

STIMA DELL'EFFICIENZA DELLA CASSA DI LAMINAZIONE DI SANT'ANNA SUL PANARO

Matteo Balistrocchi^{1}, Roberto Ranzi¹, Stefano Orlandini² & Baldassare Bacchi¹*

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente, Università di Brescia (Brescia)

(2) Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università di Modena e Reggio Emilia (Modena)

**email: matteo.balistrocchi@unibs.it*

ASPETTI CHIAVE

- *Le prestazioni della cassa di laminazione sul Panaro sono state stimate tramite approcci diversi.*
- *Una serie di portate lunga 52 anni ha consentito di condurre una simulazione in continuo.*
- *Un metodo di stima stocastico è stato derivato da una distribuzione congiunta di colmi e volumi.*
- *Partendo dalle curve di riduzione delle portate sono stati ricavate piene di progetto.*
- *Il confronto tra simulazioni e metodo probabilistico ha evidenziato una soddisfacente concordanza.*

1 PREMESSA

La vasca di laminazione di Sant'Anna, realizzata allo scopo di mitigare la severità degli eventi di piena del tratto vallivo del Fiume Panaro (ultimo affluente di destra del Fiume Po), costituisce un presidio strutturale di capitale importanza per la sicurezza idraulica di una porzione di grande pregio della Pianura Padana, nella quale è inclusa la città di Modena. Un'ideale valutazione del rischio idraulico, che comunque permane nel tratto fluviale posto a valle di questo tipo di dispositivi, costituisce un obiettivo di primaria importanza nella pianificazione di bacino e nella definizione dei piani di intervento in corso d'evento. Nella pratica progettuale, tuttavia, il proporzionamento delle capacità d'invaso è comunemente condotto attraverso simulazioni di idrogrammi di progetto, ricavati tramite metodi prevalentemente indiretti di carattere statistico od idrologico.

Il ricorso a simulazioni di eventi sintetici isolati, sebbene consenta una rappresentazione dettagliata e fisicamente basata dei processi idrologici ed idraulici coinvolti, è comunque affetta da alcune deficienze concettuali. Nel caso in cui si impieghino modelli idrologici, ad esempio, la distribuzione spazio-temporale e la durata dello idrogramma di progetto, nonché le condizioni iniziali di umidità del bacino idrografico, devono essere scelte arbitrariamente. Nel caso invece si ricorra a metodi statistici, tali scelte coinvolgono la durata e la forma dell'idrogramma di piena. In entrambe le metodologie, inoltre, il volume idrico invasato nella vasca all'insorgere della piena non può che essere assunto nullo, trascurando cioè la possibilità di sovrapposizione tra eventi ravvicinati e la conseguente riduzione di efficienza della laminazione.

Dal punto di vista puramente teorico questo conduce a stime distorte, non sempre a favore di sicurezza, dei volumi da attribuire alle vasche e rende pertanto opportuno effettuare delle stime delle prestazioni mediante approcci di tipo continuo, come le simulazioni numeriche di lungo periodo, i metodi probabilistici o semi-probabilistici. Questi infatti permettono di tenere in considerazione, in modo concettualmente corretto, la naturale variabilità di un certo numero di caratteristiche rilevanti degli eventi di piena, oltre all'effettiva successione temporale delle loro occorrenze.

In questo senso, una parte della ricerca idrologica nel settore della statistica delle piene è stata tradizionalmente indirizzata allo studio delle correlazioni tra alcune caratteristiche degli idrogrammi di piena, che risultano rilevanti nei processi di laminazione: volume di piena, portata al colmo, durata dell'idrogramma, tempo di picco, numero di colmi. Queste analisi dirette hanno avuto come obiettivo principale quello di costruire distribuzioni di probabilità multivariata, utilizzando famiglie che erano dirette estensione di quelle univariate impiegate nella rappresentazione delle distribuzioni delle portate al colmo.

Purtroppo gli adattamenti ai quali queste distribuzioni conducono sono molto spesso non soddisfacenti, oltre a richiedere procedure preliminari atte a trasformare le distribuzioni empiriche marginali, in modo da renderle compatibili con quelle imposte dalla distribuzione teorica. Più recentemente, grazie all'introduzione

delle funzioni copula (Nelsen, 2006) nell'ambito della ricerca idrologica (Salvadori et al., 2007), la costruzione di distribuzioni multivariate di variabili idrologiche è divenuta molto più agevole ed ha consentito di ricavare modelli probabilistici in grado di rappresentare in modo molto più soddisfacente le strutture di dipendenza osservate. Inoltre, come dimostrato da Balistrocchi et al. (2017), da questo tipo di distribuzioni di probabilità è possibile, attraverso la teoria delle distribuzioni derivate, ricavare curve di frequenza dei colmi di piena degli idrogrammi rilasciati a valle di una vasca di laminazione, partendo da una distribuzione bivariata dei colmi e dei volumi di piena di quelli entranti. La derivazione può essere condotta attraverso una relazione algebrica, basata su uno schema di laminazione semplificato, secondo il quale gli idrogrammi in ingresso ed in uscita dalla vasca sono approssimati a triangoli.

In questa memoria, si illustra quindi un'applicazione di questo modello probabilistico alla vasca di laminazione di Sant'Anna. La sua affidabilità è verificata per confronto con la distribuzione di frequenza dei colmi delle onde di piena laminate, ricavata dall'analisi statistica di simulazioni numeriche di lungo periodo. Un ulteriore confronto è infine proposto in riferimento a simulazioni di eventi sintetici, derivati dalle curve di riduzione delle portate. La valutazione dell'affidabilità di questo tipo di metodologie appare comunque importante, alla luce della popolarità che esso ancora trova nella pratica ingegneristica.

2 MATERIALI E METODI

Il bacino del Fiume Panaro, illustrato nei suoi caratteri essenziali in Figura 1, offre un opportuno caso di studio per l'analisi statistica diretta delle caratteristiche delle onde di piena, in quanto monitorato nella sezione di Bomporto (area contribuyente 1036 km², lunghezza asta principale 106 km, dislivello medio 644 m, tempo di corrivazione 15 h). Essa sottende la quasi totalità della sua area contribuyente ed è stata attivata dal Servizio Idrografico Italiano sin dal 1923 e, dopo la sua dismissione, resa nuovamente operativa grazie ad ARPA Emilia-Romagna. L'analisi è stata condotta esaminando una serie pressoché continua di portate orarie osservate tra il 1923 ed il 1983, per un ammontare complessivo di 52 anni di registrazioni.

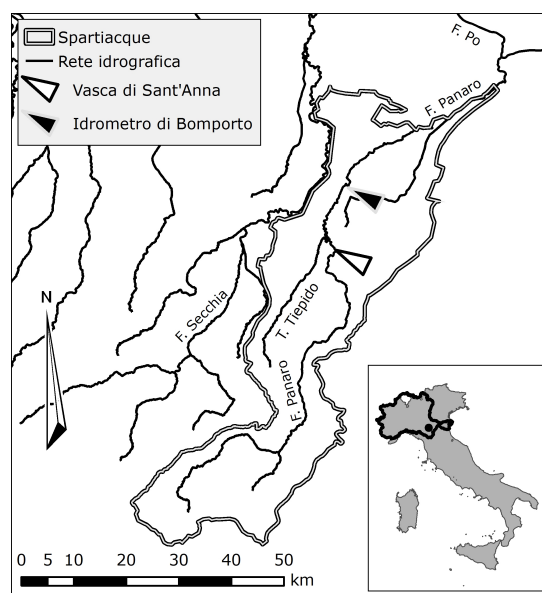


Figura 1. Bacino Idrografico del Fiume Panaro e localizzazione della vasca di laminazione di Sant'Anna e dell'idrometro di Bomporto.

2.1 Metodo probabilistico bivariato

La serie continua di portate è stata separata in durate parziali secondo un criterio *Peak-Over-Threshold* (POT), utilizzando una portata di soglia q_t pari a 100 m³/s ed un tempo minimo di inter-evento IETD di 48 h. Tali valori sono stati scelti nell'intento di ricavare eventi di piena significativi per la vasca di laminazione e sufficientemente distanziati, in modo da far sì che i relativi processi di invaso-svaso non interagiscano tra

loro (Balistrocchi et al., 2013). Il massimo e l'integrale delle portate osservate all'interno delle durate parziali sono stati assunti come occorrenze indipendenti delle variabili aleatorie di portata al colmo q_i e volume di piena v . Secondo il teorema di Sklar (1959), la distribuzione congiunta di tali variabili P_{Q_iV} può essere scritta nei termini indicati dall'equazione (1), dove P_{Q_i} è la funzione di probabilità marginale delle portate al colmo, P_V quella dei volumi di piena e C_θ è la cosiddetta funzione copula.

$$P_{Q_iV}(q_i, v) = C_\theta [P_{Q_i}(q_i), P_V(v)] \quad (1)$$

Tra le innumerevoli funzioni copula suggerite in letteratura, un adattamento oltremodo soddisfacente, sia in termini globali che di dipendenza delle code superiore ed inferiore, è stato ottenuto attraverso la famiglia Archimedeica di Clayton. La distribuzione P_{Q_iV} costruita attraverso questa funzione copula si caratterizza per un tipo di associazione concordante, con un'apprezzabile dipendenza di coda inferiore ma non superiore. La bontà di adattamento della copula è stata stimata tramite un blanket test basato sul criterio di adattamento di Cramer Von Mises (Genest et al., 2009), ottenendo che l'ipotesi nulla non fosse rigettabile per una significatività empirica superiore al 90%. Le distribuzioni marginali P_{Q_i} e P_V sono state invece rappresentate tramite una funzione GEV ed una log-normale, rispettivamente, mentre il loro grado adattamento è stato valutato tramite test della fascia fiduciaria, superati per una significatività del 10%.

La distribuzione così costruita è stata utilizzata per rappresentare la naturale variabilità degli eventi di piena prodotti dal bacino imbrifero sotteso dalla vasca di Sant'Anna (41,1 10⁶ m³ tra le quote di fondo 29,50 m s.l.m. e di coronamento arginale 44,85 m s.l.m.). Il processo di laminazione da essa operato è stato invece semplificato secondo le schema ad idrogrammi triangolari come suggerito da Wycoff & Singh (1976), linearizzando la curva di vaso-scarico come suggerito da Balistrocchi et al. (2013), attraverso una costante d'vaso k . Come mostrato in Balistrocchi et al. (2017), queste ipotesi consentono di derivare la distribuzione P_{Q_d} dei colmi q_d delle piene a valle di una vasca di laminazione mediante la relazione (2).

$$P_{Q_d}(q_d) = Pr\{Q_d \in \mathbb{R}^+ | Q_d \leq q_d\} = Pr\left\{Q_i, V \in \mathbb{R}^+ \mid \frac{V Q_i}{V + k Q_i} \leq q_d\right\} \quad (2)$$

La relazione (3) induce una ripartizione dicotomica nella popolazione bivariata rispetto alla quale è definita la distribuzione (1), consentendo di stimare la probabilità di non superamento di q_d integrando la densità di probabilità sulla regione sub-critica. Questa operazione è naturalmente facilitata dalla possibilità di operare nello spazio delle probabilità $[0,1]^2$ attraverso la densità della funzione copula. I valori dei parametri del modello probabilistico ottenuti per la sezione di Bomporto sono riportati in Tabella 1: ω numero medio di eventi annui, θ parametro di dipendenza di C_θ , k costante d'vaso della vasca, κ , μ e σ parametri di forma, localizzazione e scala delle distribuzioni marginali dei colmi e dei volumi di piena.

q_i (m ³ /s)	IETD (h)	ω (a ⁻¹)	θ (-)	k (h)	κ_{Q_i} (-)	μ_{Q_i} (m ³ /s)	σ_{Q_i} (m ³ /s)	$\mu_{ln(V)}$ (-)	$\sigma_{ln(V)}$ (-)
100	48	5.3	4.98	7.5	0.27	181.40	72.86	2.80	1.01

Tabella 1. Parametri del modello probabilistico.

2.2 Evento di progetto

Gli idrogrammi di progetto per assegnato tempo di ritorno sono stati ricavati tramite la riduzione delle portate al colmo alla durata, partendo dalla distribuzione marginale dei colmi in ingresso alla vasca P_{Q_i} ed applicando il coefficiente di riduzione $r(D, \Theta)$ proposto da Bacchi et al. (1992), indicato nell'equazione (3). Il parametro Θ rappresenta un tempo caratteristico del bacino e può essere stimato secondo il criterio geomorfologico proposto da Ranzi et al. (2006). Per il bacino in esame è stato stimato un valore di Θ pari a 23,4 h, dal quale discendono fattori di riduzione tra 0,88 e 0,75 per durate D comprese tra 15 h e 30 h. L'evento di piena è stato infine costruito assegnando all'idrogramma una forma rispondente alla funzione gamma, con colmo di tempo di ritorno assegnato e volume tale da riprodurre il fattore di riduzione $r(D, \Theta)$ (Ranzi, 2005).

$$r = \left\{ \Theta / (2 D) \left[2 + e^{-4 D / \Theta} - 3 \Theta \left(1 - e^{-4 D / \Theta} \right) / (4 D) \right] \right\}^{0.5} \quad (3)$$

2.3 Simulazioni continue

La distribuzione di riferimento per entrambi i modelli è stata ricavata tramite analisi statistica POT dei risultati di una simulazione numerica continua delle portate osservate. Le simulazioni sono state condotte mediante uno schema numerico Runge-Kutta del quarto ordine descritto in *Fiorentini & Orlandini (2013)*.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

Il confronto tra le diverse metodologie adottate per la stima delle curve di frequenza delle portate al colmo a valle della vasca di Sant’Anna, proposto in Figura 2, evidenzia una soddisfacente concordanza tra il metodo probabilistico bivariato e la simulazione continua. Questo mostra come l’impiego di uno schema di laminazione semplificato, teso a ridurre l’onere computazionale, consenta comunque di ottenere stime affidabili delle prestazioni della vasca. Il metodo di simulazione degli eventi di progetto si dimostra aderente agli altri modelli per tempi di ritorno bassi, mentre per quelli di maggiore interesse conduce ad una stima delle portate al colmo laminate decisamente a favore di sicurezza.

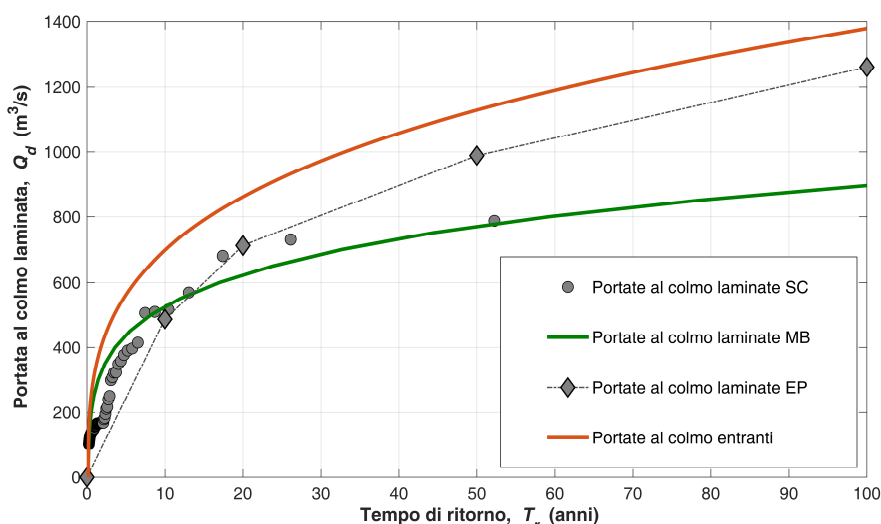


Figura 2. Distribuzione dei colmi delle piene: confronto tra simulazioni continue SC, modello bivariato MB, evento di progetto EP.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bacchi B., Brath A. & Kottegoda N.T., Analysis of the relationship between flood peaks and flood volumes based on crossing properties of river flow processes, *Water Resour. Res.*, 1992, 28(10), pp. 2773-82.
- Balistrocchi M., Grossi G. & Bacchi B., Deriving a practical analytical-probabilistic method to size flood routing reservoirs, *Adv. Water Resour.*, 2013, 62, 37-46.
- Balistrocchi M., Orlandini S., Ranzi R. & Bacchi B., Copula-based modeling of flood control reservoirs, *Water Resour. Res.*, 2017, 53(11), 9883-900.
- Fiorentini M. & Orlandini S., Robust numerical solution of the reservoir routing equation, *Adv. Water Resour.*, 2013, 59, 123-132.
- Genest C., Rémillard B. & Beaudoin D., Goodness-of-fit tests for copulas: a review and a power study, *Insur. Math. Econ.*, 2009, 44, 199-213.
- Nelsen R.B., An introduction to copulas, second ed., Springer, New York, 2006.
- Ranzi R., Structural and non-structural methods for flood hazard mitigation. Proc. of the Workshop on “Natural Environment, Sustainable Protection and Conservation: Italy-Vietnam Cooperation perspectives”, Hai Phong (Viet-Nam), 2005.
- Ranzi R., Galeati G. & Bacchi B., Idrogrammi di piena di progetto dedotti dalla trasformazione afflussi-deflussi, Atti del XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, 2006.
- Salvadori G., De Michele C., Kottegoda N.T. & Rosso R., Extremes in nature: an approach using copulas, Springer, Dordrecht, 2007.
- Sklar A., Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges, *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris*, 1959, 8, 229-231.
- Wycoff R.L. & Singh U.P., Preliminary hydrologic design of small flood detention reservoirs, *Water Resour. Bull.*, 1976, 12, 337-49.