



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

Progetto di Approfondimento Conoscitivo per l'Idrologia
dei Bacini del Carrione e del Frigido.

Relazione Attività 4: Soglie pluviometriche

Sommario

Introduzione	2
Criterio di definizione delle soglie pluviometriche	3
Definizioni generali	3
Criteri di scelta dei parametri operativi ottimali	4
Criterio di scelta dei valori ottimali di soglia pluviometrica	6
Applicazione al bacino del Carrione	8
Serie idro-pluviometriche	8
Soglie ottimali	10
APPENDICE – Risultati di dettaglio	12

Introduzione

Scopo del presente studio è la definizione di valori di soglia pluviometrica per il bacino del Carrione da utilizzarsi in tempo reale, congiuntamente e non alternativamente ad altri strumenti di previsione idrologico-idraulica, a riferimento per la previsione a breve termine di possibili stati di pericolo di piena lungo l'asta principale del torrente omonimo, ed in particolare del tratto che attraversa l'abitato di Carrara.

Di comune accordo con il Centro Funzionale della Regione Toscana, le suddette soglie sono da intendersi come riferimento per le precipitazioni misurate ai pluviometri nel bacino e immediatamente limitrofi, intesi come predittori singolarmente e/o congiuntamente per la stima media areale sul bacino stesso. Lo stato idrometrico di riferimento, per il quale si assume il ruolo formale di predittando, è quello misurato all'idrometro di Avenza. Tale idrometro è stato scelto in quanto considerato il migliore fra quelli presenti nel bacino dal punto di vista della durata e stabilità delle misure, disponibili con continuità e risoluzione sub-oraria dal 2010.

La letteratura scientifica riporta diversi criteri per la definizione di soglie pluviometriche al fine di attivazione di allerte per possibili effetti disastrosi al suolo [1]. Il maggior sviluppo e trasferimento ad applicazioni pratiche si ha avuto relativamente alla previsione di fenomeni di frana. Per quanto riguarda l'applicazione alla previsione di stati di rischio idraulico, gran parte degli approcci proposti riconoscono la necessità di appoggiarsi, almeno in parte, alla modellistica idrologica anche nella definizione delle soglie pluviometriche. Ciò al fine di risolvere la sensibilità della risposta idrologica allo stato iniziale di umidità del suolo. In altri casi, la formulazione pone l'attenzione sulla definizione di soglie pluviometriche per allertamenti generalizzati su areali più o meno vaste, senza esplicito riferimento a specifici tratti fluviali [2][3]. In tali casi vengono determinate curve di altezza di pioggia in funzione della durata, sostanzialmente non dissimili a curve per assegnato tempo di ritorno. Nel caso qui in esame, da un lato la presenza di un modello idrologico/idraulico già operativo per la previsione delle piene renderebbe ridondante un approccio basato sulla definizione di soglie pluviometriche condizionate agli stati stimati dal modello idrologico. Inoltre, il riferimento ad uno specifico 'target' di allerta, il tratto del Carrione che attraversa la zona urbana di Carrara, consente una analisi più focalizzata anche sulle durate di pioggia più significative. Per tali motivi si è ritenuto opportuno sviluppare una metodologia con aspetti innovativi rispetto a quanto già esistente in letteratura.

[1] – Segoni, S., Piciullo, L. and Gariano, S. L., 2018. A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4.

[2] – ARPA Piemonte, 2004. Progetto di un sistema informativo meteo-idrologico che integra le risorse osservative e modellistiche a supporto della gestione del rischio per la protezione civile nazionale. SOGLIE PLUVIOMETRICHE.

[3] - L. V. Martina, E. Todini, and A. Libralon, 2006. A Bayesian decision approach to rainfall thresholds based flood warning. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 413–426.

Criterio di definizione delle soglie pluviometriche

Definizioni generali

Si adottano le seguenti definizioni:

$H(y, t)$ = Altezza idrometrica misurata alla stazione y nell'istante t .

$H_0(y)$ = Soglia idrometrica di allertamento alla stazione y , ipotizzata indipendente dal tempo.

$P(x, t, D)$ = Altezza di pioggia misurata o stimata in x (inteso come singolo pluviometro o come media areale sull'intero bacino) all'istante t sull'intervallo di durata D , cioè l'altezza pioggia caduta nell'intervallo temporale $[t - D, t]$.

$P_0(x, D, H_0, y)$ = Soglia pluviometrica definita in x per la durata D , da utilizzarsi per la previsione del superamento del livello di allerta H_0 nella stazione idrometrica y . Anche tale soglia si intende indipendente dal tempo, potendo tener conto delle diverse condizioni di saturazione del suolo tramite l'indice API sotto richiamato.

$API(x, t)$ = Antecedent Precipitation Index, indicativo dello stato di saturazione del suolo in x all'istante t , calcolabile su base pluviometrica tramite la seguente formula ricorsiva:

$$API(x, t) = k \cdot API(x, t - dt) + P(x, t, dt)$$

dove:

dt = passo di calcolo, coincidente con l'intervallo di misura delle precipitazioni;

k = costante, desunta da letteratura, dipendente dal passo di calcolo

$$(k = 0.996 \text{ per } dt = 15 \text{ minuti}).$$

$\Delta t_{min}, \Delta t_{max}$ = valori massimo e minimo dell'anticipo temporale utile per l'allertamento idrometrico. Si precisa che è necessario definire anche un valore massimo, non troppo superiore del tempo caratteristico di risposta del bacino, per evitare che vengano evidenziati come correttamente previsti eventuali superamenti della soglia idrometrica conseguenti a precipitazioni cadute successivamente a quelle considerate per l'allertamento, ad esempio durante eventi meteorologici complessi con più scrosci successivi.

L'utilizzo dell'indice API consente di tenere conto, se pur in maniera puramente indicativa ma senza la necessità di un modello idrologico, di condizioni di diversa saturazione. Tale indice ha le stesse dimensioni della pioggia, e con questa può essere combinata tramite un parametro di peso W , in maniera da lasciare formalmente costante nel tempo la soglia pluviometrica P_0 .

Si assume quindi la seguente definizione per l'evento predittore, di tipo booleano:

$$\mathbb{E}_P: P(x, t, D) + W \cdot API(x, t) > P_0(x, D, H_0, y)$$

Mentre per l'evento predittando, anch'esso booleano, vale l'espressione:

$$\mathbb{E}_H: \max\{H(y, \tau); \tau \in (t + \Delta t_{min}, t + \Delta t_{max})\} > H_0(y)$$

La combinazione dei due possibili stati dei due eventi definisce la seguente tabella di contingenza:

		Evento Predittando \mathbb{E}_H	
		False	True
Evento Predittore \mathbb{E}_P	False	Reject	Missed
	True	False	Hit

Tabella 1 - Curva di contingenza per previsore/predittando booleani.

Criteri di scelta dei parametri operativi ottimali

Per la previsione a ciascun idrometro, la scelta del valore (o dei valori) ottimali di soglia pluviometrica P_0 dipende da diversi parametri, raggruppabili in parametri operativi e parametri economici.

I parametri operativi, sulla base delle definizioni sopra richiamate, sono:

- i pluviometri o le combinazioni di pluviometri sopra indicati con la variabile x ;
- la durata della pioggia D ;
- la finestra temporale di previsione $[\Delta t_{min}, \Delta t_{max}]$;
- il peso W dell'indice API ;
- la soglia idrometrica H_0 .

I parametri economici, su cui si specificherà più avanti, definisco i valori (assoluti o relativi) monetari equivalenti di ciascuno dei quattro casi della tabella di contingenza sopra richiamata.

L'analisi economica dei diversi casi esula dal presente studio, e su alcuni di essi si possono avanzare solo alcune ipotesi di primo tentativo utili ad una prima definizione delle soglie in forma chiusa. È quindi opportuno adottare una metodologia di scelta dei parametri operativi che sia indipendente dai valori dei parametri economici, in maniera che tale scelta rimanga valida anche a seguito di successivi approfondimenti sui costi effettivi delle diverse tipologie di evento.

Procedendo quindi prima alla definizione dei parametri operativi, l'analisi comparativa di diversi set di parametri può essere effettuata prendendo come funzione obiettivo una misura che prescindendo dall'effettivo valore di soglia, che potrà essere definito solo a valle della scelta anche dei parametri economici. A tale fine si utilizza la cosiddetta curva ROC (Receiver Operating Characteristics). La curva ROC è una tecnica statistica che misura l'accuratezza di un test diagnostico lungo tutto il range dei valori possibili. Al variare del valore di controllo (in questo il valore della soglia pluviometrica) la curva riporta sull'asse orizzontale la percentuale di falsi allarmi (falsi positivi) e sull'asse verticale la percentuale di allarmi 'indovinati' (veri positivi), il primo calcolato rispetto al totale di casi di non superamento della soglia idrometrica ed il secondo rispetto al totale di casi di superamento (Figura 1).

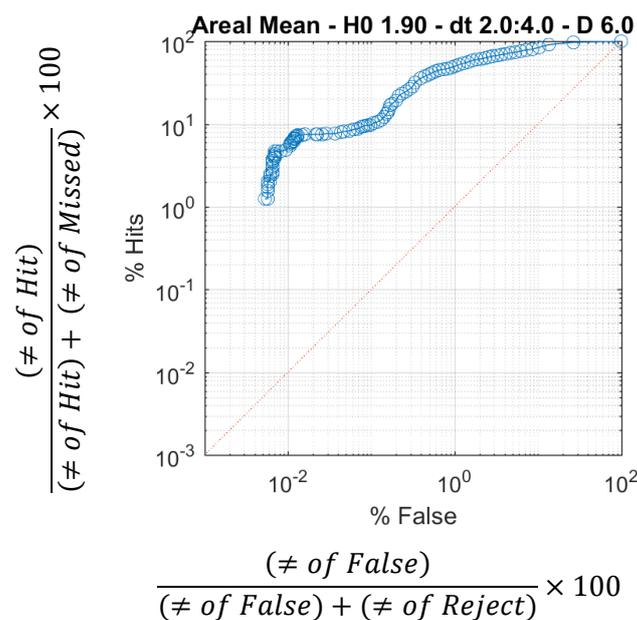


Figura 1 - Esempio di curva ROC, con definizione degli assi, per i parametri operativi riportati nel titolo della figura.

All'aumentare del valore di soglia pluviometrica, il numero di falsi allarmi sicuramente diminuisce, ma diventa anche sempre più difficile prevedere gli eventi di superamento idrometrico, e quindi la curva tende al punto di coordinate (0,0). Viceversa, al tendere a 0 della soglia pluviometrica tutti gli eventi idrometrici risultano previsti, ma aumenta anche enormemente il numero di falsi allarmi, e la curva tende al punto di coordinate (1,1). Si può dimostrare che, qualora il predittore sia assolutamente scorrelato dal predittando, la curva ROC si dispone lungo la retta con pendenza 1:1. Capacità predittive non nulle corrispondono a curve ROC in cui le percentuali di allarmi indovinati risultano sempre superiori a quelle dei falsi allarmi. Una misura sintetica della capacità predittiva, indipendente dal singolo valore di soglia prescelto, può essere quindi fornita dall'integrale della curva ROC (qui denominato IROC). Questo sarà pari a 0.5 per capacità predittiva nulla e tenderà asintoticamente a 1 per capacità predittive crescenti.

Si osserva poi che, fra i parametri operativi, alcuni sono effettivamente determinanti con criterio di ottimizzazione puramente statistico, ed in particolare la durata di pioggia D ed il peso W dell'indice API , mentre per gli altri valgono le seguenti considerazioni aggiuntive:

- a) Ai fini di una più applicazione il più possibile comprensiva di diverse fenomenologie idrometeorologiche, può essere opportuno non restringere la selezione del set pluviometrico x ad un unico pluviometro o un'unica combinazione e della soglia idrometrica H_0 ad un unico valore, ma arrivare a definire invece più soglie pluviometriche per diverse combinazioni di x e H_0 .
- b) Nella scelta della finestra temporale di previsione $[\Delta t_{min}, \Delta t_{max}]$, è opportuno tenere anche in considerazione del fatto che previsioni più anticipate nel tempo (valori maggiori di Δt) possono essere più utili anche se meno affidabili. Il miglior compromesso fra anticipo e affidabilità delle previsioni non è in generale risolvibile a priori con criteri puramente oggettivi.

A titolo di esempio si riportano in Figura 2 i valori dell'indice IROC (integrale della curva ROC) calcolati al variare della durata di pioggia D e del peso W dell'indice API sulla base dei dati descritti al capitolo successivo. Si osserva, analogamente ad altre combinazioni degli altri parametri operativi, una sensibilità significativa rispetto alla durata della pioggia ed una scarsa significatività dell'indice API .

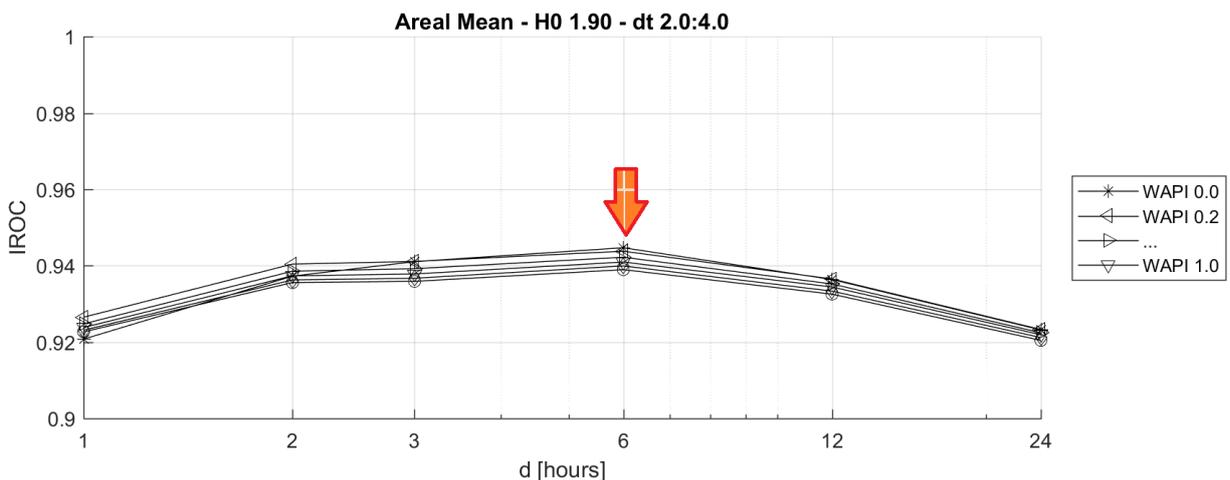


Figura 2 – Esempio di identificazione dei valori ottimali di durata di pioggia D e peso W dell'indice API tramite massimizzazione del valore di IROC (integrale della curva ROC).

Criterio di scelta dei valori ottimali di soglia pluviometrica

Per ciascun set di parametri operativi ($x, D, [\Delta t_{min}, \Delta t_{max}], W, H_0$), il valore ottimale della soglia pluviometrica P_0 può essere determinato in considerazione di quanto variano, in funzione di questa, le diverse percentuali o frequenze di allarmi indovinati (correttamente previsti) e falsi allarmi. Ambedue crescono al diminuire del valore della soglia pluviometrica anche se con tasso di crescita diverso (come visualizzato dalla curva ROC). La soglia andrà quindi scelta come miglior compromesso fra il ‘guadagno’ per riduzione di danno nei casi di allarme indovinato e ‘spesa non produttiva’ per le procedure di protezione civile nei casi di falso allarme.

Il primo passo è quindi il calcolo delle curve di allarme indovinato (*Hits*) e di falso allarme (*False*), per ciascun set di parametri operativi, per semplice conteggio su serie storiche pluviometriche e idrometriche dei corrispondenti casi definiti in Tabella 1, come mostrato ad esempio in Figura 3. Nell’effettuare tale conteggio è importante considerare come eventi distinti i superamenti delle soglie (pluviometriche e idrometriche) solo se separati da una distanza temporale sufficientemente lunga, in maniera da non contare più volte quello che di fatto risulterebbe essere, ad esempio, una stessa onda di piena. Nell’applicazione qui descritta tale distanza temporale minima è stata fissata in 12 ore, sia in ragione del tempo di risposta del bacino in esame che delle procedure di sala operativa.

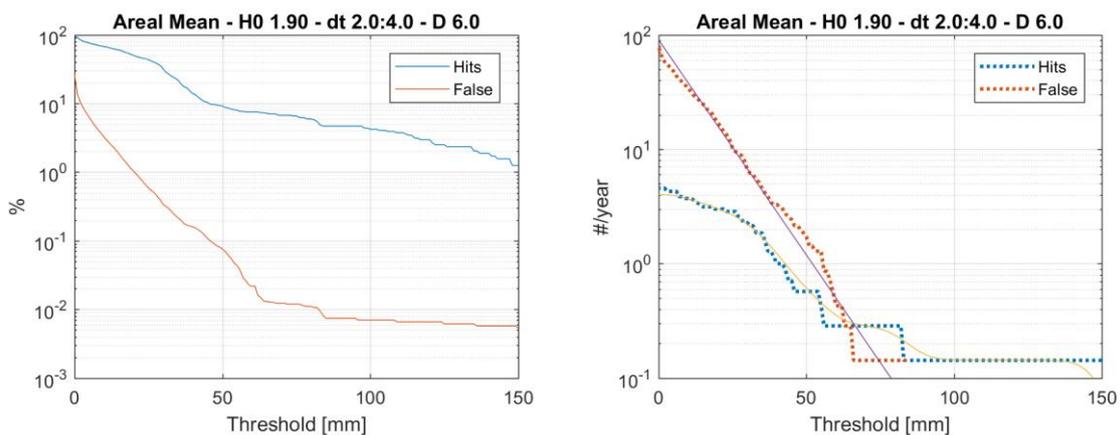


Figura 3 - Esempio di curve di allarme indovinato (*Hits*) e di falso allarme (*False*) in funzione del valore di soglia pluviometrica, espresse in termini di percentuali (a sx) e di tasso medio annuo (dx).

Dall’esempio di Figura 3 si osserva come, anche a causa di serie storiche di durata limitata, le curve stimate per conteggio di eventi mostrano andamenti con pendenza discontinua, soprattutto all’aumentare dei valori di sogli pluviometrica. Per poter quindi comparare le due curve (ad esempio, come descritto più avanti, tramite una somma pesata) è opportuno stimarne una approssimazione tramite funzioni a derivata continua. In particolare:

- La curva del tasso medio annuo di falsi allarmi è ben approssimabile con una curva (lineare in scala semilogaritmica) del tipo:

$$False(P_0) = Ae^{-BP_0}$$

- La curva del tasso medio annuo di allarmi indovinati, di andamento più complesso, deve essere approssimata come somma di più curve continue (e.g. funzioni *Erf*):

$$Hits(P_0) = \sum_i C_i Erf\left(\frac{P_0 - \mu_i}{\sigma_i}\right)$$

Come precedentemente detto, la scelta oggettiva del valore ottimale della soglia pluviometrica P_0 richiederebbe una analisi economica di dettaglio per valutare i diversi costi degli allarmi, dei danni in caso

di piena e della loro riduzione conseguente ad una loro possibile previsione. In prima approssimazione, si può ipotizzare che tale analisi produca, come risultato fondamentale il rapporto fra il costo di un mancato allarme (inteso come mancato beneficio in termini di riduzione del danno se l'allarme fosse stato dato) e costo di un falso allarme (inteso come somma di tutti costi, non solo monetizzabili, di tutte le operazioni conseguenti l'allarme). Indicando con G tale rapporto, si può allora determinare il valore ottimale di P_0 cercando il minimo della seguente funzione 'costo totale':

$$C_{tot}(P_0) = False(P_0) + G[Hits(0) - Hits(P_0)]$$

dove il termine $Hits(0)$ fornisce il tasso medio annuo di eventi su cui sarebbe stato necessario dare l'allarme (coincidente con il numero di allarmi corretti per soglia pluviometrica pari a 0). Un esempio di tale funzione per diversi valori del rapporto G è rappresentato in Figura 4, nella quale si osserva chiaramente che il valore ottimale di P_0 si sposta verso valori maggiori al diminuire del valore di G , cioè, in sostanza, al diminuire della riduzione del danno ottenibile con gli allarmi. Nel caso specifico, quando i due costi sono comparabili ($G \leq 2$), la funzione costo totale non ha più un minimo e quindi l'intera procedura diventa economicamente inconveniente.

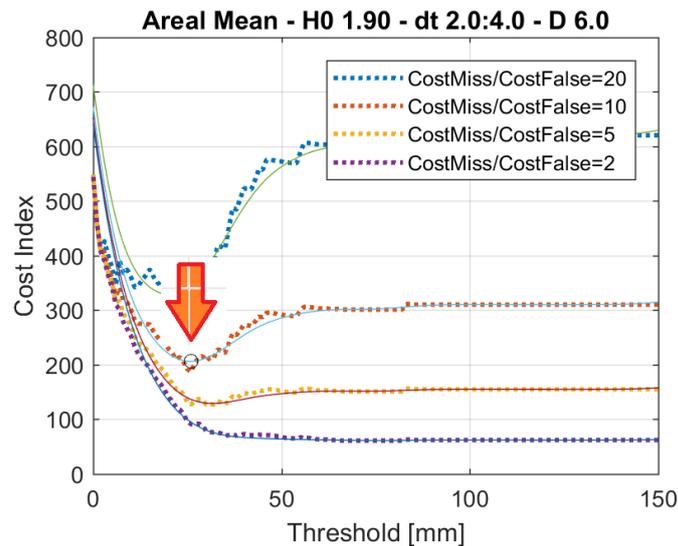


Figura 4 - Esempio di funzioni 'costo totale' per diversi valori del rapporto fra il costo di un mancato allarme e costo di un falso allarme.

Applicazione al bacino del Carrione

Serie idro-pluviometriche

Per l'applicazione al bacino del Carrione si avevano a disposizione due serie idrometriche di durata almeno pluriennale: alla stazione idrometrica di Carrara (Codice TOS01004005, coordinate G.B. E 1588240 N 4881391) e Avenza (Codice TOS01004007, coordinate G.B. E 1584876 N 4877268). Di comune accordo con il Centro Funzionale, la serie idrometrica di Carrara è stata ritenuta inadatta per la definizione di soglie idrometriche sufficientemente stabili durante il periodo di osservazione, e quindi l'analisi si è concentrata sulla serie idrometrica di Avenza (Figura 5).

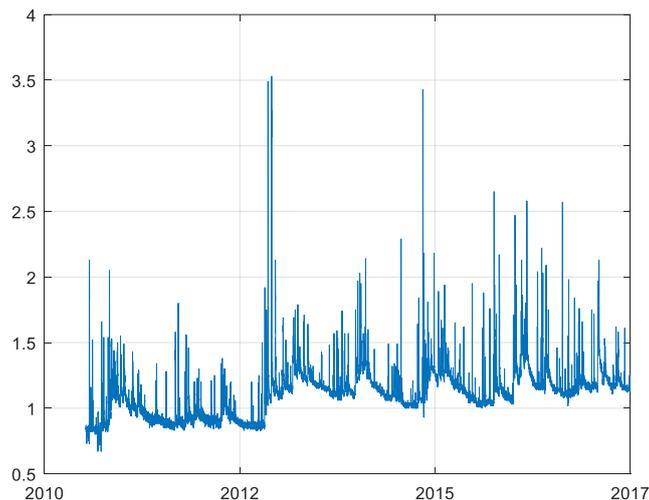


Figura 5 - Serie idrometrica alla stazione di Avenza sul Carrione.

Per quanto riguarda invece i pluviometri di riferimento per la definizione delle soglie, si sono scelti i 4 (3 interni al bacino ed un in posizione limitrofa, Figura 6 e Tabella 2) che avevano delle serie storiche sostanzialmente sovrapponibili, temporalmente, a quella dell'idrometro di Avenza.

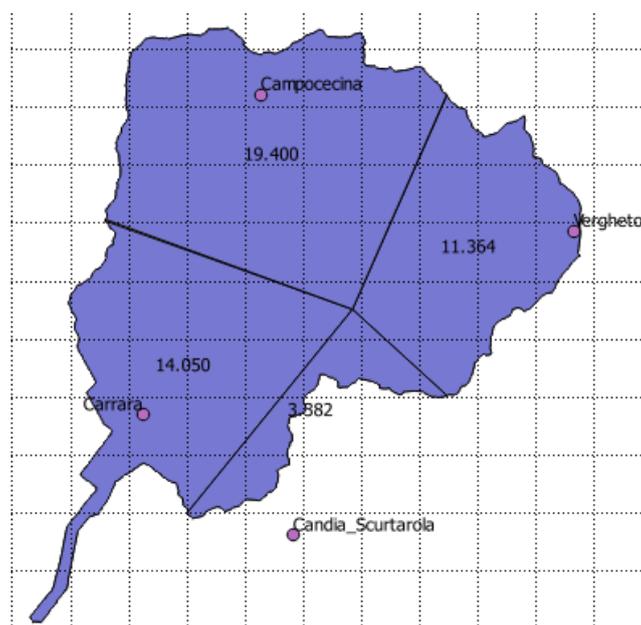


Figura 6 - Mappa dei pluviometri utilizzati per la definizione delle soglie. Il poligono in azzurro rappresenta il bacino del Carrione, con l'indicazione dei valori areali in km² delle aree dei poligoni di Thiessen per ciascun pluviometro.

Nome	Codice	G.B. Est	G.B. Nord	Quota (m s.l.m.)
Campocecina	TOS11000029	1588279	4885216	960.00
Vergheto	TOS02000047	1593656	4882854	845.00
Candia Scurtarola	TOS11000027	1588834	4877598	150.00
Carrara	TOS11000028	1586255	4879681	55.00

Tabella 2 – Pluviometri utilizzati nell'analisi.

Le serie pluviometriche, inclusa la media areale stimata con i poligoni di Thiessen, sono rappresentate in Tabella 2.

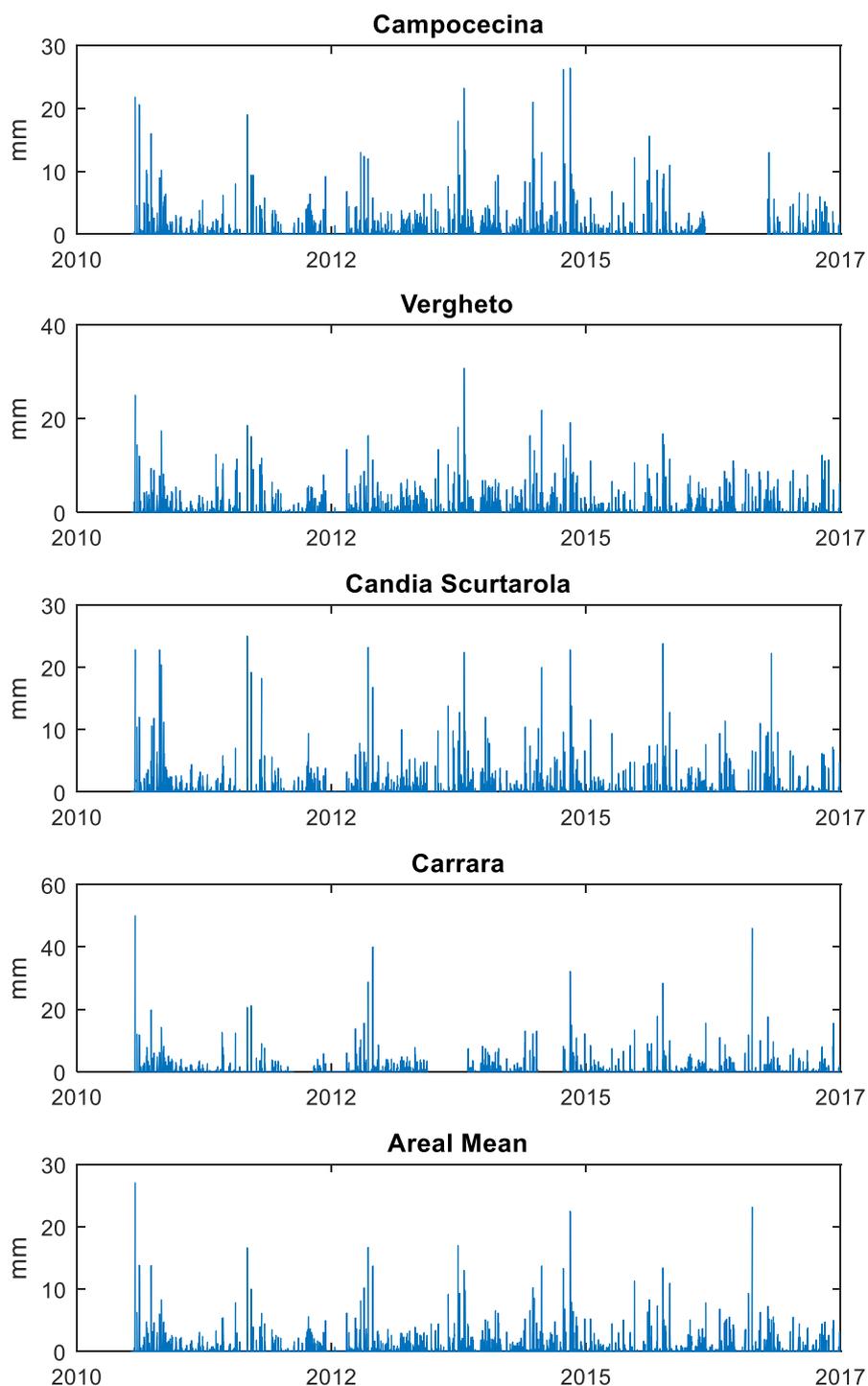


Figura 7 - Serie pluviometriche utilizzate nell'analisi.

Soglie ottimali

Dalla prima fase della procedura di analisi delle diverse configurazioni dei parametri operativi, i cui risultati sono riportati in dettaglio in Appendice, sono emerse prima di tutto le seguenti conclusioni:

- l'utilizzo dell'indice *API* non fornisce, nel caso specifico, sensibili miglioramenti sull'affidabilità generale delle soglie. Ciò a parziale conferma della complessità dell'idrologia del bacino del Carrione, la cui dinamica di trasformazione altamente non-lineare degli afflussi in deflussi non può essere spiegata, neanche in prima approssimazione, da semplici indici di umidità del suolo.
- Tranne che in pochissimi casi, le configurazioni pluviometriche che risultano più significative risultano il singolo pluviometro di Carrara e la Media Areale. Ai fini di chiarezza e semplicità espositiva, quindi, conviene assumere solo queste due configurazioni.

Di comune accordo con il Centro Funzionale, si sono prese in considerazione soglie idrometriche alla stazione di Avenza comprese fra 1.90 e 2.30 m s.l.m.. Dai risultati preliminari, inoltre sono apparsi evidentemente come inesplorabili anticipi di previsione superiori alle 4 ore, che risulterebbero chiaramente eccedenti il tempo di corrivazione del bacino. Si sono quindi considerate finestre operative di previsione di ampiezza bi-oraria incrementate di 1 ora (0-2 ore, 1-3 ore, 2-4 ore), oltre ad una più ampia di 0-4 ore.

Per ciascuna combinazione dei suddetti parametri operativi lasciati come variabili, il valore di soglia ottimale è accompagnato da un indice di affidabilità che 'amplifica' la variabilità dell'indice IROC, essendo quest'0 abbastanza ristretta, per i casi ottimali, nel range 0.93 – 0.98. Tale indice è calcolato come $S = \frac{IROC-0.93}{1-0.93}$, ed è quindi da intendersi come miglioramento relativo rispetto ad una affidabilità di riferimento, comunque già elevata, di $IROC = 0.93$.

In considerazione quindi della maggiore utilità di anticipi di previsione maggiori, e tenuto conto del significato di incremento marginale dell'indice di affidabilità riportato nelle tabelle, è da concludersi che la finestra di preavviso ottimale sia quella di 1-3 ore.

(Si evidenzia inoltre come il set di soglie per la finestra di preavviso 1-3 ore risulti il più coerente e robusto, con l'indicazione emergente di durate critiche lunghe per le soglie idrometriche più basse e molto più brevi per le soglie idrometriche più alte)

Le soglie su Media Areale e Carrara sono da intendersi come disgiunte (operatore logico OR).

Finestra preavviso 0-2 ore						
<i>Avenza</i>	<i>Media areale</i>			<i>Carrara</i>		
Soglia idro (m s.z.i.)	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità
1.90	n.c.			n.c.		
2.00	6	29	0.79	6	28	0.81
2.10	3	24	0.80	3	28	0.83
2.20	2	34	0.84	3	50	0.88
2.30	3	54	0.90	2	50	0.89

Tabella 3 - Valori ottimale di soglia per finestra di preavviso 0-2 ore.

Finestra preavviso 1-3 ore						
Avenza	Media areale			Carrara		
Soglia idro (m s.z.i.)	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità
1.90	6	24	0.529	6	33	0.511
2.00	6	28	0.51	6	35	0.537
2.10	2	20	0.424	2	20	0.451
2.20	2	31	0.494	2	47	0.633
2.30	2	52	0.449	2	51	0.596

Tabella 4 - Valori ottimale di soglia per finestra di preavviso 1-3 ore.

Finestra preavviso 2-4 ore						
Avenza	Media areale			Carrara		
Soglia idro (m s.z.i.)	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità
1.90	6	26	0.21	6	33	0.174
2.00	6	32	0.134	6	36	0.096
2.10	n.c.					
2.20						
2.30						

Tabella 5 - Valori ottimale di soglia per finestra di preavviso 2-4 ore.

Finestra preavviso 0-4 ore						
Avenza	Media areale			Carrara		
Soglia idro (m s.z.i.)	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità	Durata pioggia (ore)	Soglia Pluvio (mm)	Indice affidabilità
1.90	6	29	0.394	6	34	0.364
2.00	6	29	0.386	6	38	0.361
2.10	6	33	0.26	6	46	0.227
2.20	2	34	0.257	3	50	0.22
2.30	2	37	0.194	3	55	0.169

Tabella 6 - Valori ottimale di soglia per finestra di preavviso 0-4 ore.

APPENDICE – Risultati di dettaglio

