7 il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

Politecnico di Torino - Pierluigi Claps, Filippo Miotto, Francesco Laio Registro Italiano Dighe - Alberto Setaccia Regione Piemonte - Giulia Bodrato, Roberto Del Vesco, Chiara Silvestro Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana - Markus Niggli, Maurizio Pozzoni, Andrea Salvetti

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene



7.1. Aspetti generali

7.1.1. Premessa

La presenza diffusa di bacini di ritenuta a scopo idroelettrico in diverse aree idrografiche alpine ha sempre suscitato attenzione e confronti accesi, specie in concomitanza di eventi di piena. Infatti le dighe sembrano essere opere la cui esistenza si riscopre, oltre che nelle celebrazioni dei disastri, solo in relazione al fatto che interferiscono con il reticolo naturale durante le piene (per cui suscitano il timore di aggravamento della situazione naturale) oppure riguardo alla loro azione di 'cattura' dell'acqua (quando quella residua, nelle magre estive, scarseggia). Molto carente sembra invece essere la percezione del potenziale di attenuazione delle portate di piena che è attribuibile ai serbatoi artificiali.

Gli eventi alluvionali che con tragica ricorrenza si susseguono sul territorio italiano, hanno evidenziato il ruolo fondamentale dei sistemi di previsione e monitoraggio idro-meteorologico, ed in particolare l'importanza dell'acquisizione dei dati in tempo reale e la loro elaborazione e diffusione immediata a tutti i soggetti impegnati nelle fasi di previsione e di gestione delle situazioni di emergenza. Di qui ha cominciato a prendere corpo la convinzione della necessità di prevedere un modello organizzativo per la gestione coordinata di un sistema per la sorveglianza e l'allerta nazionale inserito nel quadro della legge 183/89 sulla difesa del suolo, e della legge n. 225/92 che istituiva la Protezione Civile.

Il Programma Nazionale dei Centri Funzionali di Protezione Civile, nato dalla Legge 267/98 e attualmente in fase di attuazione, è mirato a potenziare/creare e connettere un insieme di strutture operative nel campo della previsione e del monitoraggio meteo-idrologico e non solo, ai vari livelli regionali e nazionale. La gestione del sistema di allerta nazionale è assicurata dal Dipartimento della protezione civile, dalle Regioni e dalle Province autonome attraverso la rete dei Centri Funzionali, nonché le strutture regionali ed i centri di competenza chiamati a concorrere funzionalmente ed operativamente a tale rete i quali devono operare secondo criteri, metodi, standard e procedure comuni ed è componente del Servizio nazionale della protezione civile.

La recente Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 27 febbraio 2004 specifica le procedure operative da adottare nell'ambito di detto sistema, e sottolinea la necessità di prevedere un'adeguata attività di regolazione dei deflussi per contrastare gli effetti delle piene nei bacini idrografici con presenza di invasi artificiali. A tal fine deve essere primariamente valutata, attraverso studi specifici, l'influenza che possono esercitare i volumi accumulabili nei suddetti invasi sulla formazione e propagazione dell'onda di piena a valle; in base ai risultati di tali valutazioni ed alle condizioni di esercizio delle singole dighe, devono essere individuati quegli invasi che potrebbero essere effettivamente utili alla laminazione delle piene e quindi ad una riduzione del rischio idraulico a valle degli invasi stessi.

La Direttiva prevede che per tali invasi le Regioni, con il concorso tecnico dei Centri Funzionali, dell'Autorità di bacino e del Registro italiano dighe, d'intesa con i gestori, predispongano ed adottino un piano di laminazione preventivo. L'applicazione del piano è poi affidata all'unità di comando e controllo, organo composto da strutture sia statali che regionali, che si rappresenta come l'autorità di protezione civile per il governo delle piene.

7.1.2. Descrizione del progetto

Il progetto "Studio del Ruolo dei Bacini Artificiali nella Formazione delle Piene", che rappresenta l'azione 3 del Programma Interreg III Italia-Svizzera (2000-2006), propone uno studio sugli effetti di laminazione delle piene prodotti dai sistemi interconnessi di serbatoi artificiali e dalla regolazione del Lago Verbano, considerando i possibili benefici, a fronte dei costi, dell'utilizzo di una quota parte degli invasi ai fini della mitigazione del rischio di piena.

Nel sistema del Verbano, il ruolo dei serbatoi nella fase di formazione delle piene a valle, come risultato della modulazione delle piene naturali, risulta particolarmente interessante, tenuto conto della dislocazione degli invasi all'interno del bacino, del volume complessivamente invasabile e delle caratteristiche (e vulnerabilità) delle aree di fondovalle. Nella provincia del Verbano-Cusio-Ossola si contano in totale diciannove invasi, con capacità complessiva superiore a 155 milioni di metri cubi, a cui vanno aggiunti quelli in territorio Svizzero, sia del Canton Ticino che del Canton Vallese. Anche se, considerata l'area sottesa dal bacino del Toce allo sbocco nel lago Verbano (1530 km2), i volumi complessivamente invasabili non consentirebbero una modulazione sostanziale delle piene relative all'intero bacino, la presenza di un composito sistema di invasi (quasi completamente gestito dall'ENEL)

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

rappresenta una realtà di grande interesse in relazione alle possibilità di attenuazione degli effetti delle piene nei maggiori sottobacini e, soprattutto, in una cospicua parte dell'asta principale del Toce.

I partner operanti nell'ambito del Progetto sono: Strutture referenti:

- Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (I)

- Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (Canobbio, Svizzera)

Organismi coinvolti:

- Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili del Politecnico di Torino

- Registro Italiano Dighe - Ufficio Idraulica (Roma) - Sede distaccata Torino

- Service des forces hydrauliques, Amministrazione Vallese (CH)

- Regione Piemonte - Direzione Difesa del Suolo (Settore Sbarramenti Fluviali di Ritenuta e Bacini di Accumulo e Settore Pianificazione della Difesa del Suolo)

7.1.3. Raccolta dati e caratterizzazione del sistema di Invasi

La prima delle fasi di cui si compone il progetto riguarda il cosiddetto Catasto delle Opere, consistente in un approfondito esame della configurazione delle opere di sbarramento, soprattutto per ciò che concerne gli aspetti idraulici (modalità di funzionamento delle opere di scarico). Nell'ambito di questa fase si sono evidenziate alcune carenze nella conoscenza della esatta configurazione di invasi (es. Obersee) che sono stati riclassificati ai sensi della L. 584/94, diventando di competenza regionale. Altro caso particolare è rappresentato dal Lago Antrona, che è agli effetti pratici un lago naturale, sul quale non esistono possibilità di regolazione. Nell'occasione di questo censimento si sono anche risistemate le informazioni in possesso del RID (fogli condizioni) riportando tutte le possibili caratteristiche in schede monografiche costruite per singola diga.

E' stata ricostruita anche la configurazione del sistema territoriale, con il dettaglio consentito dalla cartografia ufficiale della Regione Piemonte. I limiti dei bacini idrografici, il reticolo fluviale e le informazioni altimetriche sono disponibili in forma georeferenziata. Analisi morfologiche di primo livello sono state effettuate per la stima di parametri idrologici connessi alla distribuzione di probabilità delle piene al colmo.

Per consentire di sviluppare correttamente le attività relative all'interazione tra le modalità gestionali degli invasi e la riduzione del rischio di piena, si è anche ricostruito, sulla base di documenti pubblicati dall'ENEL e dall'ANIDEL, l'insieme delle captazioni e le caratteristiche dei bacini allacciati, i quali, in linea di prima approssimazione, non sono considerati contribuenti ai fini della determinazione delle portate di piena.

La Direzione Difesa del Suolo si è occupata della raccolta di dati:

- provenienti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po: sezioni battute del Torrente Toce e carte del P.A.I. - Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (strumento giuridico, approvato con D.P.C.M. del 24 maggio 2001, che disciplina le azioni riguardanti la difesa idrogeologica del territorio e della rete idrografica del bacino del Po, attraverso l'individuazione delle linee generali di assetto idraulico ed idrogeologico e delimitazione delle aree interessate da dissesto);

- relativi agli invasi di competenza regionale, che fanno parte di un nuovo sistema informativo detto "Catasto Sbarramenti", in continuo aggiornamento.

Sull'area di interesse, lungo l'asta del fiume Toce e dei suoi affluenti, dalla testata del bacino fino a Domodossola, sono stati portati avanti i sopralluoghi tecnici e le fasi di informatizzazione dei dati relativi alle opere di difesa del SICOD (Sistema Informativo Catasto Opere di Difesa). Nel SICOD, che fa parte del sistema informativo territoriale della Regione Piemonte (DGR n. 47-4052 del 01/10/ 2001), vengono infatti censite le opere di difesa presenti sul territorio regionale, siano esse idrauliche o di versante, caratterizzandole dal punto di vista tecnico e definendone lo stato di efficienza. Il SICOD fornisce un'immagine sullo stato di fatto del territorio e su come l'insieme delle difese interagisca con esso. Si tratta di un sistema informativo geografico, le cui informazioni possono essere valutate in un contesto più ampio dei dati di cui la Regione dispone e dunque si presenta come un valido supporto alle attività preliminari di pianificazione.

Il rilevamento delle opere idrauliche (ponti, traverse, derivazioni, difese di sponda, argini, etc.) viene effettuato con appositi sopralluoghi, durante i quali le opere vengono misurate, fotografate e ne viene valutata l'efficienza strutturale. Il rilevamento avviene con l'impiego di telemetri ipsometri a puntamento laser e, nei casi di effettiva necessità, il posizionamento si effettua con l'ausilio di GPS. I dati rilevati vengono quindi riversati nel sistema informativo: quelli alfanumerici confluiscono in un data base che raccoglie dati tecnici, geografici ed amministrativi; quelli geografici rientrano in un sistema GIS che localizza le opere sulla carta tecnica regionale servendosi della legenda SICOD. Con questo bagaglio di informazioni è stato possibile realizzare layout cartografici che descrivono l'attuale situazione del sistema di difese idrauliche e

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

di opere interferenti con il fiume Toce. Inoltre, trattandosi di un sistema GIS, per il progetto specifico, è possibile mettere in relazione le opere realizzate con le informazioni relative alle aree esondate e quindi con le aree "target" individuate. La presenza di certi tipi di opere (gli argini ad esempio) e con determinate caratteristiche geometriche è indice di aree vulnerabili all'azione del corso d'acqua in occasione di eventi eccezionali.

La presenza stessa delle opere di difesa, in base alle loro caratteristiche geometriche, all'ubicazione e allo stato di

efficienza, può essere una discriminante importante per individuare, tra le aree "target", quelle sulle quali vale la pena concentrare gli sforzi per lo studio della vulnerabilit e della mitigazione della pericolosità, anche attraverso la laminazione dei grandi bacini di accumulo.

I dati raccolti nel SICOD hanno infine permesso un approfondimento e un aggiornamento degli invasi "ex-Provveditorato Opere Pubbliche", passati recentemente alla competenza regionale (D.Igs 112/98 - L.R. 44/2000) (fig. 7.1 - 7.2). Per questo tipo di opere si sta attualmen-

Figura 7.1 Comune di Premia, località Piedilago, traversa sul T. Toce.



Figura 7.2 Comune di Formazza, località Val Toggia, diga di Val Toggia sul Rio Roni.



te conducendo un apposito censimento in tutta la regione, che confluirà nel Catasto Sbarramenti precedentemente descritto. Secondo la recente Legge Regionale 25/2003 e il relativo Regolamento di attuazione D.P.G.R. 9 novembre 2004 n.12/R, infatti, i proprietari di queste opere devono denunciarle, mentre in precedenza tale obbligo non sussisteva.

Tutto l'insieme dei dati raccolti porta a una buona conoscenza delle criticità presenti sull'asta del Toce, fornendo inoltre la possibilità di condurre simulazioni di carattere idraulico, in aggiunta a quelle, di carattere idrologico, previste in questa Azione.

7.1.4. Aree Bersaglio ('Target') per l'applicazione delle procedure

Per aree 'Target' si intendono le zone a valle delle dighe per le quali sono da attendersi maggiori benefici dai risultati del progetto. La definizione preliminare di tali aree consente di concentrare gli sforzi relativi alla fase di acquisizione dei dati e ad eventuali iniziative di monitoraggio che si decidesse di

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

intraprendere in corso di progetto.

Le procedure seguite in questa fase prevedono diversi passaggi:

1. Esame della vulnerabilità storica delle aree a valle L'esame della documentazione raccolta in numerosi studi relativi all'incidenza territoriale di eventi meteorologici intensi ha consentito di costruire una mappa delle aree storicamente vulnerate. Severità e frequenza degli eventi che hanno prodotto danni rappresentano indici importanti del rapporto tra il grado di antropizzazione dei fondovalle ed il relativo rischio idraulico. Dalla rappresentazione grafica di questi indicatori si ricavano indicazioni importanti in relazione alla scelta delle aree 'bersaglio'

2. Valutazione preliminare comparativa del possibile beneficio di laminazione in diverse sezioni della rete idrografica del Toce

A distanze dalla diga tali che il bacino idrografico di dominio risulti nettamente maggiore di quello sotteso dalla sezione sbarrata (ma anche in relazione alle caratteristiche di scala spaziale e temporale degli eventi meteorologici estremi) le portate derivanti dalle confluenze possono rendere trascurabile il beneficio derivante dalla laminazione della piena nella sezione della diga. Partendo da questo presupposto, si sono determinati indici speditivi di attenuazione delle portate di piena usando dati di partenza molto semplici, quali la superficie del lago e quella del bacino direttamente sotteso dallo sbarramento, con l'area del bacino sotteso a valle a fare da fattore di scala (Indice FARL).

3. Studio dell'idrologia delle piene nel bacino del Toce e determinazione delle curve di frequenza delle portate al picco di piena e dei volumi di piena

Le basi per la valutazione probabilistica delle portate di piena al picco e per la determinazione dei relativi volumi, sono state gli studi condotti dal CUGRI di Salerno per conto della Direzione Difesa del Suolo della Regione Piemonte e dal Politecnico di Milano nell'ambito del programma VAPI del GNDCI-CNR. Il risultato è stata l'applicazione del primo dei citati studi a tutti i bacini sottesi dagli invasi - per la determinazione delle onde di piena di progetto - ed anche ai bacini sottesi dalle principali confluenze (per determinare i valori di piena al picco per fissato periodo di ritorno in assenza di laminazione). Le onde di progetto, per diverse frequenze di superamento sono state costruite in modo da essere compatibili con le curve che legano i valori di piena al picco con quelli mediati su un generico intervallo di d ore (curve di riduzione dei colmi di piena).

4. Valutazione quantitativa dell'effetto di laminazione

attraverso soluzione numerica dell'equazione differenziale dell'invaso non lineare

5. Definizione degli effetti di laminazione ipotizzabili lungo le aste fluviali a valle delle dighe e relativa mappatura territoriale. Scelta delle aree 'bersaglio'.

In relazione alla valutazione dell'effetto di laminazione sulle aste di valle è stato proposto un criterio semplificato per stabilire, man mano che ci si allontana dalla diga, quale potrebbe essere il valore di piena al picco in presenza di un dato coefficiente di laminazione calcolato in corrispondenza dell'invaso. Tale coefficiente tende a crescere, man mano che si procede verso valle, in funzione dell'incremento dei valori di picco stimati con la procedura descritta al punto 3, o eventualmente si riduce in presenza di confluenze importanti con altri bacini in cui si rileva un forte effetto di laminazione.

Questo tipo di informazione è stata attribuita all'asta principale del Toce ed a quelle dei principali affluenti; combinandola con le informazioni raccolte al punto 1 (vulnerabilità storica) si sono definite le aree ('bersaglio') sulle quali gli interventi attivi di laminazione possono determinare i maggiori benefici marginali

7.1.5. Analisi dell'effetto di laminazione

Gli obiettivi di questa fase fanno riferimento alle ipotesi di gestione attiva dei fenomeni di piena da parte dei gestori degli invasi. Per valutare i margini di miglioramento ottenibili con la regolazione attiva della piena, è infatti importante costruire uno schema di supporto alla decisione su basi probabilistiche. Per la definizione di questo schema è necessario costruire funzioni di stato del sistema-invaso che tengano conto della distribuzione stocastica degli apporti naturali, in combinazione con le regole di gestione dipendenti dalle esigenze dell'utenza.

La descrizione del problema in termini di analisi di un sistema complesso appare in questo senso la più appropriata. Ogni sottosistema idroelettrico, e il sistema nel suo complesso, possono essere caratterizzati attraverso delle variabili di stato (p.es. il livello dei singoli invasi), delle variabili di ingresso, delle variabili di uscita e dei meccanismi di retroazione (feed-back), spesso indotti dall'uomo (vedi per es. impianti misti di produzione e ripompaggio che alterano le condizioni naturali di deflusso). Essenziale per una descrizione corretta del sistema è la determinazione della funzione di trasferimento del sistema complessivo, sulla quale eventualmente intervenire per massimizzare l'effetto di laminazione delle piene.

Lo studio dell'effetto di laminazione operato dai serbatoi coincide in questo caso con l'analisi del transitorio del Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

sistema, sottoposto ad ingressi che riproducono le onde di piena simulate dai modelli fisici, descriventi le condizioni idrologiche a monte di ogni singolo serbatoio.

Una volta descritto in termini matematici il funzionamento del sistema, si può valutare quali modalità di gestione possono incrementare l'effetto di laminazione degli invasi sulle 'aree Target' con il minimo impatto sugli obiettivi di produzione idroelettrica.

7.1.6. Miglioramento della previsione delle portate

Un ulteriore obiettivo del progetto riguarda il miglioramento dell'attività previsionale dal centro Funzionale. Il Centro Funzionale del Piemonte è l'evoluzione della Sala Situazione Rischi Naturali (SSRN) struttura in capo alla Regione Piemonte e trasferita all'ARPA dal 1/3/03 con legge regionale n. 28/02 che assolve dal 1996 ai compiti di sorveglianza per il rischio idrogeologico del territorio regionale. Presso il Centro è operativo un sistema di previsione delle portate fluviali del reticolo idrografico principale equipaggiato attraverso un programma di attività completato nel 2001. La catena modellistica utilizzata parte dei campi di pioggia previsti per le successive 48 ore forniti dai meteorologi, li integra con le precipitazioni osservate dalla rete al suolo e dal radar meteorologico, quindi simula in continuo (piene e magre) i processi di formazione delle portate attraverso un modello afflussideflussi di tipo concentrato ed infine rappresenta la traslazione delle portate in alveo attraverso un modello di propagazione idrodinamica.

Il Sistema descritto, per la sua architettura, rappresenta i processi naturali, e non tiene in conto gli effetti indotti dalle attività di tipo antropico correlate alla gestione della risorsa idrica. Questi effetti risultano essere particolarmente significativi per il fiume Toce a causa della presenza diffusa dei serbatoi idroelettrici nell'area del Verbano. Pertanto, conseguita la capacità di rappresentare nel dettaglio l'insieme degli effetti di laminazione esercitati dalle dighe, se ne curerà l'implementazione nel sistema di previsione delle piene in tempo reale per migliorare le previsioni di portata del fiume Toce.

7.1.7. Conclusioni

Il presente lavoro, che nasce con l'esigenza di sviluppare uno studio di dettaglio nell'area transfrontaliera del lago Maggiore, assume una valenza metodologica rilevante in considerazione delle disposizioni normative emanate nel 2004. Infatti la Direttiva sopra richiamata, introducendo un nuovo modello di gestione degli eventi alluvionali, fa riferimento a concetti come i piani di laminazione ai quali in un prossimo futuro i soggetti coinvolti dovranno dare risposte con specifici approfondimenti di settore. Questo progetto, affrontando questa problematica alla scala di bacino, traccia un percorso in linea con le disposizioni della Direttiva rappresentando un primo passo per la sua applicazione.

7.2 METODOLOGIA E RISULTATI PER IL CANTONE TICINO

7.2.1 Introduzione

Vengono di seguito presentati gli studi realizzati sulla parte svizzera del bacino imbrifero del lago Verbano (o Maggiore) allo scopo di analizzare l'impatto della gestione delle strutture idroelettriche (bacini d'accumulazione e/o di compenso, prelievi d'acqua e restituzione delle acque turbinate). Il bacino versante interessato da questi studi è il bacino imbrifero del fiume Maggia con sezione di chiusura a Solduno/Locarno. Questa scelta è dovuta da una parte al fatto che le acque di questo bacino alimentano in modo importante il lago Verbano e dall'altra al fatto che sono fortemente utilizzate per la produzione elettrica a partire dagli anni '50. Sfruttando la copiosa quantità di misure limnometriche disponibili per questo bacino, lo studio cercherà di analizzare succintamente l'effetto della gestione delle strutture idroelettriche sul livello del lago Verbano.

Per soddisfare questi scopi, viene proposto un approccio statistico (analisi e trattamento delle misure di portata) e uno di modellazione afflussi-deflussi. In questo capitolo vengono presentati essenzialmente i risultati dello studio statistico. Le analisi di frequenza permettono di verificare la qualità delle misure idrologiche e di stimare la loro efficacia di estrapolazione per i valori rari o estremi. In particolare, le leggi statistiche adattate agli eventi estremi permettono di valutare gli ordini di grandezza per le portate aventi tempi di ritorno elevati.

Gli obiettivi dell'analisi statistica sono i seguenti:

- verifica dell'omogeneità delle serie temporali di portata al fine di scoprire un effetto eventuale della gestione delle strutture idroelettriche;
- aggiustamento delle leggi statistiche sulle serie temporali delle misure di portata prima e dopo la costruzione degli sbarramenti, stima dei quantili (portate con

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

tempi di ritorno dati) e valutazione delle incertezze; stima degli effetti degli sbarramenti sulle piene.

Lo studio presentato in questo capitolo è particolarmente dedicato alla ricerca delle misure esistenti sul bacino e alla costruzione di una procedura automatica di analisi e di stima delle piene aventi frequenze rare ed estreme. La modellazione statistica proposta comprende l'applicazione dei diversi metodi di stima dei parametri delle leggi degli estremi, i test delle ipotesi e il calcolo degli intervalli di confidenza. A causa del poco tempo a disposizione, questo studio non ha permesso di sviluppare in dettaglio l'insieme di tutti questi aspetti: solo tre leggi statistiche sono state utilizzate (Gumbel, Log Pearson III e "Generalised Extreme Values").

L'analisi statistica non è però sempre in grado di incorporare in modo soddisfacente alcuni valori estremi, come l'evento alluvionale dell'ottobre 2000. Inoltre, l'adattamento statistico sulle serie di misure prima e dopo la costruzione degli sbarramenti si basa su dei campioni di piene generati in situazioni differenti per cui le differenze tra le serie non sono dovute esclusivamente all'effetto della gestione degli sbarramenti. Le differenze dipendono anche dalle differenti situazioni meteorologiche, dalla modificazione dell'occupazione del suolo e dai cambiamenti climatici. Se si vuole confrontare dei campioni generati in condizioni rigorosamente identiche (a parte l'effetto degli sbarramenti) è necessario ricorrere a un metodo alternativo basato sulla modellazione afflussi-deflussi. Anche lo sviluppo metodologico di questo approccio alternativo è presentato in questo capitolo.

7.2.2 Zona di studio e dati disponibili

L'area del bacino imbrifero della Maggia alla sezione di chiusura di Locarno misura approssimativamente 930 km2. Il bacino è fortemente caratterizzato da sfruttamento idroelettrico. La figura 7.3 mostra (in giallo) l'area dalla quale una parte dell'acqua è deviata in un'altra parte del bacino. Occorre notare che quest'acqua viene raccolta nel bacino di Palagnedra, per essere poi turbinata alla centrale del Verbano. L'acqua turbinata non torna nel fiume Maggia, ma viene immessa direttamente nel lago Verbano.

La figura 7.4 mostra le stazioni meteorologiche ed idrometriche situate nel bacino o nelle sue immediate vicinanze. Le stazioni meteorologiche misurano principalmente valori orari o giornalieri di precipitazioni e temperature. Queste stazioni, come pure quelle idrometriche, vengono gestite dall'Ufficio Federale delle Acque e della Geologia (UFAEG) o dall'IST. Occorre rimarcare che la disponibilità di dati per periodi precedenti la costruzione dei bacini idroelettrici é scarsa. Unicamente la stazione meteorologica di Locarno-Monti dispone di dati di precipitazione e temperatura riguardanti questi periodi (sin dal 1900). La stazione di Cevio (al centro del bacino, vedi fig. 7.4sinistra) copre lo stesso periodo, ma unicamente con dati di precipitazione giornaliera. Infine le stazioni idrometriche della Maggia a Bignasco (area: 194 km2) e Bavona a Bignasco (area: 122 km2) forniscono le misure di deflusso giornaliero e valori massimi mensili dei periodi 1929-1981, rispettivamente 1929-1975 (Fig. 7.4 destra). Inoltre sono disponibili i dati di quota del lago Verbano a Locarno (medie giornaliere e massimi mensili) dal 1867.

Figura 7.3 Il bacino imbrifero della Maggia: aree soggette a derivazione (tratteggiate in giallo) e aree soggette ad accumulazione (tratteggiate in blu).



• La parte maggiore dell'acqua derivata viene accumulata nel bacino di Palagnedra (sul fiume Melezza) dal quale viene turbinata e immessa direttamente nel lago Verbano. I punti rossi indicano le prese d'acqua in cui essa viene derivata.

Gli effetti sulle medie giornaliere e mensili di deflusso sono state oggetto di molteplici studi (ad esempio Spreafico e Weingartner, 1992). I casi particolari di Maggia e Bavona a Bignasco hanno mostrato una forte riduzione dei deflussi medi. Per la Maggia si passa da 9.94 m3/s prima della Figura 7.4 Ubicazione delle stazioni meteorologiche (sinistra) e idrometriche (destra).



con un fattore di riduzione di circa 2.5. Questa forte diminuzione dei deflussi medi si spiega in quanto una parte importante dell'acqua viene deviata a monte di Bignasco

La figura 7.5 rappresenta le serie annuali di piene di Bavona e Maggia a Bignasco, prima e dopo la costruzione degli sbarramenti, per il periodo 1949-1955. Per quanto concerne la Maggia è incontestabile che il periodo che segue la costruzione degli sbarramenti è caratterizzata da una variabilità molto accresciuta ed una maggiore frequenza

costruzione degli sbarramenti a 2.59 m3/s dopo la loro costruzione, un fattore di riduzione di circa 4. Lo stesso vale per la Bavona, sempre a Bignasco, dove per i medesimi periodi i deflussi passano da 6.55 m3/s a 2.55 m3/s

di portate massime sia di ampiezza grande, sia di ampiezze piccola. Mentre le piccole ampiezze possono facilmente essere spiegate dagli effetti dello sfruttamento idroelettrico (derivazione e accumulazione), è molto più sorprendente notare

Figura 7.5 Serie temporale delle portate massime annuali per la Maggia nelle due porzioni superiori. Il periodo evidenziato non è significativo poiché coincide con il transitorio in cui sono stati costruiti gli impianti.



l'aumento delle portate grandi. Occorre domandarsi se altri fattori come il clima o l'occupazione del suolo possano spiegare queste differenze. L'aumento della variabilità sembra anche provocare un innalzamento delle ampiezze medie delle piene. Nel caso della Bavona l'ampiezza dei picchi di deflusso non sembra essere modificata in maniera significativa. Si nota un aumento della freguenza di picchi di deflusso debole. Ciò deve essere verificato applicando un test statistico non parametrico come l'U-test di Mann e Whitney. Un test non parametrico è preferibile ad un test parametrico (come il test di Student) perché non fa assunzioni sulla distribuzione su cui basa il campione.

La figura 7.6 mostra la serie di esondazioni annuali del lago Maggiore. Oltre all'ef-

9

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

fetto dello sfruttamento idrologico della Maggia e degli altri bacini affluenti al lago, occorre considerare che il lago è regolato dalle autorità italiane a partire dal 1943 con obiettivi di produzione idroelettrica e di irrigazione. Di conseguenza le eventuali differenze tra i campioni che corrispondono alle situazioni "prima della costruzione delle dighe" (1868-1943) e "dopo la costruzione delle dighe" (1955-2003) sono parzialmente influenzate dalla gestione del lago. la distribuzione di Gumbel (la speranza matematica dello stimatore è uguale al suo valore reale).

 Analisi di frequenza, che consiste nell'aggiustare le differenti leggi statistiche sulle serie dei massimi annuali. In particolare sono utilizzate le leggi di Gumbel, la legge "Generalised Extreme Values" (GEV) e la legge Pearson III (LPIII) (v. Chow,1988, per i dettagli su queste leggi).





• Oltre al periodo non significativo tra il '49 ed il '55, bisogna anche considerare il '43, anno di inizio della regolazione dei livelli del lago alla diga della Miorina

7.2.2 Metodologia basata su un approccio statistico

La modellazione statistica delle portate risulta essere un approccio interessante poiché, anche se necessita unicamente delle serie di misure di portata, permette di arrivare ad un risultato, che ci può fornire indicazioni utili. Il trattamento statistico può essere riassunto in 5 punti.

- Analisi primaria delle serie di dati: visualizzazione grafica e test di omogeneità di Mann-Whitney per scoprire un eventuale effetto della gestione degli sbarramenti idroelettrici. Le serie sono divise in periodi omogenei "prima degli sbarramenti" e "dopo gli sbarramenti".
- 2. Calcolo delle frequenze empiriche secondo Gringorten:

$$\hat{p}_i = \frac{i - 0.44}{n + 0.12}$$

dove *n* è il numero di anni e i il rango della piena considerata (la serie è ordinata in ordine crescente). Si ritiene che questa frequenza empirica, a differenza delle altre formule di posizionamento, sia quella senza bias per Queste leggi propongono differenti formule di estrapolazione. La legge di Gumbel è spesso usata in Svizzera (BWG, 2003), la legge LPIII è uno standard degli studi americani (U.S. Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982), mentre la legge GEV, che è una generalizzazione della legge di Gumbel, viene raccomandata da diverse pubblicazioni (ad esempio, Cunnane, 1988). Le distribuzioni con tre parametri, come la GEV e la LPIII, sono più flessibili

e si adattano meglio alle serie di dati rispetto a quelle con due parametri, come la distribuzione di Gumbel. Esse sono però più sensibili alle fluttuazioni di campionamento, cosa che rende la stima dei loro parametri generalmente meno robusta. I parametri delle leggi sono stati stimati sia con il metodo della massima verosimiglianza (GEV), sia con il metodo dei momenti (Gumbel, LPIII).

- 4. Stima degli intervalli di confidenza al 95% per ogni legge. Esiste quindi la probabilità del 2.5% che il vero valore cercato sia più elevato del limite superiore dell'intervallo. La scelta di questa soglia non è discussa in questo capitolo ma è sembrata ragionevole relativamente ai valori delle piene calcolate.
- 5. Stima dei quantili e confronti.

7.2.3 Metodologia basata sulla modellizzazione pioggia-deflusso

La modellazione afflussi-deflussi apre delle prospettive interessanti poiché, dopo una fase di calibrazione per quantificare gli apporti degli affluenti principali e determinare i parametri rappresentativi, permette di estrapolare il comportamento del bacino per altri eventi meteorologici

importanti e più critici di quello dell'ottobre 2000. Inoltre, come già espresso in precedenza, l'analisi degli effetti della gestione degli sbarramenti idroelettrici basata sulla modellazione pioggia-deflusso non dipende dalla situazione climatologica e da altri fattori suscettibili d'influenzare le serie di portata studiate.

La ricerca di uno strumento informatico adatto alle condizioni alpine come quelle del bacino del fiume Maggia, ha condotto alla scelta del modello idrologico SOCONT, sviluppato da Bérod (1995), Consuegra e Vez (1996) alla Scuola Politecnica di Losanna (EPFL). Si tratta di un modello concettuale funzionante in continuo con un serbatoio lineare per la funzione di produzione e un serbatoio non lineare per la funzione di trasferimento. Rispetto ai modelli fisicamente basati, il modello concettuale riduce al minimo indispensabile la descrizione dei processi di creazione delle piene, richiede un ristretto numero di parametri e limita i tempi di calcolo delle simulazioni. Così, la calibrazione dei parametri e la generazione di lunghe serie di portata (parecchie centinaia di anni) non rappresentano una difficoltà importante per questi modelli. Uno schema del modello SOCONT è rappresentato nella figura 7.7.

La pioggia totale P è divisa in pioggia netta (scorrimento superficiale) Pnet e in pioggia che si infiltra Pinf in base allo stato di saturazione S del serbatoio suolo. Il serbatoio suolo è alimentato da Pinf e si svuota per evapotraspirazione reale ETR e con il flusso di base Qbase. ETR è legato all'evapotraspirazione potenziale ETP e al valore S. Il flusso di base dipende unicamente dallo stato di riempimento del serbatoio suolo.





La funzione di produzione adottata ha 3 parametri: la costante di recessione k espressa in h-1, il valore massimo d'acqua A assorbita nel suolo espresso in mm e l'esponente x, il cui valore è stato fissato uguale a 2 in base alle raccomandazioni di studi anteriori (Consuegra & Vez, 1996; Consuegra et al., 1998). La funzione di trasferimento utilizzata è un serbatoio non lineare che risulta dalla combinazione di una legge di attrito empirica (del tipo Manning-Stickler) e dall'equazione di continuità. Il deflusso superficiale (che deve essere aggiunto al flusso di base per avere la portata totale) è espresso dalla relazione:

$$Q_{quick} = \frac{W \cdot s^{3/2}}{n} \cdot H^{5/2} \qquad (1)$$

Il bacino versante è schematizzato da un piano di larghezza W (in m), di pendenza s e con coefficiente di rugosità di Manning n. La determinazione della larghezza e della rugosità nelle zone rurali è problematica. Per questo motivo si è preferito formulare la legge di svuotamento del serbatoio unicamente in funzione della pendenza e di un parametro da calibrare, _ . Questo parametro non è adimensionale per cui ogni cambiamento di schematizzazione comporterà una modifica del valore di questo parametro. Il flusso ruscellante diventa:

$$Q_{\text{anist}} = \boldsymbol{\beta} \cdot \boldsymbol{s}^{1/2} \cdot \boldsymbol{H}^{5/2} \tag{2}$$

La trasformazione da pioggia totale a snowmelt o precipitazione liquida viene effettuata con una versione molto semplice del metodo degree-day, un criterio a due parametri che considera la temperatura critica di scioglimento ed il fattore di scioglimento, posti pari a 0°C e 3.5 mm/°C/ giorno rispettivamente (WMO, 1986).

Per la calibrazione del modello occorre disporre di serie concomitanti di piogge e deflussi, preferibilmente a intervalli orari (modellazione delle piene). Se si impone una precedente trasformazione delle piogge in snowmelt e precipitazione liquida, durante questo periodo deve essere conosciuta anche la temperatura. Occorre inoltre considerare che la calibrazione del modello va fatta in condizioni naturali, cioè in assenza di effetti dovuti alla gestione idroelettrica. Ciò implica che per il bacino della Maggia è necessario effettuare la taratura con dati antecedenti agli anni '50. Come già menzionato al paragrafo 7.2.2 i dati meteorologici (precipitazioni e temperature) disponibili in quel periodo sono quelli di Locarno-Monti e Cevio. Per quanto concerne i dati idrometrici, si può fare riferimento alle serie giornaliere della Maggia e della Bavona a Bignasco (valori orari non sono disponibili per quel periodo). È quindi consigliabile verificare sui bacini "naturali" adiacenti se le calibrazioni danno i medesimi

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

risultati a passi temporali orari e giornalieri. La Maggia sarà modellizzata da un insieme di sottobacini versante di area pari a 100-200 km2 (tra cui quelli di Maggia e Bavona a Bignasco). La laminazione dei picchi nei corsi d'acqua sarà calcolata secondo l'approccio Muskingum (Cunge J.A. 1969).

La calibrazione del modello avviene secondo la seguente metodologia:

 Determinazione della relazione ottimale tra i due parametri che governano il deflusso di base (A e k). Gli studi preliminari hanno mostrato che questi due parametri sono altamente correlati. La figura 7.8 mostra chiaramente la non-unicità della coppia ottimale dei parametri A e k (ci sono diverse coppie che possono essere considerate ottimali). Tramite una curva di regressione si riesce ad ottenere una buona approssimazione della relazione tra le differenti coppie di parametri ottimali. I coefficienti della regressione sono stati determinati in modo tale che la componenQuesto metodo di calibrazione è molto semplice e prende in considerazione la relazione tra i parametri A e k. Non è stato utilizzato un algoritmo di ottimizzazione ad n-parametri (si veda per esempio Yapo et al., 1996), a causa dei problemi di minimi relativi che si possono incontrare e per la non robustezza delle stime ottime.

La performance del modello con i parametri calibrati può essere stimata con il criterio di Nash and Suttcliffe (NS, definito in Nash e Suttcliffe, 1970) ed il bias (PBIAS), ad un intervallo temporale orario o giornaliero. PBIAS, che è semplicemente il valore medio della differenza tra il deflusso osservato e quello simulato, misura la tendenza del modello a sovrastimare o sottostimare il deflusso reale (il valore ottimo è 0). Un valore positivo indica la tendenza a sovrastimare, mentre un valore negativo indica la tendenza a sottostimare. NS misura quale sia la frazione del deflusso simulato che riproduce il deflusso osservato, il valore ottimo è 1, mentre se è maggiore di 0 significa che il modello è minimamente accettabile.

te del deflusso di base del modello riproduca nel miglior modo possibile il deflusso di base di riferimento. È stato quindi utilizzato il criterio dei minimi quadrati. Il deflusso di base di riferimento (o deflusso di base "osservato") è stato ottenuto dalla serie temporale del deflusso totale osservato con un algoritmo numerico per la separazione

Figura 7.8 Calibrazione del modello afflussi-deflussi.



dell'idrogramma (metodo del "Base Flow Index" presentato da Gustard (1989)).

• Determinazione della coppia di parametri ottimali A e β (parametri di deflusso superficiale) per il deflusso totale minimizzando la funzione che calcola scarto quadratico. Quindi si confronta il deflusso simulato (deflusso di base e superficiale) con quello osservato. Per ogni valore del parametro A dei vari cicli di calibrazione, il parametro k viene calcolato utilizzando la relazione stimata nella prima parte della calibrazione. In figura 7.8 (a destra) si rappresenta un esempio della superficie di risposta che minimizza lo scarto quadratico medio. Al contrario della prima parte della calibrazione, si riesce ad ottenere un'unica coppia di parametri β e A (e di conseguenza_ anche il valore ottimo di k). • Sinistra: relazione ottima tra A e k (linea rossa) calcolata tramite i confronti tra i deflussi di base. Destra: superficie di risposta del errore quadratico medio per diverse coppie di A (in funzione di k) e di β .

7.2.4 Risultati preliminari (approccio statistico)

Il risultato del test statistico di Mann e Whitney con un intervallo di confidenza bilaterale del 5% è positivo per la Bavona a Bignasco, mentre è negativo per la Maggia a Bignasco in quanto la media dei massimi annuali prima della costruzione delle dighe si discosta molto dalla media dopo la costruzione degli impianti. Anche per i livelli del lago Maggiore a Locarno il test statistico di Mann e Whitney tra i campioni del periodo 1868-1942 e 1955-2003 ha dato esiti positivi, confermando i pochi cambiamenti significativi dopo la costruzione degli impianti idroelettrici e di regolazione.

I risultati dell'analisi frequenziale ottenuta per la Maggia a Bignasco, prima e dopo la costruzione degli sbarramenti (rispettivamente nei periodi 1929-1948 e 1955-1981) sono illustrati alla figura 7.9. La figura 7.10 mostra i risultati della Bavona a Bignasco, sempre per i periodi precedenti e posteriori alla costruzione degli sbarramenti. Sono stati indicati i risultati ottenuti tramite la legge di Gumbel e tramite la legge GEV. I risultati ottenuti con la legge LPIII, qui non rappresentati, sono simili a quelli della legge GEV. rispetto a quelli della legge di Gumbel. Ciò si spiega con il fatto che la legge di Gumbel si adatta relativamente bene ai dati della Maggia. Ricorrendo alla legge GEV occorre stimare un parametro supplementare, caratterizzante la forma e il grado di asimmetria del picco di piena. L'asimmetria è difficilmente stimabile per campioni di taglia relativamente modesta, in particolare se i dati presentano una forte varianza. Questi intervalli di confidenza, in gran parte dovuti all'incertezza del parametro di forma della legge GEV, possono diventare considerevoli.

Figura 7.9 Aggiustamenti statistici per la Maggia a Bignasco



Contrariamente, nella legge di Gumbel l'asimmetria e fissa e non dipende dai dati. L'utilizzo della legge di Gumbel implica quindi una scelta a priori del valore di asimmetria basata sull'esperienza e sulle informazioni ricavate in altri siti della regione.

della L'esempio Bavona mostra che quando la distribuzione di Gumbel si adatta meno bene ai dati l'aggiunta di un grado di libertà supplementare (il parametro di forma) è di grande beneficio per l'aggiustamento. In effetti l'intervallo di confidenza sui quantili stimati con la legge GEV si riducono immediatamente in modo stupefacente. In generale occorre precisare che i grandi intervalli di confidenza che caratterizzano la legge GEV non

• Alto a sinistra: Modello di Gumbel periodo prima degli sbarramenti; Alto a destra: Modello GEV prima degli sbarramenti; Basso a sinistra: Modello di Gumbel periodo dopo gli sbarramenti; Alto a destra : Modello GEV dopo gli sbarramenti.

La figura 7.9 mostra intervalli di confidenza dei quantili più grandi nel periodo dopo gli sbarramenti. Ciò è dovuto ad una maggiore variabilità dei massimi di deflusso della Maggia dei campioni dopo gli sbarramenti in confronto ai campioni del periodo prima degli sbarramenti. I valori degli intervalli di confidenza non dipendono unicamente dalla lunghezza delle serie di misura (che in questo caso sono simili per i due campioni), ma anche dalla varianza.

Si osserva pure che gli intervalli di confidenza risultanti dall'aggiustamento tramite la legge GEV sono maggiori

significano che la legge utilizzata sia inappropriata, ma indicano unicamente che la quantità di dati disponibili è insufficiente per stimare appropriatamente il coefficiente di forma. Sulla base della quantità di dati disponibili per le stazioni analizzate in questo studio, l'utilizzo della legge di Gumbel sembra rappresentare un compromesso più ragionevole in tutte le situazioni (anche per i dati del lago Verbano), sebbene essa derivi da una scelta a priori del coefficiente di forma. Evidentemente non è certo che questa scelta sia valida anche per eventi di piena estrema (superiori a quella centenaria). Un'analisi più accurata sul modello di piena più appropriato potrà essere effettuata con il modello di afflussi-deflussi, traendo profitto della maggiore lunghezza delle serie di precipitazioni.

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

Ter

o di ritomo

 Alto a sinistra: Modello di Gumbel periodo prima degli sbarramenti; Alto a destra: Modello GEV prima degli sbarramenti; Basso a sinistra: Modello di Gumbel periodo dopo gli sbarramenti; Alto a destra : Modello GEV dopo gli sbarramenti.

Infine si nota che nel caso della legge GEV cambia la forma della distribuzione. Nelle figure 7.9 e 7.10, la curvatura è leggermente orientata verso l'alto nei periodi prima degli sbarramenti mentre è orientata verso il basso nei periodi dopo gli sbarramenti.

La curvatura verso l'alto indica che l'asimmetria della distribuzione aggiustata è superiore a quella della legge di Gumbel mentre viceversa una curvatura verso il basso significa il contrario.

La figura 7.11 confronta le curve dei quantili in funzione dei tempi di ritorno, per le 3 stazioni di misura, nelle situazioni prima degli sbarramentie dopo gli sbarramenti. Sono rappresentati i risultati ottenuti con la legge di Gumbel e la legge LPIII. Le differenze, nel caso del lago Verbano, possono essere considerate non significative (sovrapposizione degli intervalli di confidenza), i risultati sono simili per quanto riguarda la Bavona a Bignasco mentre le differenze sono molto significative per la Maggia a Bignasco. È comunque interessante notare come nel caso della legge LPIII, le curve dei quantili tendano a ricongiungersi all'aumentare dei tempi di ritorno. Anche qui i risultati GEV e LPIII sono simili.

500 -500 R Value os servali ٠ 64 E400 E400 annuale 5 300 300 5 miles E WISSE IN EXCLOSE 200 200 Duration of 100 Ö 10 100 100 10 100 100 Ten e di ritorne T.e 500 -500 E400 £100 einung 300 Ē300 attelim a 200 200 Ē E Porteta g100 100 104 n 10 100 100 10 100 1000

Figura 7.10 Aggiustamenti statistici per la Bavona a Bignasco

Figura 7.11 Aggiustamenti statistici con relativi intervalli di confidenza per Maggia a Bignasco e lago Verbano a Locarno nelle situazioni prima degli sbarramenti (in blu) e dopo gli sbarramenti (in rosso), secondo il modello di Gumbel (a sinistra) e LPIII (a destra).

Tempo di ritorno



Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

La tabella 7.1 rappresenta i quantili delle piene con tempi di ritorno di 100 anni stimati con le tre leggi per la Maggia e la Bavona a Bignasco. Per la Bavona si nota che, a seconda del modello statistico utilizzato, la differenza tra le situazioni prima e dopo gli sbarramenti è sia positiva (Gumbel), sia negativa (GEV), che praticamente nulla (LPIII). Questa apparente contraddizione tra i risultati dei differenti modelli, applicati ai medesimi dati, conferma il fatto che le differenze non sono significative. Contrariamente, per quanto riguarda la Maggia, tutti i modelli concordano su una differenza di segno chiaramente positivo (aumento delle ampiezze della piena secolare). La tabella 7.2 rappresenta i quantili delle quote del Verbano. La stessa apparente contraddizione tra i modelli statistici è indice di effetti non significativi. e sfruttamento del suolo) possano aver influito, appare chiaro che lo sfruttamento idroelettrico eserciti un'influenza importante sulle piene. Le differenze non sono invece significative per la Bavona a Bignasco e la quota del lago Verbano a Locarno.

Si evidenziano inoltre i limiti dell'approccio statistico. In particolare esso è incapace di distinguere in maniera chiara tra le differenti cause dell'inomogeneità delle serie di dati studiati, specificatamente non riesce a stabilire il contributo reale dello sfruttamento idroelettrico a questa disomogeneità. Inoltre, l'approccio statistico è sensibile alle fluttuazioni del campionamento.

Ammettiamo ad esempio che i tre eventi meteorici più incisivi per il bacino siano avvenuti nel periodo di mis

Tabella 7.1 Quantili delle piene con tempi di ritorno di 100 anni per la Maggia et la Bavona a Bignasco.

Bacino	Modello	Q ₁₀₀ "prima degli sbarramenti" [m ³ /s]	Q ₁₀₀ "dopo gli sbarramenti" [m ³ /s]	Differenza [m ³ /s]
Bavona	Gumbel	187.4	219.0	31.56
Bavona	GEV	184.7	161.4	-23.30
Bavona	LPIII	188.3	190.0	1.75
Maggia	Gumbel	398.1	901.1	502.99
Maggia	GEV	405.7	803.8	398.10
Maggia	LPIII	408.5	830.6	422.13

ura dopo la costruzione degli sbarramenti. L'analisi statistica evidenzierà probabilmente una differenza significativa tra i periodi prima e dopo la costruzione degli sbarramenti, anche se gli sbarramenti non hanno avuto alcun effetto.

Tabella 7.2 Quantili delle quote con tempi di ritorno di 100 anni per il lago Verbano.

Bacino	Modello	H ₁₀₀ "prima degli sbarramenti" [m.s.m]	H ₁₀₀ "dopo gli sbarramenti" [m.s.m]	Differenza [m]
Lago Verbano	Gumbel	198.39	198.01	-0.38
Lago Verbano	GEV	198.36	198.78	0.42
Lago Verbano	LPIII	198.76	197.76	-1.01

Sarà quindi compito del modello afflussi-deflussi identificare in modo preciso il ruolo degli sbarramenti nella mitigazione, o al contrario, nell'accentuazione delle piene.

Il modello potrà ad esempio simulare la condizione naturale, cioè l'assenza

7.2.4 Conclusioni e sviluppi futuri

Questo studio, per mezzo di un'analisi di frequenza basata su dati osservati, traccia un primo profilo qualitativo degli effetti degli sbarramenti idroelettrici sulle piene della Maggia e sulle quote del Verbano. Sono state analizzate due serie di portate massime annuali (quelle della Maggia e della Bavona a Bignasco) e la serie delle quote del Verbano a Locarno. A livello del sottobacino della Maggia a Bignasco, si dimostra che le piene hanno assunto delle ampiezze significativamente più elevate dopo la costruzione degli sbarramenti degli anni '50 (valori medi e piena secolare) e questo nonostante il fatto che contemporaneamente i deflussi medi sono diminuiti nettamente. Sebbene altri fattori (come clima degli impianti idroelettrici ed inoltre simulare i dati di deflusso posteriori agli anni '50 e coprire integralmente tutto il bacino della Maggia. Il modello dovrà dapprima essere calibrato in base alle serie di dati di precipitazione e deflusso osservati in condizioni naturali, cioè nel caso della Maggia anteriori agli anni '50, quindi in base ai dati disponibili con passo temporale giornaliero. Un passo temporale orario sarà invece necessario per modellizzare le piene del bacino.

Occorrerà quindi verificare sui bacini naturali vicini se i parametri ottimali con passo tempotale giornaliero e passo temporale orario sono identici o se al contrario occorrerà applicare una trasformazione degli stessi. Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

7.3. METODOLOGIA E RISULTATI PER LA REGIONE PIEMONTE.

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 freguenza 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 svasi 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

$$q_{x}(t) - q_{x}(t, H) = \frac{dV(t, H)}{dt}$$
 (7.3)

che fornisce la variazione di volume in un invaso come differenza tra la portata in ingresso e la portata in uscita dagli organi di scarico, la quale dipende anche dal livello idrico nel serbatoio. Dall'integrazione della (7.1), si ricava il valore della portata al colmo in uscita che, rapportato al corrispondente valore al colmo della portata in ingresso, fornisce il coefficiente di laminazione

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_r}$$
(7.4)

Dato l'idrogramma di piena in ingresso al serbatoio, le condizioni iniziali (livello) e la geometria degli scarichi, se questi sono a soglia fissa dall'integrazione della (7.3) si ottiene univocamente il valore di . 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 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 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

$$V = v \mathbf{l} \cdot H_{hv}^{m} \tag{7.5}$$

in cui indica il volume idrico presente nel serbatoio in corrispondenza del livello, questo ultimo misurato a partire dalla quota di minimo invaso. L'interpolazione dei dati osservati, al fine di ricavare i parametri e, 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

$$q_x = \mu \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$$
(7.6)

funzione del coefficiente di efflusso , dell'area della luce di scarico e del carico idraulico, si può ridurre la (7.4) ad una legge di potenza data da

$$q_x = c \cdot H'' \tag{7.7}$$

in cui rappresenta la portata uscente per un carico sulla luce pari ad 1, ed è un esponente pari a circa per scarichi a stramazzo e pari a circa 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



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 a) 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'attenua-

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

zione 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 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:

$$\mu[h(d)] = \mu(I_o) \frac{d}{\left(I + \frac{d}{d_c}\right)^{\beta}}$$
(7.8)

Tabella 7.3 Parametri delle curve di possibilità pluviometrica.

	PLUVIOMETRIA												
	du	rate inferiori ad 1 o	ra	durate comprese tra 1 e 24 ore									
INVASO	para	metro		parametro	esponente								
	b	d _c	μ(1 ₀)	а	n	µ[h(t=24 ore)							
	[•]	[ore]	[mm/ora]	[mm]	[+]	[mm]							
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							

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

$$\mu[h(d)] = a \cdot d^{"} \tag{7.9}$$

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'ef-

fetto di riduzione areale, sulle aree di interesse.

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

$$Q_T = \mu(Q) \cdot K_T \qquad (7.10)$$

Per un periodo di ritorno T prestabilito, QT 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.

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

INVASO						FATTORE	DI CRESCI	TA KT						
	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		

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):

$$\mu(Q) = C_f \cdot A \cdot K_A \cdot \mu(I(t_R))/3.\epsilon \qquad (7.11)$$

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 K_A , valore che è corretto in base ad un fattore di riduzione areale, 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 udometrici 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

$$t_R = \frac{1.25 \cdot \sqrt{A}}{3.6 \cdot C}$$
(7.12)

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.

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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

INVASO	Coefficiente di Afflusso	Celerità	Area Bacino	Tempo di Ritardo	Fattore di Riduzione Areale	Media Intensità di Pioggia	Portata Indice	Coefficiente Udometrico
	C _f	С	Α	t _R	K _A	$\mu [\mathbf{I}_{\mathbf{A}}(\mathbf{t}_{\mathbf{R}})]$	μ(Q)	u
	Ţ.	[m/s]	[km²]	[ore]		[mm/s]	[m ³/s]	[(m³/s)/km²]
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 nelle 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

$$q_{\varepsilon}(t) = Q_{T} \cdot \left[\left(1 + 2b \cdot |t| \right)^{\varepsilon} - 2b \cdot c \cdot |t| \cdot \left(1 + 2b \cdot |t| \right)^{\varepsilon-1} \right] (7.13)$$

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

$$\varepsilon_D = (1 + b \cdot D)^{-c} \qquad (7.14)$$

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

$$b = \frac{1}{2 \cdot t_R}$$
(7.15)

$$c = \mathbf{I} - r_{\rm c} \tag{7.16}$$

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, basato sull'equazione 7.14, ed in uscita, dopo la laminazione.



Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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 invaso, aprendo opportunamente gli scarichi presenti nello sbarramento. In questo caso, tuttavia, per semplificare la valutazione, si permette il superamento teorico del livello di massimo invaso 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 guota 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 invaso, a meno di casi come Agrasina, Morasco, Sabbione e Vannino (vedi tabella 7.5), nei quali le particolari caratteristiche costruttive del singolo invaso 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'invaso, valori anche notevolmente diversi per il coefficiente di laminazione. Si può osservare, però, che esiste un fattore di scala tra risposta di un invaso 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'invaso 1 si ritrova un coefficiente di laminazione maggiore rispetto all'invaso 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 (v. 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 invaso) 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-

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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 eccepire 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.

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

INVASO	Configurazione		Valore	Valore Limite					
		10	50	100	200	500	1000	$\eta(T)$	Т
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

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 che 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

$$\alpha = \left(-\sqrt{r}\right) \tag{7.17}$$

che descrive l'effetto degli invasi, in cui

$$r = \frac{A_L}{A_R} \tag{7.18}$$

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

$$w = \frac{A_B}{A_c}$$
(7.19)

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

$$FARL = \prod_{i} \alpha_{i}$$
 (7.20)

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 invaso, 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 invaso, si può usare un metodo semplificato per il calcolo degli effetti determinati dalla presenza di un invaso.

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 invaso 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'invaso rispetto a quello in uscita (vedi figura 7.16).





L'idrogramma alla sezione di chiusura $q_{c,lam}(t)$ tenendo conto dell'effetto dell'invaso, sarà dato dall'idrogramma originario $q_c(t)$, valutato sull'area di capienza senza considerare l'eventuale presenza dell'invaso, 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'invaso 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 $\eta_{\mathcal{C}}$ valutato nella sezione di chiusura per effetto degli invasi sarà dato dal rapporto tra il valore al colmo dell'onda di

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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

$$\eta_C = \frac{Q_{C,lam}}{Q_C}$$
(7.21)

in cui il numeratore è ottenuto in base alla

$$Q_{C,Jaw} = Q_C - \sum Q_{e,inv} + \sum Q_{u,inv}$$
 (7.22)

Nella (7.20) 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 *Atot*, può essere suddiviso in due sotto-bacini. Il primo, di area *A1*, non presenta al suo interno opere di accumulo, mentre il secondo, di area *A2*, 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 Qinv la portata al colmo valutata in corrispondenza dell'invaso, con Q2 la portata al colmo in corrispondenza della sezione S2, con Q1 la portata del sotto-bacino 1 valutata in corrispondenza della sezione S1 e con Qtot la portata valutata per tutto il bacino individuato dalla sezione *Stot*. Alla sezione S2, il nuovo coefficiente di laminazione sarà dato da:

$$\eta_{S2} = \frac{Q2 - Qinv + \eta_{inv} \cdot Qinv}{Q2}$$
(7.23)

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:

$$x = \frac{Q1 + Q2}{Qtot}$$
(7.24)

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

$$\eta_{Stot} = \frac{\eta_{S2} \cdot Q2 + Q1}{x \cdot Qtot} = \frac{\eta_{S2} \cdot Q2 + Q1}{Q1 + Q2}$$
(7.25)

Nello specifico si è scelto di operare considerando i valori al colmo in ingresso ed in uscita dai serbatoi ed, 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 svaso 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 i 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 7.18. a). 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 7.18. b). Procedendo verso valle, si nota come le zone segnalate risultino principalmente vulnerabili per problemi derivanti da manovra di opere di scarico (figura 7.18.a). 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 (7.18.a) e coefficienti di laminazione (7.18.b) per l'alto corso del Toce, sezione di chiusura a Verampio.





Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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		I. Vevero	Alto Toce							T. Anza		T leorno			
Eventi	Alpe Cavalii ('26)	Campliccioli ('29)	Camposecco ('32)	Lago Cingino ('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																			

And

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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

	Bac	Bacini principali interessati dai singoli eventi										
Eventi	Toce - alto corso	Toce - basso corso	Bogna	Devero	Melezzo	Isorno	Diveria	Cairasca (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	

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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 dimensione 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 (η =0,975) e Ceppo Morelli (η =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 (7.19.a) e coefficienti di laminazione (7.19.b): bacino del Toce compreso tra le sezioni di Verampio e Villadossola.





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



Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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')

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], ultimo accesso 31/5/2005.

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.

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

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.

Il ruolo dei bacini artificiali nella formazione delle piene

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.