.56 | 7.49 | 8.42 |
| Campliccioli | 1.29 | 1.81 | 2.62 | 3.20 | 3.63 | 3.96 | 4.99 | 6.03 | 6.63 | 7.39 | 8.42 | 9.45 |
| Camposecco | 1.29 | 1.81 | 2.62 | 3.20 | 3.63 | 3.96 | 4.99 | 6.03 | 6.63 | 7.39 | 8.42 | 9.45 |
| Ceppo Morelli | 1.28 | 1.83 | 2.71 | 3.34 | 3.79 | 4.15 | 5.25 | 6.34 | 6.98 | 7.78 | 8.87 | 9.96 |
| Devero-Codelago | 1.28 | 1.73 | 2.38 | 2.86 | 3.21 | 3.49 | 4.36 | 5.23 | 5.74 | 6.38 | 7.25 | 8.12 |
| Lago Antrona | 1.30 | 1.80 | 2.56 | 3.11 | 3.52 | 3.84 | 4.83 | 5.82 | 6.40 | 7.13 | 8.12 | 9.11 |
| Lago Cingino | 1.29 | 1.81 | 2.62 | 3.20 | 3.63 | 3.96 | 4.99 | 6.03 | 6.63 | 7.39 | 8.42 | 9.45 |
| Lago d'Avino | 1.29 | 1.75 | 2.41 | 2.89 | 3.25 | 3.54 | 4.43 | 5.32 | 5.84 | 6.49 | 7.38 | 8.26 |
| Morasco | 1.20 | 1.86 | 3.05 | 3.83 | 4.37 | 4.80 | 6.10 | 7.41 | 8.17 | 9.13 | 10.42 | 11.72 |
| Obersee | 1.22 | 1.82 | 2.88 | 3.58 | 4.08 | 4.47 | 5.67 | 6.87 | 7.56 | 8.44 | 9.63 | 10.83 |
| Quarazza | 1.28 | 1.82 | 2.67 | 3.27 | 3.71 | 4.06 | 5.13 | 6.19 | 6.81 | 7.60 | 8.66 | 9.72 |
| Sabbione | 1.13 | 1.99 | 3.58 | 4.54 | 5.22 | 5.75 | 7.37 | 8.98 | 9.93 | 11.11 | 12.73 | 14.34 |
| Val Toggia | 1.31 | 1.69 | 2.17 | 2.53 | 2.82 | 3.07 | 3.9 | 4.73 | 5.23 | 5.86 | 6.71 | 7.57 |
| Vannino | 1.22 | 1.82 | 2.88 | 3.58 | 4.08 | 4.47 | 5.67 | 6.87 | 7.56 | 8.44 | 9.63 | 10.83 |

Analisi idrometrica

L'analisi idrometrica effettuata da Villani (2003) porta alla determinazione della portata al colmo di piena per un bacino qualsiasi tramite l'espressione sintetica

$$Q_T = \mu(Q) \cdot K_T \quad [7.3.8]$$

Per un periodo di ritorno T prestabilito, Q_T è ottenuta come prodotto tra la portata indice, assunta pari al valor medio $\mu(Q)$, ed il "fattore di crescita" K_T , valore della grandezza di progetto (adimensionalizzata rispetto al valore indice) relativa al dato periodo di ritorno.

Il fattore di crescita K_T è stato ottenuto per ogni bacino e per i periodi di ritorno di interesse usando la procedura VAPI. I risultati ottenuti (tabella 7.4) possono essere confrontati con quelli ottenuti da De Michele e Rosso (2000), i quali hanno definito ampie regioni omogenee in termini di fattore di crescita delle portate. I citati autori riportano, per il territorio delle Alpi e Pre-Alpi Occidentali, un valore del fattore di crescita per $T=500$ anni pari a 7,57.

Per il calcolo della piena indice sono disponibili in Villani (2003) diverse relazioni empiriche (ad esempio di tipo regressivo) e procedimenti a base geomorfoclimatica. La scelta è caduta sul secondo approccio, in cui i fattori fisici e climatici in gioco sono combinati in una relazione derivata dalla formula razionale (Rossi e Villani, 1994):

$$\mu(Q) = C_f \cdot A \cdot K_A \cdot \mu(I(t_R)) / 3.6 \quad [7.3.9]$$

dove C_f rappresenta il coefficiente probabilistico di piena, A l'area, $\mu(I(t_R))$ il valore atteso dell'intensità media di pioggia estrema annua in una durata critica t_R , valore che è corretto in base ad un fattore di riduzione areale k_A , riportato in tabella 7.3, funzione dell'area del bacino in esame e della durata del fenomeno considerato. Per valutazioni espresse in Rossi e Villani (1994) il tempo critico è assunto pari al tempo di ritardo t_R del bacino.

L'applicazione di altre relazioni, specie di tipo empirico, ha evidenziato notevoli incongruenze, presentando valori dei coefficienti idrometrici molto differenti in bacini attigui, in cui non si evidenziano invece sostanziali differenze dal punto di vista climatico o di uso del suolo. La formula razionale (7.11) fornisce valori con variazione più limitata, ragionevolmente compatibili con le caratteristiche dei singoli bacini sottesi (si veda la tabella 7.5).

Il tempo di ritardo è stato stimato usando la relazione

$$t_R = \frac{1.25 \cdot \sqrt{A}}{3.6 \cdot C} \quad [7.3.10]$$

in cui C rappresenta la celerità media di propagazione dell'onda di piena. Nel caso della procedura VAPI, la celerità viene fornita stimandola in base alle caratteristiche morfologiche di ogni bacino in esame.

Tabella 7.5 Caratteristiche principali dei bacini sottesi dagli invasi e relativo valore della portata indice. Sono stati evidenziati gli invasi non di competenza del Registro Italiano Dighe

| INVASO | Coefficiente di Afflusso C_f | Celerità C [m/s] | Area Bacino A [km ²] | Tempo di Ritardo t_R [ore] | Fattore di Riduzione Areale K_A | Media Intensità di Pioggia $\mu [I_A(t_R)]$ [mm/s] | Portata Indice $\mu (Q)$ [m ³ /s] | Coefficiente Udometrico u [(m ³ /s)/km ²] |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--|--|---|
| Agaro | 0.24 | 2.07 | 10.98 | 0.56 | 0.974 | 27.42 | 19.55 | 1.78 |
| Agrasina | 0.24 | 1.30 | 17.83 | 1.130 | 0.962 | 27.69 | 31.66 | 1.78 |
| Alpe Cavalli | 0.24 | 1.35 | 23.74 | 1.250 | 0.951 | 19.29 | 29.03 | 1.22 |
| Alpe Larecchio | 0.24 | 1.30 | 3.02 | 0.460 | 0.992 | 34.53 | 6.90 | 2.28 |
| Busin Inferiore | 0.24 | 1.55 | 2.54 | 0.36 | 0.994 | 36.44 | 6.13 | 2.42 |
| Campliccioli | 0.24 | 1.47 | 35.19 | 1.40 | 0.931 | 17.58 | 38.40 | 1.09 |
| Camposecco | 0.24 | 1.41 | 4.08 | 0.50 | 0.990 | 27.03 | 7.28 | 1.78 |
| Ceppo Morelli | 0.24 | 1.82 | 121.00 | 2.10 | 0.811 | 14.87 | 97.25 | 0.80 |
| Devero | 0.24 | 2.02 | 25.38 | 0.87 | 0.945 | 22.77 | 36.40 | 1.43 |
| Lago Antrona | 0.24 | 1.46 | 42.67 | 1.55 | 0.919 | 17.54 | 45.85 | 1.07 |
| Lago Cingino | 0.24 | 1.41 | 3.06 | 0.43 | 0.992 | 28.57 | 5.78 | 1.89 |
| Lago d'Avino | 0.24 | 1.61 | 5.32 | 0.50 | 0.987 | 25.85 | 9.04 | 1.70 |
| Morasco | 0.24 | 1.58 | 35.26 | 1.30 | 0.930 | 19.48 | 42.59 | 1.21 |
| Obersee | 0.24 | 1.55 | 2.63 | 0.36 | 0.993 | 35.87 | 6.25 | 2.37 |
| Quarazza | 0.24 | 1.76 | 25.81 | 1.00 | 0.945 | 21.68 | 35.26 | 1.37 |
| Sabbione | 0.24 | 1.61 | 14.37 | 0.82 | 0.968 | 24.73 | 22.93 | 1.60 |
| Val Toggia | 0.24 | 1.55 | 10.32 | 0.72 | 0.976 | 26.38 | 17.71 | 1.72 |
| Vannino | 0.24 | 1.65 | 11.94 | 0.73 | 0.973 | 26.79 | 20.75 | 1.74 |

7.3.6. Valutazione della capacità di laminazione degli invasi

In questo paragrafo si esaminano in maniera sintetica ed il più possibile omogenea, le “prestazioni” degli invasi del Toce in termini di capacità di laminazione delle piene. Dal punto di vista idrologico, la ricerca dell’omogeneità nel procedimento per la determinazione dell’entità dell’effetto di laminazione si concretizza nella definizione di un’onda di forma costante quale sollecitazione sul sistema.

La procedura qui seguita prevede il calcolo dell’idrogramma in ingresso in base ad una metodologia individuata da Fiorentino (1985), basata sulle caratteristiche delle curve di riduzione dei colmi di piena, intese come relazioni tra la massima portata media in D ore e la portata di picco di un evento di piena, al variare di D. In questa sede si sono apportate modifiche alla metodologia, al fine di poter definire un’onda di tipo simmetrico, descritta dall’equazione

$$q_e(t) = Q_T \cdot \left[(1 + 2b \cdot |t|)^c - 2b \cdot c \cdot |t| \cdot (1 + 2b \cdot |t|)^{c-1} \right] \quad [7.3.11]$$

ottenuta a partire da una curva di riduzione originariamente proposta in NERC (1975)

$$\varepsilon_D = (1 + b \cdot D)^c \quad [7.3.12]$$

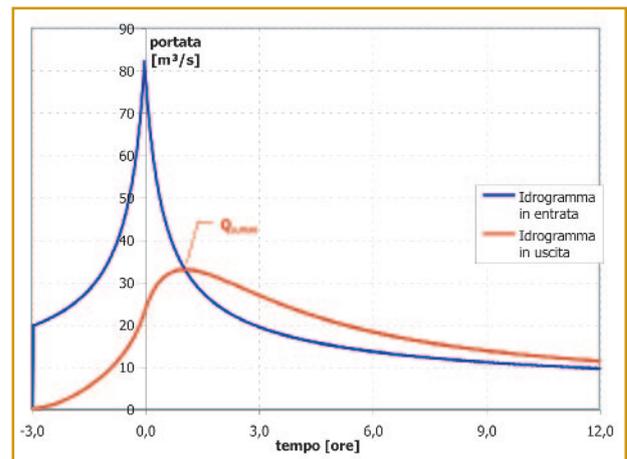
in cui D=durata (ampiezza, in ore, della finestra entro cui si calcola il massimo della portata media per fissato D)

$$b = \frac{1}{2 \cdot t_R} \quad [7.3.13]$$

$$c = 1 - n \quad [7.3.14]$$

con n esponente della curva di possibilità pluviometrica in forma monomia. Questo idrogramma sarà considerato, nella fase crescente, solo a partire da un valore di soglia pari alla piena indice, come rappresentato in figura 7.14.

Figura 7.14. Esempio di idrogrammi in ingresso, basati sull’equazione 7.14, ed in uscita, dopo la laminazione





Si considera, quindi, che la portata in ingresso che determina l'entrata in funzione dello scarico di superficie corrisponda alla portata indice. Dato che questa, in teoria, dovrebbe corrispondere alla media delle portate massime annuali (per come è stata determinata), si ipotizza che tale valore transiti attraverso l'invaso senza essere laminato venendo, ad esempio, smaltita attraverso altre tipologie di scarichi. Le portate che superano tale valore verrebbero poi evacuate dallo scarico di superficie, ottenendo la laminazione dell'onda di piena.

Le ipotesi fatte sulle condizioni di funzionamento del serbatoio sono: (i) utilizzo ai fini della laminazione dei soli scarichi di superficie, considerando le luci completamente aperte, se dotate di paratoie; (ii) livello iniziale lago pari alla quota inferiore della soglia dello scarico utilizzato. Durante un reale fenomeno di piena si dovrebbe operare in maniera tale da non superare mai il livello di massimo invasore, aprendo opportunamente gli scarichi presenti nello sbarramento. In questo caso, tuttavia, per semplificare la valutazione, si permette il superamento teorico del livello di massimo invasore durante l'evento, con il solo scopo di porre delle condizioni di riempimento dell'invaso totalmente svincolate da ogni manovra.

Fatte queste ipotesi, per una data configurazione dell'onda in ingresso si può fissare una condizione omogenea di riferimento per la laminazione, utile a valutare l'effetto combinato di dighe diverse in uno schema complesso.

Nel caso in cui gli scarichi di superficie siano costituiti da una soglia sfiorante e da una o più soglie munite di paratoie, si considera il livello iniziale coincidente con la quota soglia dello scarico ad efflusso libero, mentre le paratoie sono considerate chiuse e in tale posizione rimangono per tutta la durata del fenomeno di piena. Nel caso in cui gli scarichi di superficie siano tutti muniti di organi di regolazione, si considera il livello idrico alla quota soglia dello scarico posto più in alto (identificato normalmente con il primo scarico di superficie), mentre tutte le altre paratoie sono considerate chiuse dall'inizio alla fine del fenomeno di piena. Operando in tale maniera, in pratica si considera funzionante un solo scarico di superficie per ogni invasore, a meno di casi come Agrasina, Morasco, Sabbione e Vannino (vedi tabella 7.5), nei quali le particolari caratteristiche costruttive del singolo invasore rendono irrealistico esitare le portate di un evento eccezionale con un singolo scarico, anche ammettendo teoricamente il superamento del franco.

La determinazione del coefficiente di laminazione risulta fortemente legata alla dimensione e alla forma dell'onda di piena in ingresso. Infatti, variando la portata al colmo ed i

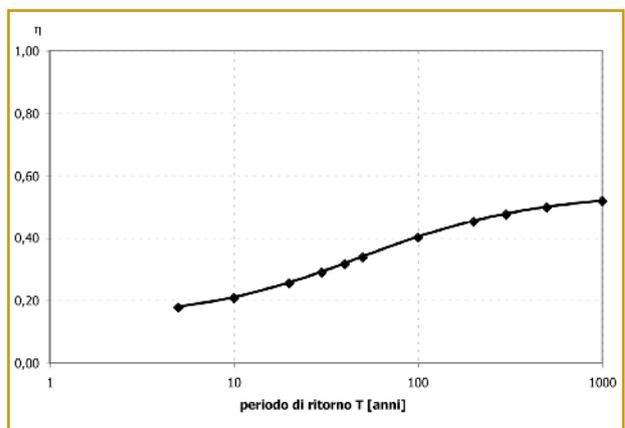
relativi volumi sottesi dall'onda, oltre alla loro distribuzione intorno al picco, si possono ottenere, a parità di condizioni di funzionamento dell'invasore, valori anche notevolmente diversi per il coefficiente di laminazione. Si può osservare, però, che esiste un fattore di scala tra risposta di un invasore e forma dell'onda in ingresso. In effetti sollecitando un gruppo di invasi con onde di piena diverse, si nota che la risposta che se ne ottiene, in termini di coefficiente di laminazione, varia sensibilmente, ma in modo tale da mantenere circa invariato l'ordine gerarchico delle entità delle attenuazioni al picco (Miotto et al., 2005b).

In altri termini, se a valle dell'invasore 1 si ritrova un coefficiente di laminazione maggiore rispetto all'invasore 2 quando è sollecitato da un'onda di progetto di una data forma, in base a quanto riportato nel citato lavoro, lo stesso avviene quando il tipo di sollecitazione cambia.

Nell'ambito di uno studio orientativo del fenomeno, mirato a stabilire le potenzialità di laminazione dei singoli invasi in relazione ad un territorio molto ampio, la scelta della forma dell'onda di piena "di progetto" potrebbe quindi passare in secondo piano.

Come detto, l'idrogramma in uscita è ottenuto risolvendo numericamente l'equazione di continuità (7.3). Esprimendo nella (7.4) la portata al picco dell'idrogramma in ingresso in relazione al periodo di ritorno, $Q_{e,T}$, il coefficiente di laminazione viene reso anch'esso dipendente dal periodo di ritorno (figura 7.15).

Figura 7.15. Esempio di variazione del coefficiente di laminazione con il tempo di ritorno



Nella tabella 7.6 sono raccolti tutti i coefficienti di laminazione ottenuti per i vari invasi, per diversi periodi di ritorno. In essa sono riportati sia i valori ottenuti al variare di T (ipotizzando, comunque, una capacità illimitata di invasore) che, nelle ultime due colonne, i valori limite del coefficiente di laminazione ed il rispettivo tempo di ritorno T, imponendo che l'idrogramma in ingresso corrisponda a quello che deter-

Tabella 7.6 Coefficienti di laminazione ottenuti per ogni singolo invaso. I valori evidenziati implicano il superamento del livello di massimo invaso

| INVASO | Configurazione | Coefficiente di laminazione $\eta(T)$ | | | | | | Valore Limite | |
|-----------------|-----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------|-------|
| | | Tempo di Ritorno T | | | | | | $\eta(T)$ | T |
| | | 10 | 50 | 100 | 200 | 500 | 1000 | | |
| Agaro | 1°sc.sup. | 0.207 | 0.336 | 0.401 | 0.453 | 0.498 | 0.518 | 0.522 | 1347 |
| Agrasina | 1°sc.sup. | 0.966 | 0.972 | 0.974 | 0.976 | 0.977 | 0.978 | 0.792 | 4 |
| Agrasina | 1°+2°sc.sup. | 0.951 | 0.974 | 0.976 | 0.977 | 0.979 | 0.980 | 0.977 | 150 |
| Agrasina | 3°sc.sup. | 0.975 | 0.979 | 0.981 | 0.983 | 0.985 | 0.986 | 0.984 | 444 |
| Alpe Cavalli | 1°sc.sup. | 0.373 | 0.615 | 0.642 | 0.655 | 0.668 | 0.678 | 0.655 | 193 |
| Alpe Cavalli | 2°sc.sup. | 0.377 | 0.619 | 0.645 | 0.659 | 0.672 | 0.681 | 0.683 | >2000 |
| Alpe Larecchio | 1°sc.sup. | 0.235 | 0.311 | 0.350 | 0.394 | 0.446 | 0.476 | 0.562 | >2000 |
| Busin Inferiore | 1°sc.sup. | 0.076 | 0.111 | 0.127 | 0.145 | 0.167 | 0.184 | 0.244 | >2000 |
| Campliccioli | 1°sc.sup. | 0.481 | 0.729 | 0.747 | 0.761 | 0.777 | 0.789 | 0.796 | >2000 |
| Camposecco | 1°sc.sup. | 0.450 | 0.689 | 0.707 | 0.719 | 0.732 | 0.744 | 0.715 | 84 |
| Ceppo Morelli | 1°sc.sup. | 0.992 | 0.996 | 0.997 | 0.997 | 0.998 | 0.998 | 0.996 | 48 |
| Devero | 1°sc.sup. | 0.214 | 0.349 | 0.412 | 0.459 | 0.499 | 0.516 | 0.551 | >2000 |
| Lago Antrona | 1°sc.sup. | 0.707 | 0.822 | 0.831 | 0.840 | 0.851 | 0.860 | 0.848 | 32 |
| Lago Cingino | 1°sc.sup. | 0.490 | 0.721 | 0.736 | 0.748 | 0.762 | 0.772 | 0.754 | 343 |
| Lago d'Avino | 1°sc.sup. | 0.221 | 0.357 | 0.421 | 0.466 | 0.499 | 0.513 | 0.517 | 1153 |
| Morasco | 1°sc.sup. | 0.425 | 0.660 | 0.679 | 0.691 | 0.705 | 0.713 | 0.582 | 18 |
| Morasco | 1°sup. + 1°all. | 0.159 | 0.326 | 0.519 | 0.653 | 0.707 | 0.719 | 0.553 | 110 |
| Obersee | 1°sc.sup. | 0.148 | 0.263 | 0.310 | 0.351 | 0.390 | 0.409 | 0.402 | 755 |
| Quarazza | 1°sc.sup. | 0.958 | 0.969 | 0.971 | 0.975 | 0.985 | 0.993 | 0.980 | 272 |
| Sabbione | 1°sc.sup. | 0.086 | 0.159 | 0.190 | 0.219 | 0.251 | 0.269 | 0.115 | 18 |
| Sabbione | 1°sup. + 1°all. | 0.034 | 0.067 | 0.093 | 0.123 | 0.171 | 0.207 | 0.100 | 120 |
| Val Toggia | 1°sc.sup. | 0.134 | 0.193 | 0.226 | 0.260 | 0.300 | 0.327 | 0.365 | >2000 |
| Vannino | 1°sc.sup. | 0.284 | 0.533 | 0.581 | 0.604 | 0.621 | 0.631 | 0.561 | 68 |
| Vannino | 1° + 2° sc.sup. | 0.204 | 0.372 | 0.442 | 0.529 | 0.603 | 0.633 | 0.657 | >2000 |

mina il massimo invaso nel serbatoio.

I valori riportati indicano che in nove invasi l'apertura di un solo scarico di superficie non è sufficiente a smaltire la portata con periodo di ritorno $T = 500$ anni, pur a fronte del raggiungimento del livello di massimo invaso. Ovviamente, in tutti i casi esaminati esistono altri scarichi, che garantiscono il rispetto della normativa vigente in tema di smaltimento della portata di progetto la quale, è bene precisarlo, non è necessariamente confrontabile con quella qui considerata. Va poi precisato che gli invasi che si trovano nelle condizioni appena descritte risultano di fatto gestiti in modo da interagire con gli eventi di piena con efficienza certamente maggiore di quanto ipotizzato nelle simulazioni presentate. Queste rappresentano delle condizioni nelle quali una piena può, del tutto teoricamente ed anche poco realisticamente, transitare per la diga senza che venga fatta alcuna manovra. Questa condizione rappresenta però un elemento di valutazione del quale non si può eccipire l'arbitrarietà relativa al tipo di manovra effettuato.

Nel caso in cui con l'ipotesi di calcolo proposta risulti superato il massimo invaso, si è ripetuta la simulazione considerando aperto un ulteriore scarico di superficie, se presente, oppure uno degli scarichi di alleggerimento. In

queste situazioni, si è comunque operato ipotizzando scarichi completamente aperti all'inizio del fenomeno di piena e per tutto l'evento, e livello idrico iniziale nel serbatoio posto alla quota della soglia dello scarico più in basso tra quelli considerati aperti.

7.3.7 Valutazione degli effetti di laminazione a distanze crescenti dagli invasi

Valutazioni qualitative

Nel paragrafo precedente è stato valutato per ogni invaso il coefficiente di laminazione al variare del periodo di ritorno, valore che ha validità solo in corrispondenza dell'invaso o per un breve tratto a valle dello stesso. Allontanandosi dall'invaso, infatti, gli apporti idrici dovuti alla parte di bacino compresa tra la posizione dell'invaso e la sezione fluviale di valle riducono sempre più l'effetto iniziale di laminazione, man mano che si procede verso valle.

Risulta pertanto necessario quantificare tale riduzione affinché si possano evidenziare le zone effettivamente suscettibili di attenuazione del rischio di piena. In letteratura sono state proposte alcune metodologie semplificate per questa



quantificazione che, se non permettono la valutazione numerica del coefficiente di laminazione, forniscono un indice qualitativo dell'attenuazione dell'onda di piena.

Un indice di questo tipo è quello definito come *Flood Attenuation by Reservoirs and Lakes* (FARL), proposto da Scarrott et al. (1999) in base alle relazioni intercorrenti tra la superficie del lago, l'area del bacino imbrifero sotteso dall'invaso e l'area del bacino sotteso dalla sezione di valle di interesse. L'indice FARL è calcolato a partire da un primo indice

$$\alpha = \left(t - \sqrt{r} \right)^w \quad [7.3.15]$$

che descrive l'effetto degli invasi, in cui

$$r = \frac{A_L}{A_B} \quad [7.3.16]$$

rappresenta il rapporto tra le aree del lago A_L e del bacino A_B sotteso dalla diga, mentre

$$w = \frac{A_B}{A_C} \quad [7.3.17]$$

evidenzia l'importanza del bacino direttamente sotteso dalla diga in relazione all'area del bacino esterno A_C . Definito tramite la (7.17), l'indice FARL dovuto alla presenza di più invasi a monte della sezione di chiusura è definito dalla relazione

$$FARL = \prod_i \alpha_i \quad [7.3.18]$$

Per il bacino del Toce l'indice FARL è stato calcolato in un numero consistente di sezioni, scelte in particolare in corrispondenza delle confluenze. Dall'esame dei risultati, riportati nella Tavola 7.3 fuori testo, si rileva la progressione dell'indice verso il valore 1 (influenza trascurabile degli invasi) procedendo verso valle lungo le aste fluviali.

Valutazioni quantitative

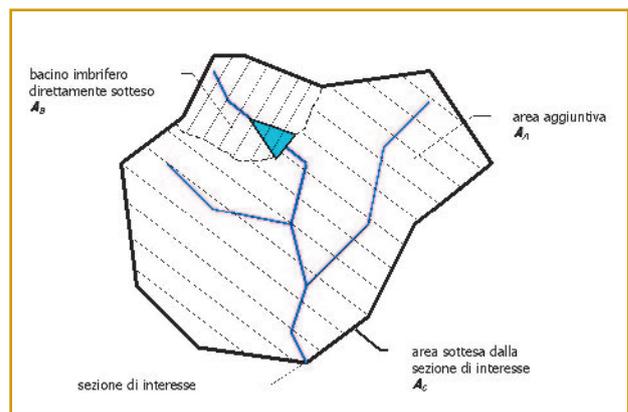
Individuata una generica sezione di chiusura in un corso d'acqua, l'area del bacino complessivo da essa sottesa può essere definita come area di capienza A_c . Se nell'area di capienza è presente un invasore, l'area del bacino idrografico da esso sottesa è denominata A_B . L'area restante, data dalla differenza tra l'area di capienza e l'area del bacino, costituisce l'area aggiuntiva A_A , responsabile dell'apporto laterale alla piena.

Non volendo entrare nel merito dei meccanismi di formazione delle onde di piena e della loro propagazione a valle di un invasore, si può usare un metodo semplificato per il calcolo degli effetti determinati dalla presenza di un

invasore.

Come proposto da diversi autori (Marzolo, 1933; Di Natale et al., 2001), l'onda di piena in arrivo in una generica sezione fluviale può essere vista come somma delle onde generate in sezioni fluviali poste più a monte opportunamente traslate. Si consideri la presenza di un invasore che sottende l'area A_B prima indicata, e tale per cui l'effetto di laminazione da lui esercitato determina una netta differenza tra l'idrogramma in ingresso all'invasore rispetto a quello in uscita (figura 7.16).

Figura 7.16. Indicazione delle aree individuate in ogni bacino, necessarie al calcolo del coefficiente di laminazione a valle dei serbatoi



L'idrogramma alla sezione di chiusura $q_{c,lam}(t)$ tenendo conto dell'effetto dell'invasore, sarà dato dall'idrogramma originario $q_c(t)$, valutato sull'area di capienza senza considerare l'eventuale presenza dell'invasore, a cui viene sottratto l'idrogramma in entrata al serbatoio $q_{e,inv}(t - \delta)$ e a cui si aggiunge l'idrogramma in uscita $q_{u,inv}(t - \delta)$. Questi ultimi, però, devono essere calcolati tenendo presente che gli effetti che si percepiscono nella sezione di chiusura al tempo t in realtà sono dovuti alle onde che sono transitate nell'invasore ad un tempo $t - \delta$, in cui δ indica il tempo necessario affinché l'onda di piena raggiunga la sezione di chiusura in esame. In tale analisi, quindi, si trascura l'effetto dovuto alla laminazione offerta dalle aste fluviali, che tendono a ridurre ulteriormente i valori al colmo delle onde.

Dato che lo studio condotto in questa fase è solo di tipo qualitativo e dato che, in base alle ipotesi fatte, il metodo di calcolo è consistente dal punto di vista dei valori al colmo degli idrogrammi, più che dal punto di vista della forma, è opportuno spostare l'analisi dalla somma delle onde alla somma dei valori al colmo.

In questo caso, quindi, il coefficiente di laminazione η_c valutato nella sezione di chiusura per effetto degli invasi sarà dato dal rapporto tra il valore al colmo dell'onda di

piena valutato senza la presenza degli invasi Q_C ed il valore al colmo determinato dalla presenza degli sbarramenti $Q_{C,lam}$:

$$\eta_C = \frac{Q_{C,lam}}{Q_C} \quad [7.3.19]$$

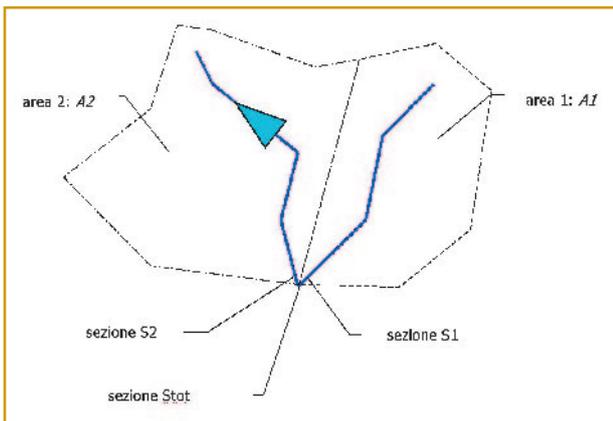
in cui il numeratore è ottenuto in base alla

$$Q_{C,lam} = Q_C - \sum Q_{e,inv} + \sum Q_{u,inv} \quad [7.3.20]$$

Nella (7.22) compare la sommatoria di tutte le onde in ingresso ai singoli invasi $Q_{e,inv}$ e la sommatoria di tutte le onde in uscita dagli invasi stessi in seguito alla laminazione $Q_{u,inv}$. In pratica si è considerata la generica onda di piena in una predeterminata sezione come la somma parziale delle onde ricavate nelle varie parti in cui si può suddividere il bacino complessivo. In questo caso, la somma parziale delle portate ottenute per ogni sottobacino di cui si compone il bacino principale risulta sempre maggiore rispetto alla portata calcolata per il bacino complessivo considerato nel suo insieme. Risulta pertanto necessario procedere anche ad una taratura dei valori delle portate all'invaso, imponendo che la somma dei valori al colmo degli idrogrammi agli invasi e quelle dovute agli apporti laterali diano come risultato il valore al colmo ottenuto considerando tutta l'area di capienza individuata.

Per meglio chiarire la procedura, si consideri il seguente esempio: un bacino di area A_{tot} , può essere suddiviso in due sotto-bacini. Il primo, di area A_1 , non presenta al suo interno opere di accumulo, mentre il secondo, di area A_2 , contiene al suo interno un invaso (figura 7.17). Tale invaso, determina un abbattimento dell'onda di piena in ingresso che è espresso tramite il coefficiente di laminazione η_{inv} .

Figura 7.17 Esempio di suddivisione di un bacino per il calcolo del coefficiente di laminazione a valle di un invaso



Si indichi ora con Q_{inv} la portata al colmo valutata in corrispondenza dell'invaso, con Q_2 la portata al colmo in corrispondenza della sezione S_2 , con Q_1 la portata del sotto-bacino 1 valutata in corrispondenza della sezione S_1 e con Q_{tot} la portata valutata per tutto il bacino individuato dalla sezione $Stot$. Alla sezione S_2 , il nuovo coefficiente di laminazione sarà dato da:

$$\eta_{S_2} = \frac{Q_2 - Q_{inv} + \eta_{inv} \cdot Q_{inv}}{Q_2} \quad [7.3.21]$$

Per la sezione di chiusura $Stot$, che sottende tutto il bacino, si calcola per prima cosa un coefficiente di riduzione per le portate, imponendo che la somma delle portate al colmo dei singoli sotto-bacini sia pari alla somma della portata calcolata per il bacino complessivo:

$$x = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_{tot}} \quad [7.3.22]$$

Successivamente si calcola l'effettivo valore considerato per il coefficiente di laminazione:

$$\eta_{Stot} = \frac{\eta_{S_2} \cdot Q_2 + Q_1}{x \cdot Q_{tot}} = \frac{\eta_{S_2} \cdot Q_2 + Q_1}{Q_1 + Q_2} \quad [7.3.23]$$

Nello specifico si è scelto di operare considerando i valori al colmo in ingresso ed in uscita dai serbatoi e, in generale, in ogni altra sezione, ottenuti per un tempo di ritorno di 200 anni.

La Tavola 7.4 (fuori testo), rappresenta sulla cartografia i valori trovati. In essa si sono indicate in corrispondenza delle sezioni di chiusura individuate i rispettivi valori del coefficiente di laminazione. Le aste fluviali a valle degli invasi, invece, sono state colorate con tonalità differenti al fine di evidenziare le variazioni subite dal coefficiente di laminazione allontanandosi dall'invaso.

7.3.8. Definizione delle "aree target"

La fase di definizione delle aree bersaglio o "aree target", mira a stabilire quali zone del bacino del Toce possano beneficiare di una riduzione del rischio di alluvione attraverso una opportuna gestione della fase di invaso e svasso dei serbatoi artificiali presenti nel bacino. Per l'identificazione di tali aree, si è proceduto in due direzioni. La prima, si basa sulla individuazione delle aree storicamente vulnerate, effettuata in base ai dati storici e riassunta nella Tavola 7.2 (fuori testo). In questa tavola sono state segnalate le zone in cui i passati eventi alluvionali hanno prodotto maggiori danni (cerchi con campitura rossa), considerandone anche la frequenza (cerchi di maggiore dimensione indicano una frequenza di accadimento maggiore). Nella stessa tavola sono state indicate (cerchi

con triangolo giallo all'interno) le aree ritenute critiche nel caso di manovra degli organi di scarico agli invasi, ottenute da documenti disponibili presso il Registro Italiano Dighe, depositati dai gestori degli impianti in conformità alla circolare DSTN/2/22806 del 13/12/1995.

La seconda direzione consiste nella valutazione quantitativa dell'effetto di laminazione a valle degli invasi, descritta nei paragrafi precedenti e riassunta nella Tavola 7.4 (fuori testo). Esaminando congiuntamente i risultati delle due analisi, si possono individuare ragionevolmente le zone nelle quali i benefici possano risultare effettivamente tangibili. Come risulta dal confronto tra le tabelle 7.7 e 7.8, l'entrata in funzione dei serbatoi non ha influenzato in maniera determinante la distribuzione spaziale delle aree storicamente vulnerate. Nei paragrafi che seguono sono descritte, zona per zona, le risultanze delle analisi effettuate.

Alto Toce

L'alto corso del Toce, con sezione di chiusura a Verampio, non è risultato, nel tempo, soggetto a problemi di esondazioni (figura 7.18a). La presenza di un elevato numero di laghi di notevoli dimensioni, se rapportati all'area sottesa, determina un coefficiente di laminazione, lungo le aste fluviali, inferiore a 0,80 (figura 7.18b). Procedendo

verso valle, si nota come le zone segnalate risultino principalmente vulnerabili per problemi derivanti da manovra di opere di scarico (figura 7.18a). Il primo sito segnalato per eventi calamitosi è la località di San Rocco, sul Fiume Toce, in cui peraltro il coefficiente di laminazione è prossimo a 0,75. Un altro sito colpito da precedenti eventi calamitosi è in corrispondenza di Baceno, sul Torrente Devero, dove si ritrova un indice di laminazione, dato dagli invasi di Devero e Agaro, prossimo a 0,74.

Nella parte alta del bacino si nota che gli invasi utilizzabili per la laminazione sono Sabbione, Morasco, Val Toggia e Vannino. L'invaso di Busin Inferiore non ha grandi potenzialità, in quanto, data la sua posizione rispetto ai territori a valle (bacino direttamente sotteso di piccolissime dimensioni, lontananza dall'asta principale) già alla confluenza tra il suo emissario ed il Fiume Toce, presenta un coefficiente di laminazione pari a 0,82. Questo è superiore al valore di 0,73 ottenuto, nella stessa sezione, grazie agli invasi prima citati. Dato che la laminazione operata dall'invaso di Busin Inferiore è ottenuta impiegando una soglia libera, senza intervento di alcun tipo, si può desumere che esso non necessiti di ulteriori studi.

I due invasi sul Torrente Devero, presentano invece un consistente potenziale di laminazione in quanto una accorta gestione degli stessi potrebbe permettere di abbassare ulteriormente il coefficiente di laminazione, attualmente pari a 0,796, per proteggere l'abitato di Baceno.

Figura 7.18 Aree storicamente vulnerate (7.18a) e coefficienti di laminazione (7.18b) per l'alto corso del Toce, sezione di chiusura a Verampio

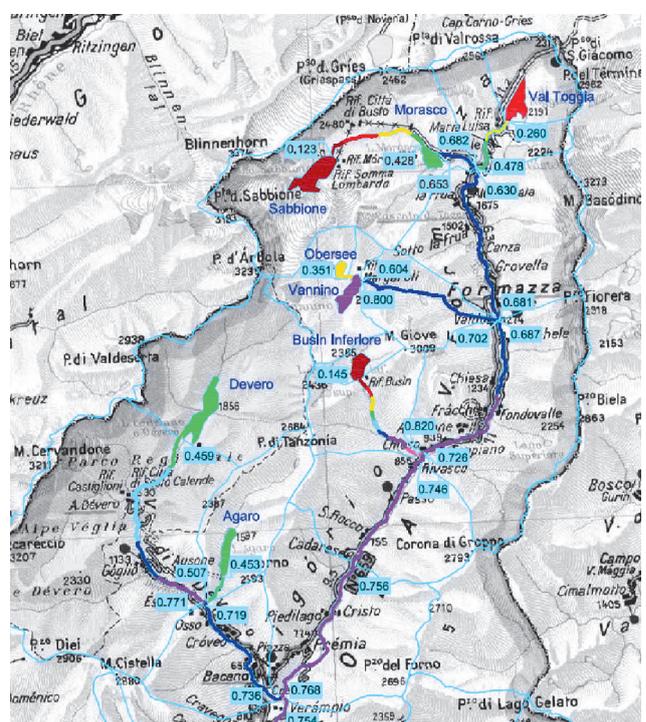
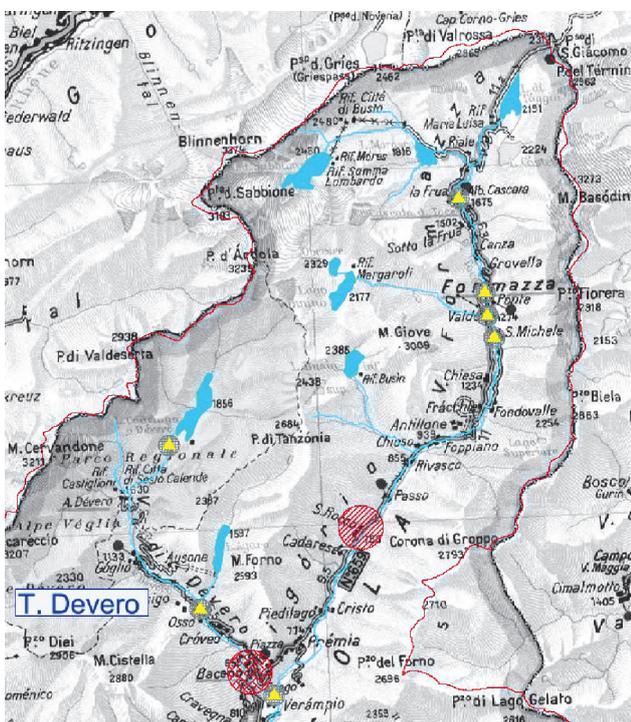


Tabella 7.7 Date di entrata in servizio degli invasi (banda verde) e dei maggiori eventi alluvionali registrati nel bacino del Toce

| | | Entrata in servizio Invasi (banda verde) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--|--|--------------------|------------------|---------------------|--------------|--------------------|--------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------|----------------|------------------|---------|---------------|---------------------|----------------|----------------|----------------------|
| | | T. Ovesca | | | | | T. Diveria | | T. Devero | | Alto Toce | | | | | T. Anza | | T. Isorno | | |
| Eventi | | Alpe Cavalli ('26) | Campliccioli ('29) | Camposecco ('32) | Lago Cinghino ('32) | Lago Antrona | Lago d'Avino ('29) | Devero ('39) | Agaro ('40) | Busin Inferiore ('26) | Lago Castel | Morasco ('40) | Sabbione ('55) | Val Toggia ('33) | Obersee | Vannino ('29) | Ceppo Morelli ('32) | Quarazza ('54) | Agrasina ('54) | Alpe Larecchio ('40) |
| ottobre 1755 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ottobre 1839 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ottobre 1868 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 ottobre 1924 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 maggio 1926 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 luglio 1930 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 novembre 1930 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 maggio 1931 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 agosto 1934 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 agosto 1935 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 agosto 1939 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 marzo 1946 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 settembre 1947 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 settembre 1948 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 novembre 1951 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 marzo 1956 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 settembre 1956 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 giugno 1957 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 maggio 1960 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 settembre 1960 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 settembre 1961 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 novembre 1962 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 aprile 1963 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 novembre 1968 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 ottobre 1977 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 agosto 1978 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 settembre 1993 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 ottobre 1993 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 ottobre 2000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



Tabella 7.8 Bacini principali interessati dai singoli eventi. I bacini evidenziati contengono invasi (v. tabella 7.7)

| Bacini principali interessati dai singoli eventi | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|--------------------|-------|--------|---------|--------|---------|---------------------|--------|--------|------|
| Eventi | Toce - alto corso | Toce - basso corso | Bogna | Devero | Melezzo | Isonno | Diveria | Castrasca (Diveria) | Ovesca | Strona | Anza |
| ottobre 1755 | x | x | x | | x | x | | | x | | x |
| ottobre 1839 | | x | x | | | | x | | x | | |
| ottobre 1868 | x | x | | | | | | | | | x |
| 4 ottobre 1924 | | | | | | | | | | | |
| 15 maggio 1926 | | | | | | | | | | | |
| 24 luglio 1930 | | | | | | | | | | | |
| 29 novembre 1930 | | | | | | | | | | | |
| 3 maggio 1931 | | | | | | | | | | | |
| 3 agosto 1934 | | | | | | | | | | | |
| 25 agosto 1935 | | | | | | | | | | | |
| 6 agosto 1939 | | | | | | | | | | | |
| 4 marzo 1946 | | | | | | | | | | | |
| 26 settembre 1947 | | | | | | | | | | | |
| 2 settembre 1948 | | | | | | | | | | | |
| 11 novembre 1951 | | x | | | | | | | | | |
| 23 marzo 1956 | | | | | | | | | | | |
| 25 settembre 1956 | | | | | | | | | | | |
| 16 giugno 1957 | | | | | | | | | | | |
| 18 maggio 1960 | | | | | | | | | | | |
| 16 settembre 1960 | | | | | | | | | | | |
| 13 settembre 1961 | | | | | | | | | | | |
| 8 novembre 1962 | | | | | | | | | | | |
| 8 aprile 1963 | | | | | | | | | | | |
| 2 novembre 1968 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 7 ottobre 1977 | | | | | | | | | | | |
| 7 agosto 1978 | | x | | | x | x | | | x | | x |
| 24 settembre 1993 | | x | | | | | | | x | | x |
| 25 ottobre 1993 | | | | | | | x | x | x | | x |
| 13 ottobre 2000 | | | x | | | | x | x | x | | x |

Asta del Toce fino a Villadossola

Muovendo sempre verso valle, si analizza la parte del bacino del Toce ricadente tra la sezione di chiusura di Verampio e quella di Villadossola (figura 7.19).

Come si può notare, in questa zona risulta elevato il numero di eventi alluvionali storici. Dopo Verampio, si incontrano subito i siti di Crodo e Montecrestese, nei quali, in base a quanto detto in precedenza, l'incidenza del rischio di piena può essere attenuata tramite i serbatoi posti nell'alto corso del Toce. Procedendo oltre, nel breve tratto tra Montecrestese e Domodossola, si ha la confluenza con il Toce di quattro corsi d'acqua laterali di notevoli dimensioni (Torrenti Diveria, Isorno, Bogna, Melezzo) di cui solo due contengono invasi. Le dighe di Agrasina e Alpe Larecchio, sul Torrente Isorno, e la diga di Lago d'Avino, sul Torrente Cairasca (affluente del Diveria), sottendono bacini di dimensioni esigue, se confrontati anche solo con i due rispettivi sotto-bacini alla confluenza con il Toce, generando complessivamente un coefficiente di laminazione nei sotto-bacini prossimo ad 1. In relazione alle dimensioni dei bacini sottesi, un loro possibile intervento nel contenimento delle piene risulterebbe potenzialmente trascurabile. Va però segnalato che le condizioni in cui sono stati calcolati i coefficienti di laminazione per la diga di Agrasina sono poco realistiche ed unicamente legate al requisito di assenza di manovre sulle opere di scarico. Le usuali manovre operate in corso di evento, sono certamente in grado di abbassare in maniera consistente i coefficienti, anche se per dimostrare che ciò possa determinare grandi benefici nelle aree di valle bisognerebbe studiare dei protocolli di manovra e determinarne di volta in volta gli effetti sulle onde di piena.

Oltre l'abitato di Domodossola, si incontrano ancora delle aree a rischio, in particolare nella zona di Villadossola, in corrispondenza della quale si ha anche la confluenza tra il Toce ed il Torrente Ovesca. Nella Valle Ovesca si segnalano vari siti a rischio, in particolare in prossimità di Antrona Schieranco. In questo caso l'utilizzo delle potenzialità offerte dal gruppo di invasi posti

sugli affluenti del Torrente Ovesca può determinare una notevole riduzione dei valori al picco delle portate. Dalle elaborazioni effettuate risulta infatti che il solo utilizzo dei due invasi di Alpe Cavalli e del Lago Antrona può determinare un coefficiente di laminazione pari a 0,80 in prossimità di Antrona Schieranco.

Basso corso del Toce

In figura 7.20 è rappresentato il basso corso del Fiume Toce, tra Villadossola e la confluenza con il Lago Maggiore. I danni maggiori avuti nel passato sono stati segnalati nella zona di Piedimulera ed in prossimità di Ornavasso.

In corrispondenza di Piedimulera, si ha la confluenza tra il Toce ed il Torrente Anza, che sottende un'area molto estesa. Anche in questa valle sono segnalati più siti a rischio, con possibilità di intervento ridotte. Gli unici invasi presenti, Quarazza ($\eta=0,975$) e Ceppo Morelli ($\eta=0,997$), infatti, hanno ridottissime capacità laminative, con effetti trascurabili per i territori a valle.

In questo caso quindi, le possibilità di attenuazione delle piene derivano dai serbatoi indicati precedentemente, ricadenti nell'alto corso del Toce e sul Torrente Ovesca. L'elevato valore dell'indice di laminazione risultante a valle di Villadossola, lascia però supporre che i miglioramenti ottenibili siano ridotti, in quanto, ormai, gli apporti laterali sono preponderanti rispetto a quelli dei bacini sottesi direttamente dagli invasi.

Oltre Ornavasso si segnalano ancora alcuni siti a rischio, in particolare in corrispondenza di Gravellona. In questa posizione però il bacino idrografico del Toce ha superato i 1780 km², vanificando ogni possibilità di intervento. Anche la presenza del Lago d'Orta, posto sul Torrente Strona, non permette miglioramenti significativi. Tale lago, infatti, è naturale, con solo una regolarizzazione della soglia sfiorante verso l'emissario, tale da escludere possibilità di regolazione effettiva delle portate in uscita.

Figura 7.19 Aree storicamente vulnerate (7.19a) e coefficienti di laminazione (7.19b): bacino del Toce compreso tra le sezioni di Verampio e Villadossola

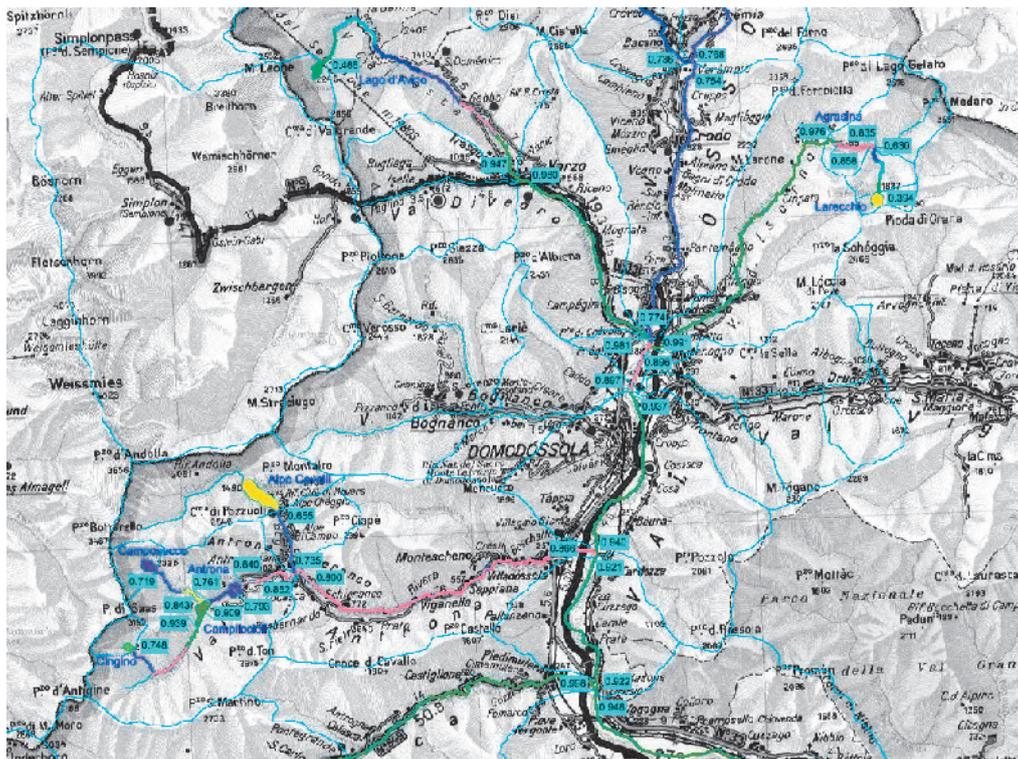
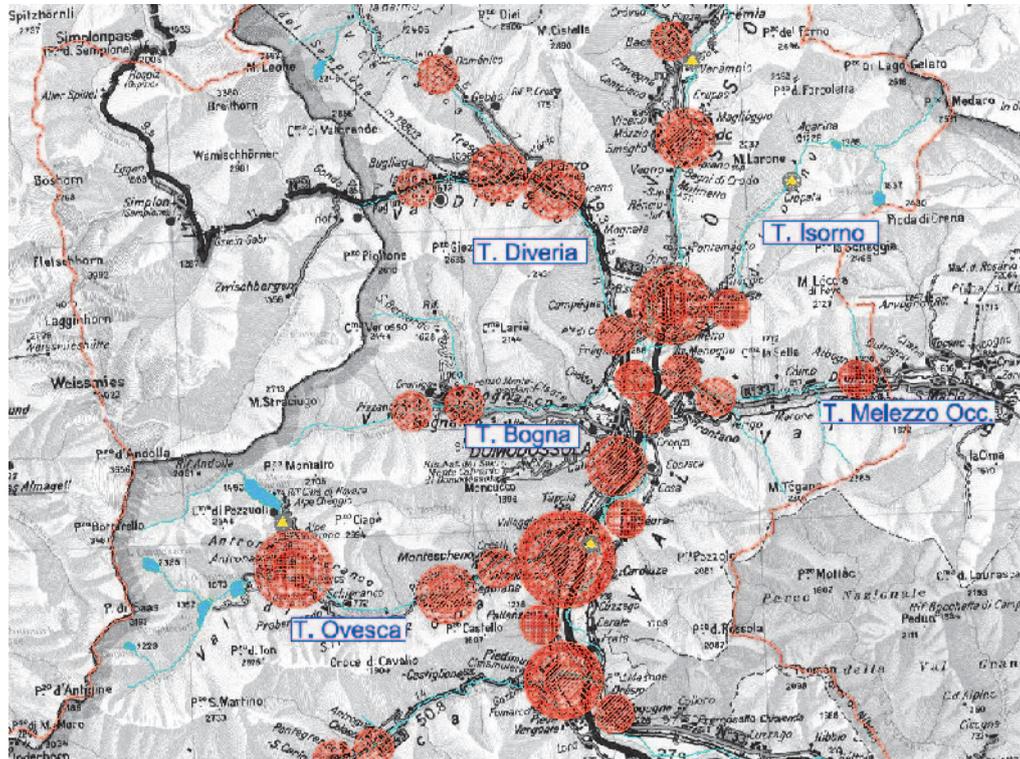
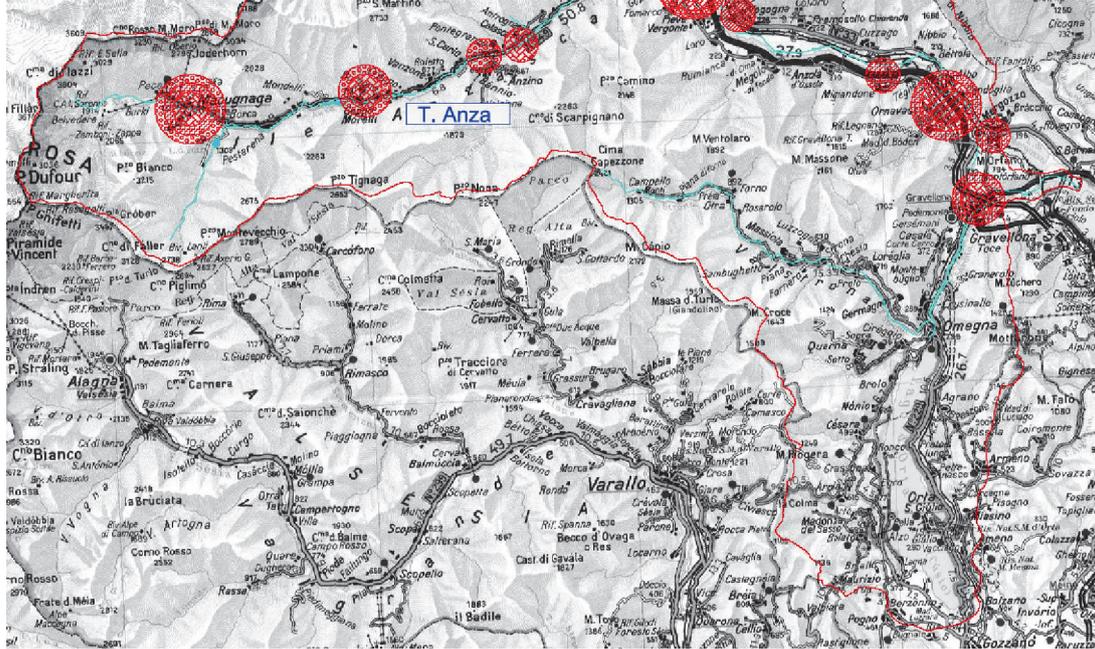


Figura 7.20 Aree storicamente vulnerate (7.20a) e coefficienti di laminazione (7.20b): bacino del Toce compreso tra le sezioni di Villadossola ed il Lago Maggiore





7.3.10 Conclusioni

Come descritto all'inizio di questa sezione, la valutazione quantitativa dei benefici ottenibili dagli invasi tramite gli effetti di laminazione delle piene è legata all'applicazione di metodi di ottimizzazione della gestione degli invasi in fase di piena, accoppiata alla previsione meteorologica. Laddove questi sistemi sono stati costruiti (Progetto MINERVE, in fase di sviluppo nel Cantone Vallese, in Svizzera), tali valutazioni sono state effettuate, ma in relazione ad eventi avvenuti nel passato, quindi in un quadro deterministico.

Per l'area del Toce si rimane in un ambito qualitativo, anche se costruito attraverso l'associazione di valutazioni di dettaglio relative alla vulnerabilità storica ed ai coefficienti di laminazione "globali" ottenuti componendo gli effetti dei singoli invasi. Da queste indicazioni risulta abbastanza

chiaramente che esistono due zone ("target") relativamente alle quali ulteriori indagini possono evidenziare benefici derivanti dalla gestione degli invasi in piena:

- la prima, a monte della quale sono presenti ben nove invasi, è compresa tra Montecrestese e Piedimulera. In questa zona, si ha una notevole incidenza di danni da alluvioni storiche ed i valori degli indici di laminazione, oltre che le caratteristiche degli invasi a monte, permettono consistenti possibilità di intervento.
- Una seconda area è individuabile nella Valle Ovesca, in cui la presenza di cinque invasi permetterebbe una notevole riduzione dei rischi da alluvione.

Queste "aree target" sono riportate nella Tavola 7.5 fuori testo, nella quale sono anche evidenziate quelle aree già attualmente caratterizzate da significativi effetti di laminazione e che, con una specifica gestione dei serbatoi, potranno comunque ottenere consistenti benefici.

Bibliografia

Bacchi, B., Brath, A., Kottegoda, N.T., *Analysis of the relationships between flood peaks and flood volumes based crossing properties of river flow processes*, Water Resources Research, vol.28, no.10, pp.2773-2782, 1992.

Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali, Circolare DSTN/2/22806 del 13 Dicembre 1995 *Disposizioni attuative e integrative in materia di dighe*.

De Michele, C., Rosso, R., *Sintesi del rapporto regionale per i compartimenti di Parma e Genova*, Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia, GNDCI-CNR, Linea 1, 2000, [<http://caronte.gndci.cs.cnr.it/GNDCI/rapportiPdf/ToMiGe.pdf>].

Di Natale, M., Golia, U., M., Greco, R., *Sul dimensionamento di massima di un sistema di vasche di laminazione per il controllo delle piene in una rete di drenaggio*, in: Fioretto, V., Caroni, E., (a cura di), *La difesa idraulica del territorio*, Università di Trieste, 2001.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 febbraio 2004 *Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile*.

Florentino, M., *La valutazione dei volumi di piena nelle reti di drenaggio urbano*, Idrotecnica, n.3, pp. 141-152, 1985.

Marzolo, F., *I serbatoi di piena*, L'Energia Elettrica, pp. 269-284, aprile 1933.

Miotto, F., *Relazione generalizzata per la descrizione del campo di esistenza di curve di efflusso da invasi con organi di scarico mobili*, Working Paper 2004-05, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, 2005a.

Miotto, F., Laio, F., Claps, P. *Determinazione di un indice sintetico per la valutazione dell'effetto di laminazione*, Working Paper 2004-05, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, 2005b.

Natural Environmental Research Council, *Estimation of flood volumes over different duration*, Flood Studies Report, vol. I, pp.352-373, London, 1975.

Pianese, D. e Rossi, F., *Curve di possibilità di laminazione delle piene*, Giornale del Genio Civile, 4, 5, 6, pp.131-148, 1986.

Rossi, F., Villani, P., *Valutazione delle piene in Campania*, L1, GNDCI-CNR, Salerno, 1994.

Viglione, A., *Determinazione automatica di parametri morfometrici dei bacini idrografici*, Working Paper 2003 - 01, Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino, Settembre 2003.

Villani, P. (a cura di), *Rapporto sulla Valutazione delle piene in Piemonte*, in "Relazione delle attività del CUGRI fino al 2001", 89-118, Ed. Del Paguro, Fisciano, 2003 (ISBN 88-87248-35-4).

Bérod, D., 1994, *Contribution à l'estimation des crues à l'aide de méthodes déterministes*, Thèse EPFL N°1319, Lausanne.

BWG, 2003, *Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten*, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

Chow V.T., Maidment D.R., Mays L.W., 1988, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill.

Consuegra D., Vez E., 1996, *AMIE: Analyse et Modélisation Intégrées du cheminement des Eaux en zones habitées, modélisation hydrologique, Application au bassin versant de la Haute Broye*, HYDRAM, EPFL, Lausanne.

Consuegra D., Niggli M., Musy A., 1998, *Calcul des crues, application au bassin versant supérieur du Rhône*, Wasser Energie Luft, 9/10, 223-232.

Cunge J.A., 1969, *On the subject of a flood propagation computational method (Muskingum method)*, Journal of Hydraulic Research, 7(2), 205-230.

Cunnane C., 1989, *Statistical distributions for flood frequency analysis*, World Meteorological Organization, Operational Hydrology Report No33, Geneva.

Gustard A., 1993, *Flow Regime from International Experimental and Network Data Sets (FRIEND)*, Institute of hydrology, Wallingford.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970, *River flow forecasting through conceptual models. Part I, a discussion of principles*. Journal of Hydrology, 10, 282-290.

Spreafico M., Weingartner R., 1992, *Atlante idrologico della Svizzera, Federale delle Acque e della Geologia*, Berna.

U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982, *Guidelines for Determining Flood Flow Frequency, Bulletin 17B*, U.S. Department of the Interior, Office of Water Coordination.

WMO, 1986, *Intercomparisons of models of snowmelt runoff*, Operational Hydrology Report No 23 (WMO No 646), World Meteorological Organisation, Geneva.

Yapo P. O., Gupta H. V., Sorooshian S., 1996, *Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data*, Journal of Hydrology, 181, 23-46.