

# PORTATE DI PROGETTO PER LA SICUREZZA IDROLOGICA DELLE DIGHE: UNA PROCEDURA PER VALUTARE LA QUALITÀ DELLE STIME

*Pierluigi Claps<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup> & Francesco Laio<sup>1</sup>*

*(1) Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture - Politecnico di Torino; Corso Duca degli Abruzzi, 24 - 10129 Torino*

## ASPETTI CHIAVE

- *Esistono sullo “scaffale” dell'ingegnere idraulico molti metodi di stima delle portate di progetto per elevati periodi di ritorno, ma mancano criteri per confrontarne l'affidabilità*
- *La procedura sviluppata consente l'attribuzione di un punteggio ad un generico metodo di stima in funzione della sua aderenza allo stato dell'arte e della consistenza della base dati utilizzata*
- *A stime finali ottenute mediante combinazione di stime provenienti da metodi diversi vengono attribuiti punteggi che pesano i singoli contributi in base all'affidabilità dei metodi usati.*

## 1 PREMESSA

Le stime di portate di progetto con periodi di ritorno pari o superiori a 100 anni sono inevitabilmente affette da elevati livelli di incertezza, riconducibili in particolare alla necessità di ottenere dalle curve di distribuzione di probabilità quantili per probabilità di non superamento (ad esempio 0.99) difficilmente riscontrabili tramite osservazioni dirette. In moltissimi casi le osservazioni sono del tutto assenti. Ne deriva una pletera di metodi di stima statistica riconducibili a diversi paradigmi metodologici, ma ognuno con fondamento teorico potenzialmente valido. Risulta pertanto improbabile pensare di poter selezionare un singolo metodo di stima “ottimale”, da utilizzare in ogni situazione pratica. La letteratura scientifica sta peraltro evolvendo in maniera chiara verso una visione in cui si predilige l'utilizzo simultaneo di diversi modelli idrologici di stima piuttosto che la selezione del singolo ‘miglior’ modello (equifinalità dei modelli idrologici).

La presente proposta suggerisce una procedura mirata a definire la verosimiglianza, ed a “misurare” la qualità, delle stime delle portate di progetto, tramite l'attribuzione di un punteggio (compreso tra 0 ed 1) per ogni possibile metodologia utilizzata. Punteggi bassi sono attribuiti a metodi a cui si associano alti livelli di incertezza, ad esempio perché i dati utilizzati sono poco numerosi, o perché i parametri sono stimati in maniera inadeguata. Una conseguenza resa possibile dalla metrica di qualità così definita è quella di poter differenziare i livelli di incertezza commisurati al progetto idrologico in aree caratterizzate da una diversa densità di dati, consentendo di assumere possibili atteggiamenti prudenziali in regioni dove anche l'applicazione di metodi di elevata qualità non consente di ottenere stime affidabili, a causa della ridotta disponibilità di dati idrologici di partenza.

La procedura è stata pensata per stime connesse alla valutazione della sicurezza idrologica delle dighe; da ciò derivano alcuni aspetti specifici, descritti in seguito. Con opportuni adattamenti può però applicarsi a casi più generali ed a periodi di ritorno inferiori al valore standard di 1000 anni utilizzato nel presente caso.

## 2 BASI PER LA DEFINIZIONE DEL LIVELLO DI QUALITÀ DEI METODI

La procedura di attribuzione del punteggio a metodi di stima utilizzati in un progetto idrologico si basa sulla classificazione dei metodi stessi e sulla quantità di dati utilizzati nell'analisi. Qualora all'interno di un progetto fossero utilizzati più metodi, a ciascuno di essi sarà attribuito separatamente un punteggio, per poi pervenire ad un'unica valutazione globale, come spiegato nel seguito. Il punteggio può essere attribuito solo se i metodi utilizzati sono esaurientemente descritti, con descrizione approfondita ed esaurienti riferimenti bibliografici, in modo da rendere le stime ripetibili.

Il punteggio attribuito ad ogni metodo deriva dalla composizione di due valori parziali, denominati  $S_Q$  e  $S_K$ , che dipendono dalle metodologie utilizzate per la stima della piena indice e della curva di crescita, utilizzando il criterio standard di suddivisione della stima in due fasi (metodo indice, *Grimaldi et al.*, 2011):

$$Q_T = Q_{ind} K_Q(T)$$

Nella presente proposta vengono indicati criteri generali per determinare le misure parziali e finali di attendibilità in base alla tipologia di metodo ed alle modalità di applicazione. I punteggi specifici sono assegnati sulla base dell'analisi di un gran numero di progetti idrologici realizzati nell'ambito di bacini di montagna e, in particolare, di bacini chiusi da invasi artificiali; i punteggi specifici possono essere adattati a diversi ambiti territoriali. Lo schema di attribuzione dei punteggi è riportato nella Figura 1.

### 3 ATTRIBUZIONE DEL PUNTEGGIO $S_Q$ (PIENA INDICE)

Ad ogni (possibile) diversa stima della piena indice riportata nella relazione di progetto idrologico, si attribuisce un punteggio  $S_Q$  in base alla metodologia usata per la sua determinazione, tenendo conto della quantità e qualità dei dati coinvolti nell'analisi. Il punteggio  $S_Q$  premia l'utilizzo di dati osservati nel bacino di interesse (stima locale), in quanto è riconosciuto dalla letteratura scientifica che anche pochi dati (5-10 osservazioni) conducono a stime della piena indice più affidabili di quelle ottenute con metodi indiretti o regionali (es., Laio et al., 2011).

In mancanza di un campione significativo di portate osservate nella sezione di interesse è possibile stimare il valore della piena indice utilizzando un approccio regionale, tipicamente basato su formule (multi)regressive che legano la portata indice a parametri caratteristici dei bacini (tra cui, ad esempio, la sua area). Tali formulazioni sono calibrate sulle stime effettuate in altri bacini, caratterizzati da un congruo numero di osservazioni. Il punteggio preliminare  $S_Q$  viene attribuito sulla base della densità di dati ( $d$ ) del modello regionale, calcolata come rapporto tra gli anni-stazione utilizzati e l'area di riferimento del modello. Si noti che il punteggio ottenibile con una stima regionale della piena indice non può mai raggiungere il valore unitario. Questa scelta è dovuta al fatto che, a differenza di quanto accade con riferimento ad una generica sezione fluviale, in presenza di un'opera di sbarramento dovrebbero essere disponibili misure di portata o, comunque, dovrebbe essere possibile ricostruire il bilancio del serbatoio, almeno a scala giornaliera. La definizione dei punteggi consente quindi di scoraggiare l'uso di modelli regionali in sezioni in cui la corretta gestione dell'opera consente senz'altro di poter effettuare una stima locale.

Nel caso in cui il campione sia formato da valori massimi giornalieri, o sulle 24 ore, il punteggio  $S_Q$  viene ridotto, per tenere conto delle incertezze presenti nella trasformazione tra valori di picco e valori osservati su finestre temporali più ampie. Il fattore di riduzione proposto risulta pari a

$$\alpha = 1 - 0.2 \cdot 2^{-\sqrt{A}/10} \quad (1)$$

dove  $A$  indica l'area del bacino espressa in  $\text{km}^2$ . Esso risulta trascurabile per bacini grandi, nei quali i dati giornalieri sono abbastanza simili e ben correlati ai valori al colmo di piena.

Nel caso di metodi di stima indiretti (afflussi-deflussi) del quantile di piena, anche se la stima della portata di progetto non viene presentata realizzando una separazione esplicita tra valore indice e fattore di crescita, si può comunque procedere come indicato, in quanto la separazione è possibile in base alla conoscenza della curva di frequenza adimensionale delle precipitazioni intense ( $K_P(T)$ ), che viene implicitamente assunta coincidere con quella delle piene ( $K_Q(T)$ ). Si noti che il valore indice (media) delle precipitazioni intense è generalmente stimabile in maniera robusta, grazie alla buona disponibilità e densità spaziale di serie storiche di precipitazione. L'elemento di maggiore incertezza insito nel metodo rimanda invece alla struttura del modello afflussi-deflussi ed alla difficoltà di stimarne i parametri. Per questi motivi, quando si è in presenza di un modello afflussi-deflussi, il punteggio  $S_Q$  viene valutato considerando solo la qualità del meccanismo di trasformazione tra piogge totali e piogge nette.

### 4 ATTRIBUZIONE DEL PUNTEGGIO $S_K$ (FATTORE DI CRESCITA)

La seconda componente del punteggio ( $S_K$ ) dipende dal metodo di valutazione del fattore di crescita che, analogamente al caso precedente, è basata su quantità e qualità dell'informazione utilizzata.

Una stima robusta "locale" (ovvero direttamente ottenuta dai dati) della curva di frequenza per elevati periodi di ritorno è possibile solo aggregando dati tramite tecniche regionali. Tuttavia, serie storiche sufficientemente lunghe possono essere proficuamente utilizzate per verificare e irrobustire le stime effettuate con altri metodi. Se il fattore di crescita viene stimato mediante modelli regionali, l'attribuzione

dei punteggi viene effettuata considerando la numerosità delle osservazioni ( $n$ , numero di anni-stazione) e la densità spaziale dei dati utilizzati per costruire il metodo di stima ( $d$ , espressa in numero di dati al  $\text{km}^2$ , definita come il rapporto tra  $n$  e la superficie della regione all'interno della quale il metodo di stima è applicabile). Si ritiene infatti che l'accuratezza del metodo regionale sia massima quando valgono contemporaneamente due condizioni: da un lato si sono utilizzati molti dati per calibrare i parametri del metodo regionale, riducendo di conseguenza l'incertezza di stima dei quantili elevati; dall'altro l'area di applicazione del metodo non è troppo ampia, in maniera da limitare la disomogeneità statistica.

La verosimiglianza dei risultati ottenuti con i metodi di trasformazione afflussi-deflussi dipende dalla quantità dei dati di precipitazione utilizzati per ricavare le stime di  $K_p(T)$ . Si possono distinguere casi in cui esso è stimato con metodi locali da casi in cui è stimato con metodi regionali. Qualora la stima delle precipitazioni intense sia basata su cartografie che forniscono direttamente i quantili (es. altezza di pioggia cumulata per una data durata e un prefissato periodo di ritorno), il punteggio da assegnare è pari a 0 quando la procedura di stima non sia ripetibile (talvolta non è possibile risalire al metodo di interpolazione e/o alla distribuzione di probabilità utilizzata per descrivere la grandezza di interesse). Inoltre, come noto, l'accuratezza dell'approccio isofrequenziale tende a diminuire con il crescere dell'area del bacino, dal momento che con la dimensione del bacino crescono anche l'eterogeneità spaziale delle precipitazioni e quelle delle condizioni di imbibimento dei suoli, eterogeneità che tendono ad esaltare le differenze tra la curva di crescita degli afflussi e quella dei deflussi; per tale ragione si suggerisce l'applicazione di un fattore di riduzione del punteggio in funzione dell'area del bacino. Tale fattore, denominato  $\beta$ , è stato definito come

$$\beta = 2^{-\sqrt{A}/10} \quad (2)$$

dove  $A$  rappresenta l'area del bacino.

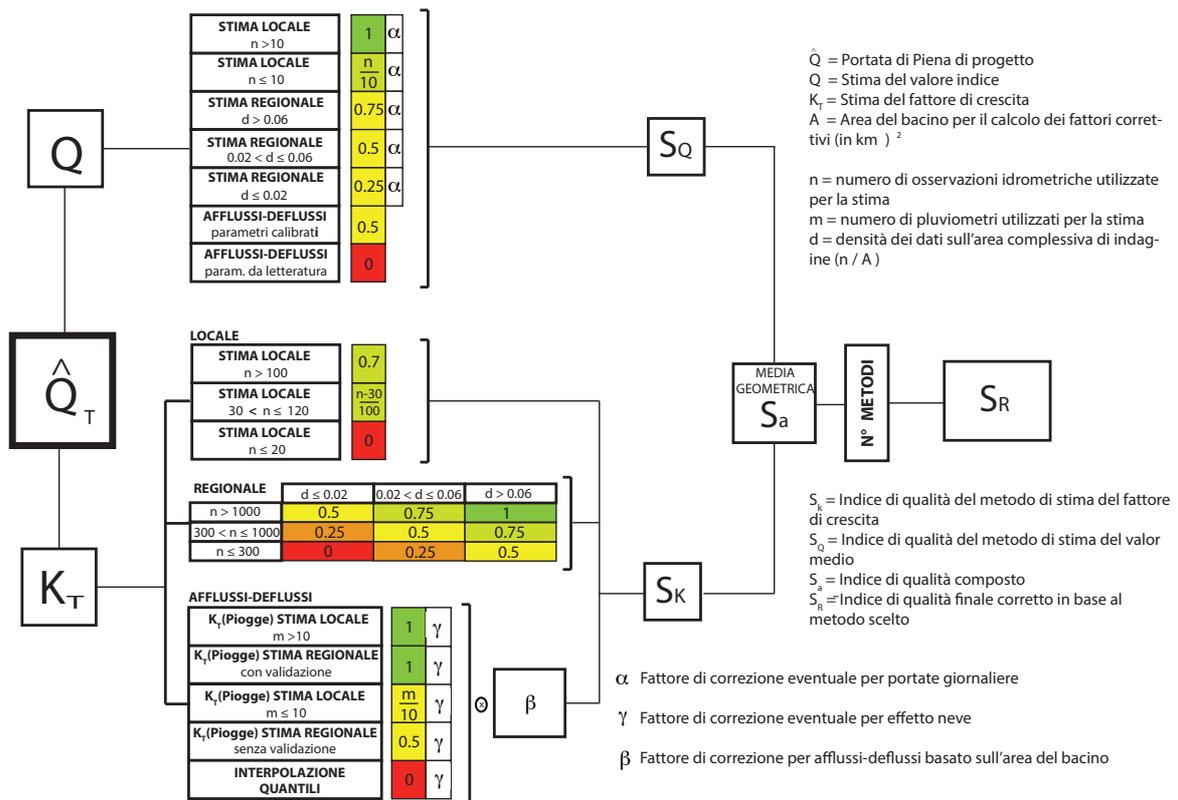


Figura 1. Esempio di griglia per l'attribuzione dei punteggi parziali per piena indice e fattore di crescita

Nel caso in cui la quota media del bacino sia superiore ai 2000 m s.l.m., il punteggio viene ulteriormente ridotto di un fattore  $\gamma=0.75$  se non sono stati usati metodi o correzioni per tenere in conto l'effetto dell'accumulo e scioglimento del manto nevoso.

## 5 DETERMINAZIONE DEL PUNTEGGIO FINALE

Essendo la stima della portata di progetto ottenuta come prodotto di un valore indice e di un fattore di crescita, il punteggio composto (per ogni stima) è ottenuto combinando il punteggio  $S_Q$  con il relativo punteggio  $S_K$ . Il risultato è l'indice di qualità complessivo, definito come:

$$S_a = \sqrt{S_Q \cdot S_K} \quad (3)$$

che corrisponde alla media geometrica dei punteggi parziali. Si è scelto di utilizzare la media geometrica invece della media aritmetica per tenere opportunamente conto del fatto che sia la piena indice sia il fattore di crescita agiscono come “fattori limitanti” nella determinazione della accuratezza di stima della piena di progetto: una stima inadeguata del fattore di crescita ( $S_K = 0$ ) si ripercuoterebbe totalmente sulla qualità di stima delle portate di progetto, anche qualora la stima della piena indice fosse molto accurata ( $S_Q = 1$ ). La teoria dei fattori limitanti porta a prediligere la media geometrica alla media aritmetica in modo che, ad esempio,  $S_a$  valga zero quando anche uno solo tra  $S_Q$  e  $S_K$  assuma valore nullo.

Qualora la stima della portata di progetto  $Q_T$  sia ottenuta applicando più metodi di stima indipendenti si procede associando un punteggio finale  $S_R$  al valore  $Q_T^*$  scelto quale stima definitiva.  $Q_T^*$  potrebbe essere suggerito in vari modi: valor medio delle singole stime, valore massimo (in sicurezza) o valore soggettivamente attribuito quale stima ottenuta dal metodo “più affidabile”. Nel primo caso  $S_r$  è attribuibile come somma dei singoli punteggi  $S_a$  ottenuti da ogni metodo applicato. Negli altri casi andrebbero predisposti ulteriori algoritmi per pesare in maniera diversa le scelte effettuate, eventualmente considerando di privilegiare le stime a favore di sicurezza. In ogni caso, utilizzando procedure come quella qui proposta, sarebbe possibile assumere come valore di progetto finale  $Q_T^*$  una media pesata delle singole stime, con pesi basati sui punteggi ‘di qualità’ dei metodi.

## 6 ESEMPIO DI APPLICAZIONE

Un esempio di applicazione è riportato nella Tabella 1, in cui si ipotizza un caso in cui  $Q_T^*$  (non riportato) deriverebbe dall'applicazione di 3 metodi. I metodi 1 e 2 hanno in comune la stima della piena indice (stima diretta locale, per cui si applica il fattore correttivo  $\alpha < 1$ ) mentre  $K_Q(T)$  deriva da due modelli regionali diversi, con ugual grado di affidabilità (uguale punteggio  $S_K$ ). Il terzo metodo è del tipo afflussi-deflussi, in cui la  $K_P(T)$  è stato determinato dall'applicazione di un modello regionale delle piogge. La densità dei dati e le altre informazioni necessarie sono tutte derivate dai riferimenti citati.

Metodo	$Q_T$	$Q_m$	$S_0$	$\alpha$	$S_Q$	$K_T$	$S_0$	$\beta$	$\gamma$	$S_K$	$S_a$
1	116	Locale n=35	1	0.86	0.86	Reg. n=753 d=0.08 (Brath et al.,1997)	0.75	1	1	0.74	0.8
2	52	Locale n=35	1	0.86	0.86	Reg. n=1100 d=0.03 (Villani, 2001)	0.75	1	1	0.74	0.8
3	53	Aff-Def: (Flea)	0.5	1	0.5	Aff-Def Reg. (Villani, 2001)	1	0.7	1	0.7	0.59

**Tabella 1.** Esempio di applicazione alla diga della “Bagnarola” (area bacino 26 km<sup>2</sup>; quota media bacino 2640 m s.l.m.)

**RINGRAZIAMENTI** Lavoro svolto con il contributo della Direzione Generale Dighe del Ministero Infrastrutture e Trasporti

### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Brath, A., De Michele, C., Galeati, G., & Rosso, R. Una metodologia per l'identificazione di regioni omogenee nel regime di piena – Applicazione all'Italia nord-occidentale. L'Acqua 1997.
- Grimaldi, S., Kao, S. C., Castellarin, A., Papalexiou, S. M., Viglione, A., Laio, F., Aksoy, H. & Gedikli, A. Statistical Hydrology, in Treatise on Water Science – Volume 2. Elsevier, 2011.
- Laio, F., Ganora, D., Claps, P. & Galeati, G. Spatially smooth regional estimation of the flood frequency curve (with uncertainty). Journal of Hydrology 408: 67-77. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.022. 2011
- Villani, P. (a cura di). La valutazione delle piene in Piemonte. CUGRI. Torino, 2001