

IL COMMISSARIO DELEGATO MALTEMPO MAGGIO 2014

E

Fondazione CIMA

Per

LA MODELLAZIONE E DEFINIZIONE DELLE
GRANDEZZE IDROLOGICHE UTILI ALLA
PROGETTAZIONE PER LA MESSA IN SICUREZZA
STRUTTURALE E NON STRUTTURALE DEL
RETICOLO IDROGRAFICOPRINCIPALE DELLA
REGIONE MARCHE.

**Regionalizzazione delle portate massime
annuali al colmo di piena per la stima dei
tempi di ritorno delle grandezze idrologiche
Revisione 1.1**

Savona, 18/05/2016

1	Premessa	3
2	Regionalizzazione delle portate	4
2.1	Generazione di eventi pluviometrici sintetici	4
2.2	Simulazioni idrologiche	8
2.3	Distribuzione genitrice	9
2.4	Bacini con area drenata inferiore a 50 km ²	17
2.5	Considerazioni in merito ai risultati ottenuti	21
2.5.1	Bacino del Misa	23
2.5.2	Bacino dell'Esino	23
2.5.3	Bacino del Metauro	24
2.5.4	Bacino del Musone	24
2.5.5	Bacino dell'Aspio	24
2.6	Esempio di applicazione	25
2.6.1	Esempio 1 – bacino con area superiore a 50 km ²	25
2.6.2	Esempio 2 – bacino con area inferiore a 50 km ²	25
	Bibliografia	27
	Lista Allegati	28

1 Premessa

In data 17 febbraio 2015 è stata stipulata la convenzione tra il Commissario Delegato Maltempo Maggio 2014 e Fondazione CIMA per "La modellazione e definizione delle grandezze idrologiche utili alla progettazione per la messa in sicurezza strutturale e non strutturale del reticolo idrografico principale della Regione Marche" (Reg Int: 2015/28 – Nr. 670).

Il presente documento, a norma dell'articolo 6 della convenzione, è la descrizione delle attività svolte da Fondazione CIMA per la regionalizzazione delle portate massime annuali al colmo di piena per la stima dei tempi di ritorno delle grandezze idrologiche. Obiettivo del presente lavoro è la definizione della regionalizzazione delle portate massime annuali al colmo di piena con diversi tempi di ritorno per il territorio marchigiano.

2 Regionalizzazione delle portate

Per realizzare la regionalizzazione delle portate massime annuali al colmo di piena non è stato possibile utilizzare un approccio diretto che utilizzi le serie storiche di portata per la molto scarsa numerosità del campione.

È stato quindi utilizzato un approccio indiretto che prevede la generazione di eventi sintetici di precipitazione utilizzando i risultati ottenuti nella procedura di regionalizzazione delle piogge estreme¹ e l'uso del modello idrologico Continuum calibrato e validato sul territorio regionale² per determinare la risposta dei bacini.

La procedura utilizzata per la regionalizzazione delle portate al colmo è composta di tre fasi:

1. generazione di un set di eventi pluviometrici estremi sintetici
2. esecuzione di simulazioni idrologiche per ognuno degli eventi pluviometrici generati
3. stima della distribuzione di probabilità in ogni punto del reticolo

2.1 Generazione di eventi pluviometrici sintetici

Data la configurazione meteo-climatica della regione Marche, sono state selezionate diverse durate critiche degli eventi di precipitazione che producono i picchi di portata massimi annuali per diverse categorie di bacini (1-3-6-12-24 ore), corrispondenti a diversi valori di tempo di corrivazione (T_c) dei principali bacini regionali. Ogni bacino è considerato indipendente e gli eventi piovosi su ogni bacino presentano sempre l'intera area occupata da pioggia non nulla. Tale ipotesi è coerente con le caratteristiche tipiche degli eventi di pioggia intensi e inoltre ogni bacino o sotto-bacino viene trattato, dal punto di vista meteorologico e idrologico, come completamente indipendente da tutti gli altri.

¹Per dettagli si veda la relazione "Regionalizzazione delle precipitazioni intense" oggetto della quarta consegna della convenzione 17 febbraio 2015.

²Per dettagli si vedano le relazioni sulla modellistica idrologica relative alla prima consegna della convenzione 17 febbraio 2015 ("Attività svolte da Fondazione CIMA per la definizione, raccolta e sistematizzazione delle informazioni e dei dati necessari per la definizione delle grandezze idrologiche e la modellazione oggetto delle successive attività") e la seconda consegna ("attività svolte da Fondazione CIMA per l'implementazione della catena di previsione probabilistica di eventi idro-meteorologici FloodPROOFS contenente il modello idrologico Continuum: Calibrazione e validazione del modello idrologico Continuum - Rev.01").

Il primo punto della generazione sintetica degli eventi consiste nella selezione della durata dell'evento di progetto:

1. Per i bacini con Tc maggiore di 6 ore è stato utilizzato un evento con durata pari a Tc stesso.
2. Per i bacini con Tc minore di 6 ore è stato creato un evento di durata 12 ore con picco di precipitazione finale di durata pari al tempo di corrivazione del bacino (tale scelta è motivata dal fatto che i massimi di pioggia sui Tc che portano ad avere portate consistenti avvengono solitamente nell'ambito di eventi di precipitazione più lunghi).
3. Per tutti i bacini della regione è stato creato un evento di durata 24 ore (tale evento riproduce il fatto che, specialmente nei casi di tempi di ritorno medio bassi, l'evento che porta ai massimi annuali potrebbe non essere l'evento sulla durata critica ma un evento molto lungo che porta a elevata saturazione del suolo, pertanto anche intensità non elevatissime a fine evento possono dare luogo a portate di rilevanti).

Una volta stabilita la durata di progetto, per ogni durata è effettuato un campionamento della distribuzione genitrice delle precipitazioni estreme³ di numerosità N molto alta estraendo N tempi di ritorno casuali e sono generati altrettanti N pattern spaziali di pioggia con il modello RAINFARM (Rebora et al. 2006), su un'area che comprende tutto il territorio regionale.

L'algoritmo di generazione degli eventi piovosi è il seguente:

1. Generazione, mediante il modello RAINFARM, di N pattern spaziali e temporali di pioggia adimensionale (cumulata su tutta l'area e su tutta la durata uguale). Specificatamente, ogni evento è composto da **d** mappe di pioggia oraria su un'area rettangolare sufficiente a ricoprire tutto il territorio regionale con risoluzione di 1 km;
2. Generazione di N tempi di ritorno casuali da attribuire agli eventi sintetici;
3. Identificazione del punto di picco massimo della cumulata di pioggia a **d** ore dell'evento *i* all'interno del bacino *j* (x_{max}) per ogni bacino *j* ($j = 1, 2, \dots, n_b$), e per il pattern *i*-esimo ($i = 1, 2, \dots, N$);

³ Per dettagli si veda la relazione "Regionalizzazione delle precipitazioni intense" oggetto della quarta consegna della convenzione 17 febbraio 2015.

4. Determinazione dell'altezza di pioggia h (usando la regionalizzazione delle piogge) nel punto di picco x_{max} corrispondente alla durata d (ore) e al tempo di ritorno T_i (anni), chiamato $P_{i,j}(x_{max})$, usando la distribuzione genitrice opportunamente ridimensionalizzata con la durata e la posizione spaziale, $h=h(d,T)$;
5. Riscaldamento della mappa di pioggia per ogni bacino in modo da rispettare il valore h calcolato nel punto di picco spaziale; detto $R_{i,j}(x_{max})$ il valore di pioggia sintetico generato da Rainfarm nel pixel x_{max} , nel bacino j -esimo e nel pattern i -esimo, la mappa i -esima finale di pioggia nel bacino j viene generata moltiplicando il valore di ogni pixel del pattern di Rainfarm all'interno del bacino per il rapporto $P_{i,j}(x_{max})/R_{i,j}(x_{max})$.

N è stato posto uguale a 1000. Il risultato di tale procedura è costituito da una sequenza di N eventi piovosi, ognuno consistente in d mappe orarie di pioggia che ricoprono l'intero territorio regionale, a loro volta costituite dal mosaico delle mappe ottenute con il suddetto algoritmo per ognuno dei bacini. Ogni mappa a livello regionale sarà composta da un insieme di eventi piovosi (uno per bacino o sotto-bacino) che hanno una precipitazione di picco corrispondente a un tempo di ritorno costante e una posizione del picco e un pattern complessivo generati da RAINFARM, mantenendo la coerenza della distribuzione regionale (a livello di evento) per tutto il territorio regionale e per tutti gli N scenari generati. In Figura 2 sono mostrati alcuni esempi di tali mappe.

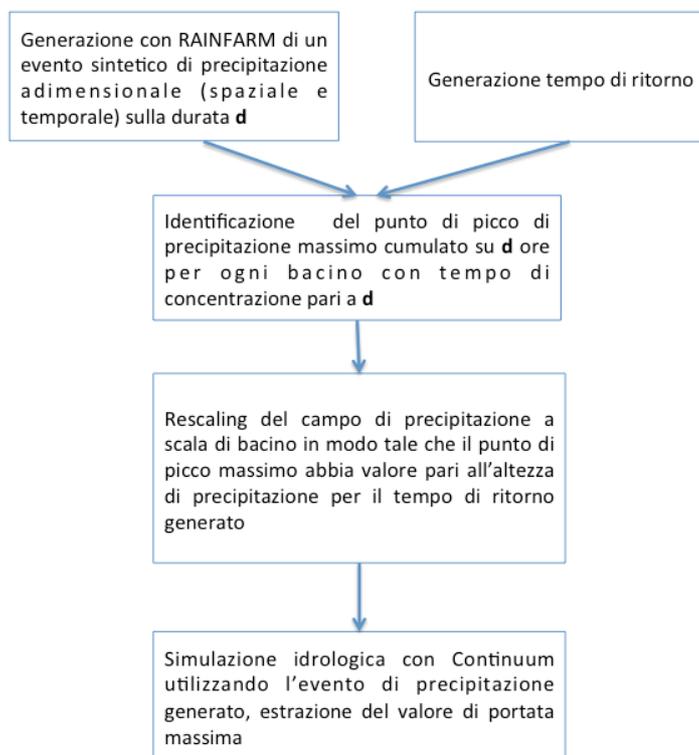


Figura 1 Schema di generazione di un evento, tale procedura è ripetuta iterativamente N volte.

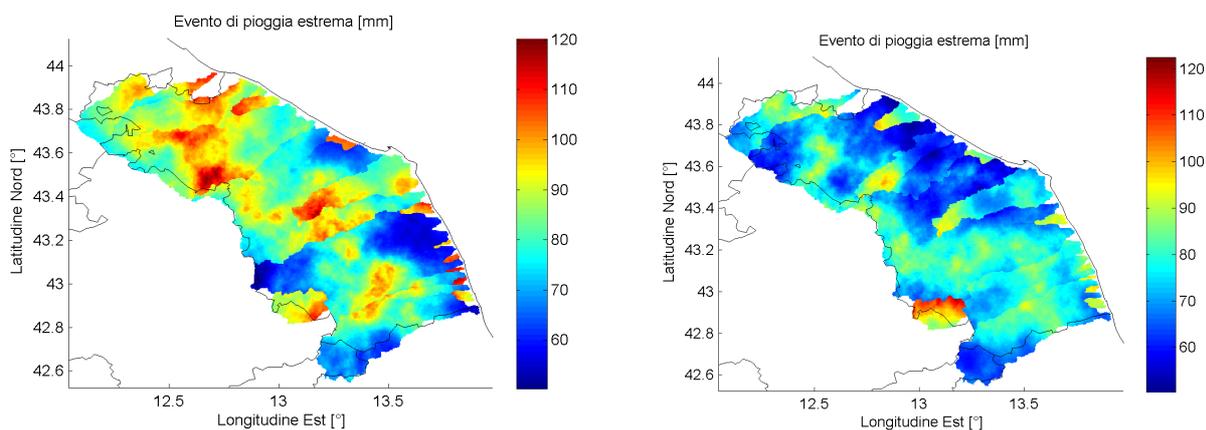


Figura 2 Mappe di pioggia cumulata su 24 ore generate corrispondenti ad alcuni eventi sintetici per due diversi tempi di ritorno come esempio.

Gli eventi piovosi così generati garantiscono sia la coerenza col tempo di ritorno relativamente al picco massimo, considerato rappresentativo della statistica, che il mantenimento di un

pattern spaziale e temporale realistico adatto alla tipologia di eventi meteorici selezionata. La Figura 3 illustra, come esempio, la precipitazione cumulata per un evento con tempo di ritorno di 45 anni generato per i bacini con tempo di corrivazione pari a 3 ore.

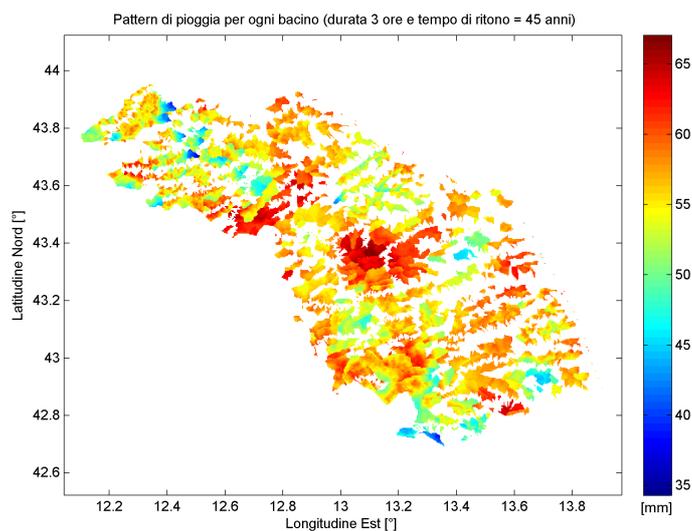


Figura 3 Esempio di campo di precipitazione generato per bacini con tempo di concentrazione pari a 3 ore

2.2 Simulazioni idrologiche

Per ognuno degli eventi di pioggia sintetici generati con la procedura descritta nel paragrafo precedente, è stata effettuata una simulazione idrologica completa mediante il modello Continuum⁴. La Figura 1 riassume la generazione di un evento di massimo annuale di portata.

L'inizializzazione di ogni simulazione è avvenuta tenendo conto delle possibili diverse condizioni di bagnamento del suolo pre-evento. A questo scopo, basandosi sulle simulazioni di lungo periodo già effettuate sul territorio regionale per la calibrazione del modello idrologico, è stata effettuata una statistica delle condizioni di saturazione del suolo; tale statistica è stata utilizzata per generare le condizioni di saturazione del suolo in modo casuale estraendole da

⁴ Si è assunto che l'occorrenza degli eventi si verifichi durante il periodo autunnale/primaverile per gli altri input necessari al modello idrologico per cui sono state utilizzate mappe orarie di temperatura dell'aria, umidità, velocità del vento e radiazione tipiche di tali stagioni; tuttavia l'influenza di tali grandezze a scala d'evento è trascurabile.

un'opportuna distribuzione di probabilità. Tale distribuzione è considerata uniforme e limitata tra condizioni di bagnamento medie e condizioni di bagnamento elevate. Gli eventi di piena che danno i massimi annuali avvengono, data la climatologia della zona, generalmente nei periodi autunnali o primaverili. Analizzando le serie temporali di portata a disposizione e le simulazioni effettuate in fase di validazione del modello idrologico, rarissime volte durante i periodi molto secchi estivi si verificano i massimi annuali di portata.

I serbatoi artificiali a monte delle dighe presenti sul territorio regionale sono stati considerati pieni al 70% del volume massimo invasabile (ipotesi a favore di sicurezza).

Il modello idrologico restituisce, per ogni evento, il valore di portata oraria in ogni punto del reticolo dell'intero territorio regionale.

Una volta effettuate tutte le simulazioni, per ogni punto di reticolo e per ogni evento N-esimo, è stato estratto il valore massimo di portata prodotta dagli eventi con durata critica pari al tempo di concentrazione del bacino e quello di durata 24 ore, ottenendo un singolo valore per cella del reticolo: tale valore costituisce il massimo annuale per l'anno N-esimo. Le serie storiche di picchi di portata per ogni cella di reticolo sono la base per l'analisi regionale, descritta nel seguito.

2.3 Distribuzione genitrice

Per ognuna delle serie storiche di massimi annuali di portata ottenute dalle simulazioni idrologiche (una serie per ogni cella di reticolo), è stata costruita la distribuzione campionaria. In prima battuta, basandosi su questa, solo i valori corrispondenti a un tempo di ritorno uguale o superiore a 5 anni sono stati presi in considerazione. In questo modo i valori delle portate basse sono stati eliminati dall'analisi, mantenendo comunque invariata la forma della distribuzione nella sua parte estrema⁵.

⁵ Nei bacini interessati dall'analisi sono presenti alcune dighe, che costituiscono una disconnessione idrologica all'interno dei bacini stessi. La statistica dei tratti fluviali interessati dalla presenza di tali infrastrutture è parzialmente distorta e non adatta, così com'è, all'analisi statistica regionale. Allo scopo di non tenere in considerazione dati spuri e tenendo conto che l'analisi riguarda comunque le portate estreme, si è deciso di tentare, in prima battuta, un'analisi regionale basata esclusivamente sulla coda destra della distribuzione di probabilità.

Procedendo quindi con questi campioni censurati, è stata anzitutto selezionata come variabile indice la media della serie dei picchi di portata ed è stata effettuata un'analisi sui dati basata sul fitting con distribuzioni di tipo GEV, similmente all'analisi fatta per le precipitazioni.

L'analisi ha evidenziato che la GEV, contrariamente al caso delle precipitazioni, non riesce a rappresentare bene neppure le code estreme delle serie di massimi sintetici generati. Inoltre, in alcuni casi una distribuzione Gumbel si è rivelata più adatta per il fit. La Figura 4 mostra alcuni esempi, in cui la prima parte della curva viene ricostruita abbastanza bene da una GEV, ma nella coda destra la distribuzione diverge dai dati anche in modo consistente, in alcuni casi non rientrando neppure nelle fasce di confidenza (la mancanza di fit accettabili è stata verificata anche nelle sezioni più a monte, quindi non affette dalla presenza delle dighe).

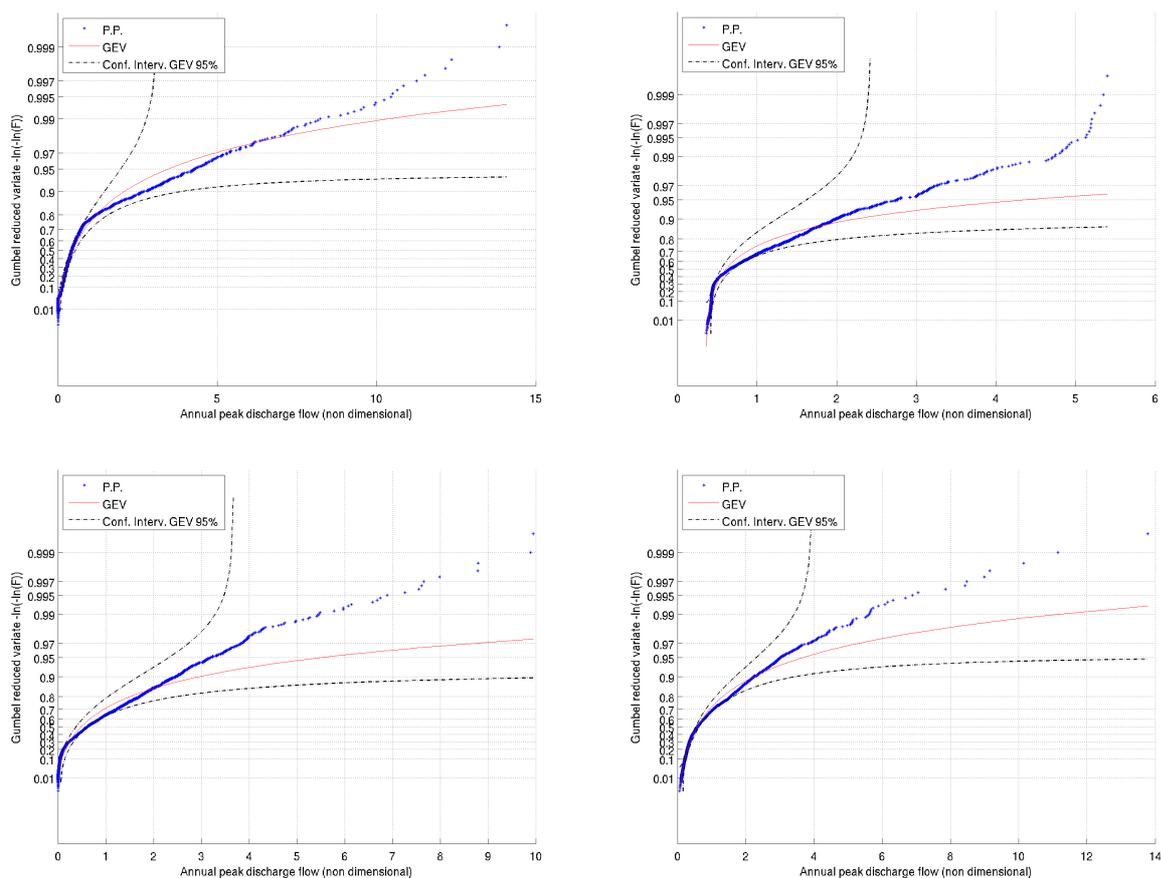


Figura 4 Esempi di fit di distribuzione GEV sulle portate adimensionali in alcuni punti del reticolo.

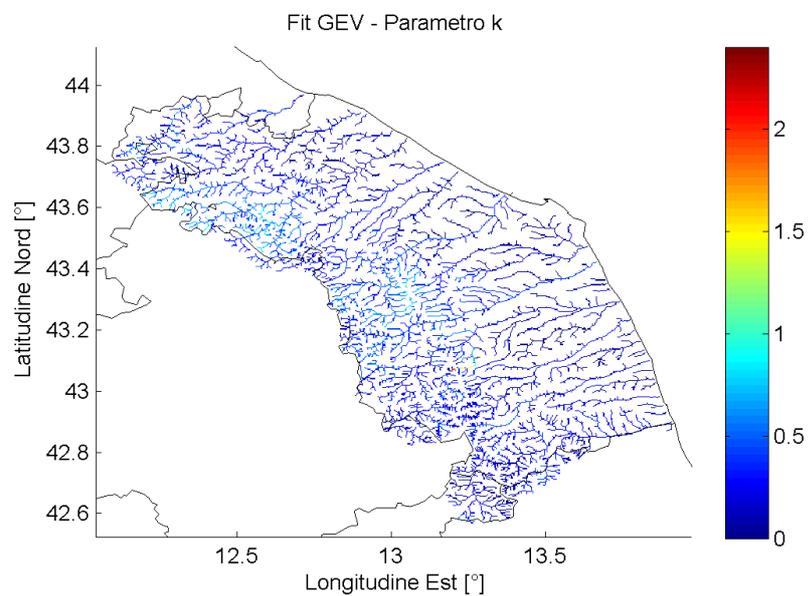


Figura 5 Pattern spaziale del parametro k delle distribuzioni GEV fittate sulle serie di portata sintetiche per ogni punto del reticolo.

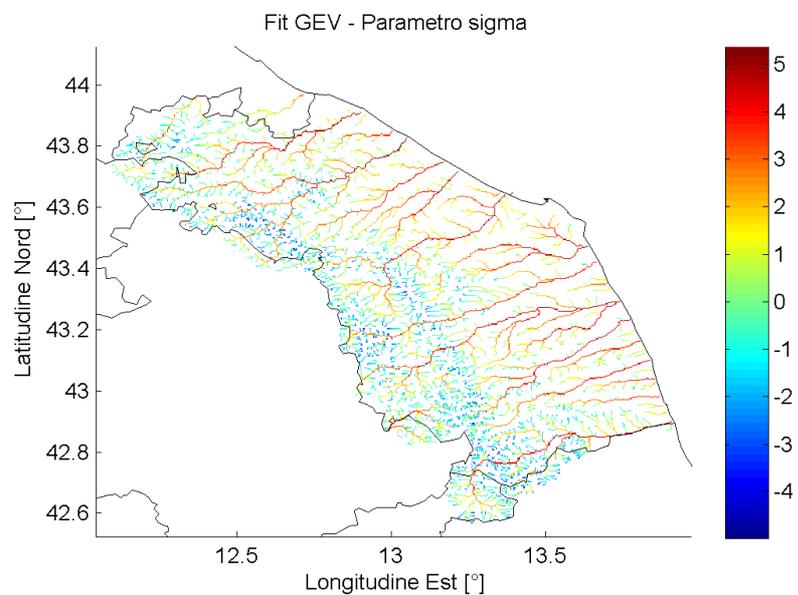


Figura 6 Pattern spaziale del parametro sigma delle distribuzioni GEV fittate sulle serie di portata sintetiche per ogni punto del reticolo.

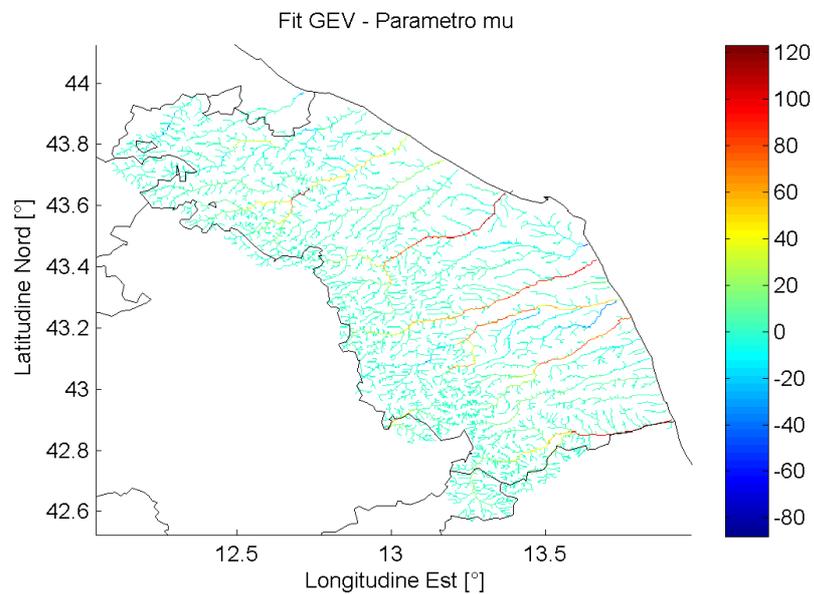


Figura 7 Pattern spaziale del parametro mu delle distribuzioni GEV fittate sulle serie di portata sintetiche per ogni punto del reticolo.

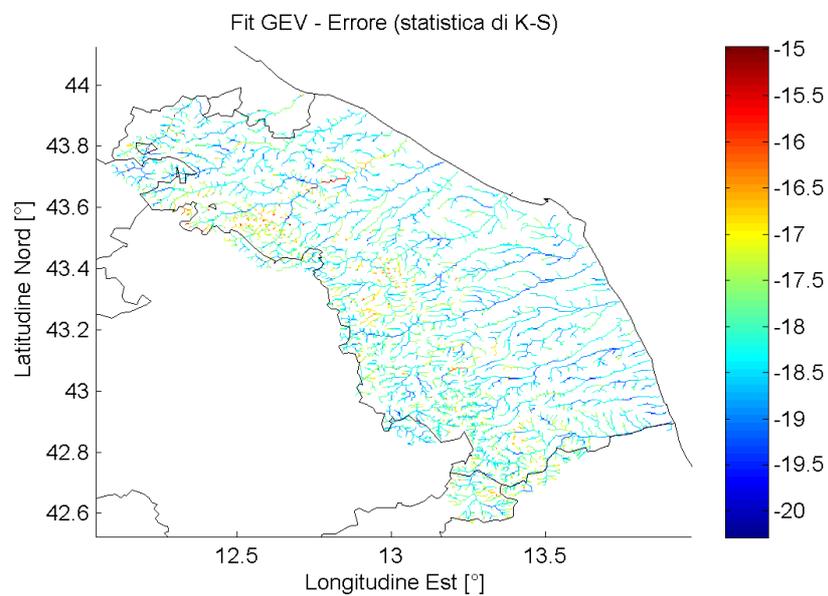


Figura 8 Pattern spaziale dell'errore di fit (statistica di Kolmogorov-Smirnov) delle distribuzioni GEV fittate sulle serie di portata sintetiche per ogni punto del reticolo.

Data l'impossibilità di individuare un'unica distribuzione genitrice adimensionale e considerando anche la mancanza di pattern spaziali definiti per i parametri delle distribuzioni di probabilità trovate (vedi Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8 per la mappa di errore di stima), si è deciso di affidare l'analisi direttamente alle distribuzioni campionarie locali valutate per ogni singola cella di reticolo così come è rappresentato nei raster ottenuti dalle simulazioni. Seguendo questo approccio decade la limitazione dei 5 anni come tempo di ritorno minimo descritto esplicitamente; le distribuzioni così ricavate consentono una descrizione per qualsiasi tempo di ritorno.

Inoltre tale approccio supera il problema della mancanza di fit e, assicura una descrizione corretta e dettagliata della distribuzione di probabilità su tutto il reticolo, compresi i casi in cui, a causa della presenza di dighe o di caratteristiche meteo-idro-geologiche del territorio, le distribuzioni presentano caratteristiche complesse, non descrivibili né con le classiche distribuzioni di letteratura, né con combinazioni tipiche delle stesse (es.: TCEV). L'elevato numero di eventi simulati, e quindi l'elevata numerosità di campioni sintetici disponibile per ogni cella, consente una descrizione statistica fino a tempi di ritorno alti.

Sono state quindi prodotte le mappe di portata al colmo, un valore per ogni cella del reticolo, corrispondenti ai tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200, 500 anni. Alcuni esempi di mappe (20, 50 e 200 anni) sono riportati in Figura 9, Figura 10 e Figura 11.

Le Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15, riportano, come esempio, alcune distribuzioni ottenute con la generazione sintetica del campione precedentemente illustrata su alcuni bacini regionali chiusi alla foce.

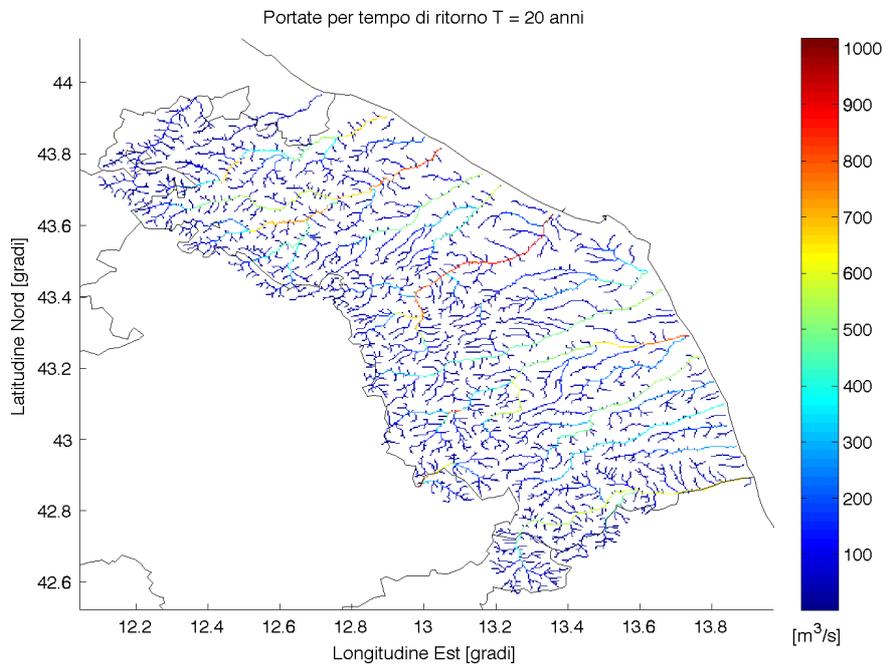


Figura 9 Mappa dei valori di portata corrispondenti a un tempo di ritorno pari a 20 anni.

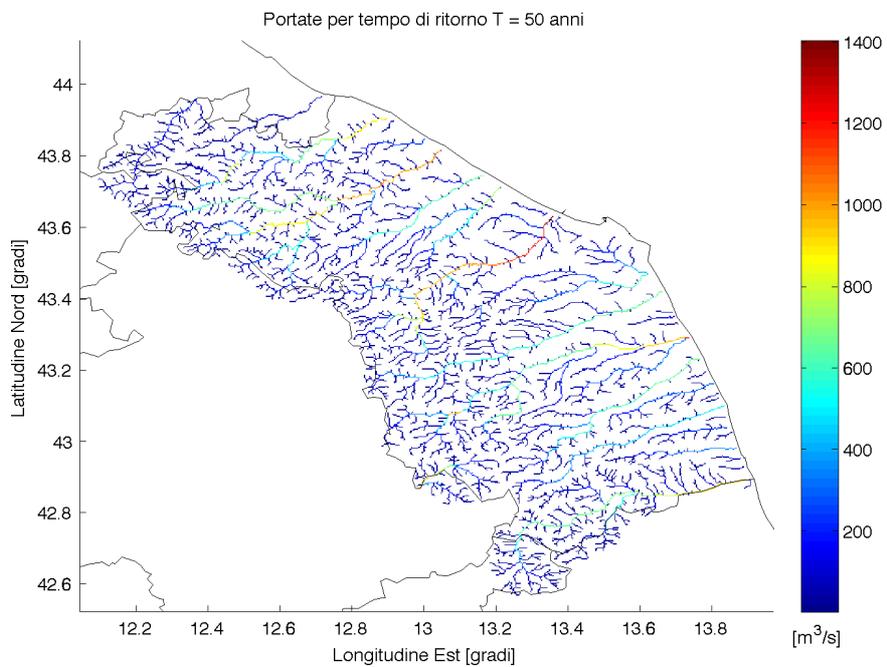


Figura 10 Mappa dei valori di portata corrispondenti a un tempo di ritorno pari a 50 anni.

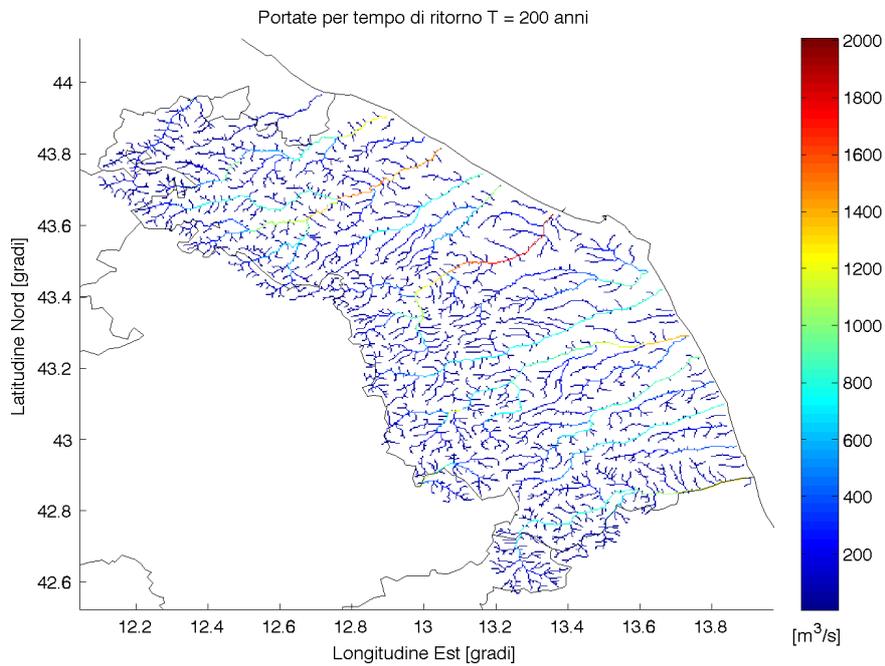


Figura 11 Mappa dei valori di portata corrispondenti a un tempo di ritorno pari a 200 anni.

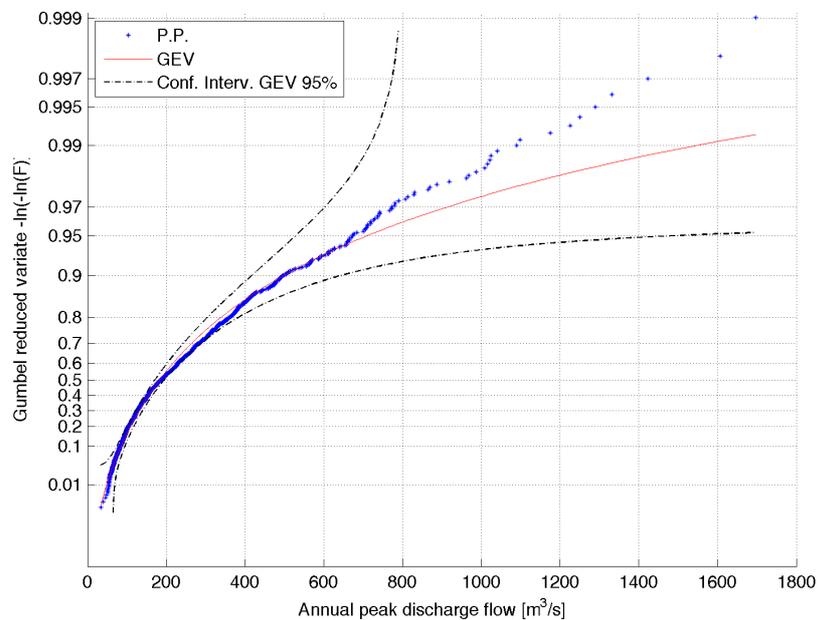


Figura 12 Distribuzione dimensionale ottenuta dalla generazione sintetica del campione per il bacino del Foglia chiuso alla foce ed esempio di fitting con GEV.

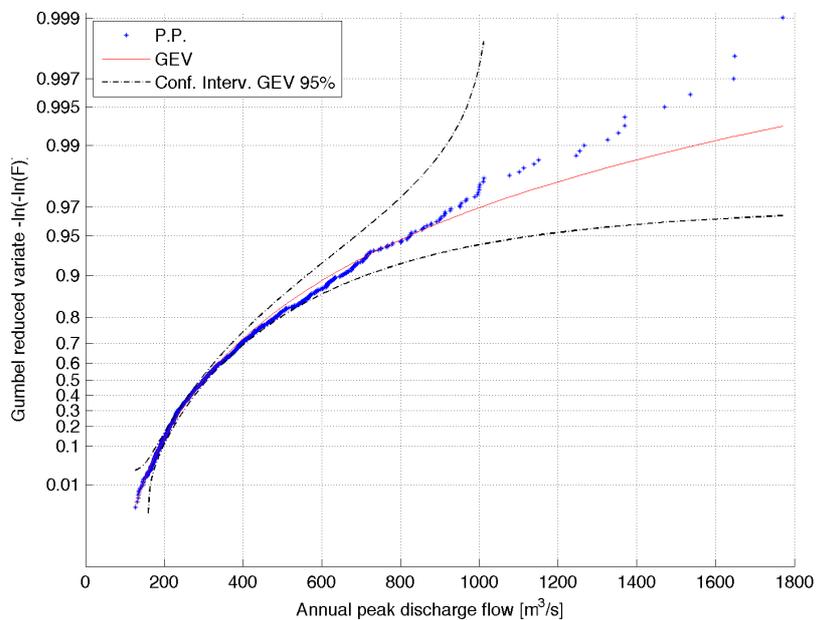


Figura 13 Distribuzione dimensionale ottenuta dalla generazione sintetica del campione per il bacino del Metauro chiuso alla foce ed esempio di fitting con GEV.

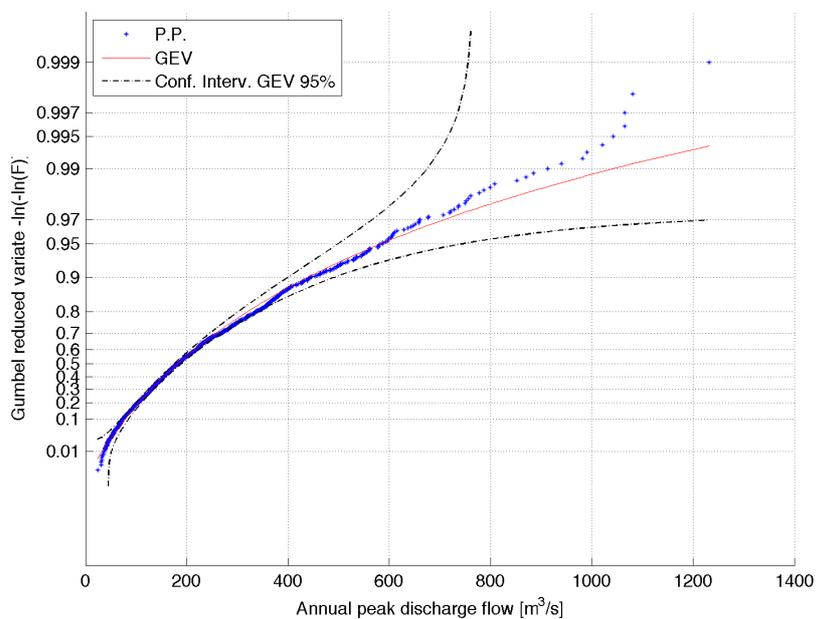


Figura 14 Distribuzione dimensionale ottenuta dalla generazione sintetica del campione per il bacino del Misa chiuso alla foce ed esempio di fitting con GEV.

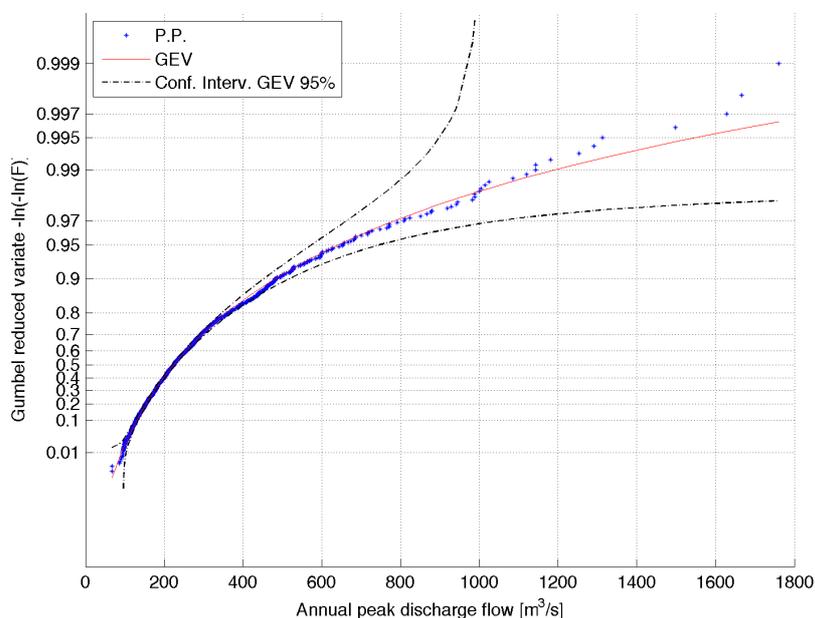


Figura 15 Distribuzione dimensionale ottenuta dalla generazione sintetica del campione per il bacino del Tronto chiuso alla foce ed esempio di fitting con GEV.

2.4 Bacini con area drenata inferiore a 50 km²

L'analisi così condotta ha permesso di ottenere sull'intero reticolo simulato i valori di portata corrispondenti a un insieme di tempi di ritorno. Tuttavia data l'assenza di regioni omogenee dal punto di vista della regionalizzazione degli estremi, cioè regioni che presentano una stessa distribuzione genitrice per la variabile adimensionalizzata, la procedura non consente di trarre conclusioni sulle zone non contemplate nella simulazione idrologica, cioè essenzialmente i bacini più piccoli, prevalentemente costieri.

Si sottolinea inoltre che il modello idrologico utilizzato per le simulazioni è stato calibrato su serie di portata osservata disponibili per bacini di medio-grandi dimensioni (sono stati calibrati solamente 3 bacini con area inferiore a 100 km²). Al di fuori di questa scala, considerando quindi bacini di dimensioni più piccola (sotto i 50 km²), l'affidabilità delle mappe di quantili può risultare più bassa; inoltre i bacini più piccoli (alcuni km²) risultano mal rappresentati a causa dello scarso numero di celle di calcolo. Allo scopo di trattare anche questi casi, e di considerare un'analisi in favore di sicurezza, è stata considerata una distribuzione campionaria adimensionale, ottenuta nel seguente modo:

1. Sono stati selezionati solo i bacini, simulati, di dimensioni inferiori ai 50 km²;

2. Tutte le serie di portata rimaste sono state adimensionalizzate rispetto alla loro media;
3. I valori così ottenuti sono stati uniti in un unico campione.

L'analisi ha condotto a un campione di alta numerosità che presenta un buon fit con una distribuzione GEV, come mostrato in Figura 16 anche se non sempre le serie a singolo sito rientrano nelle fasce di confidenza. Dalla distribuzione GEV così fittata è possibile estrarre i fattori di crescita K_T (Tabella 1).

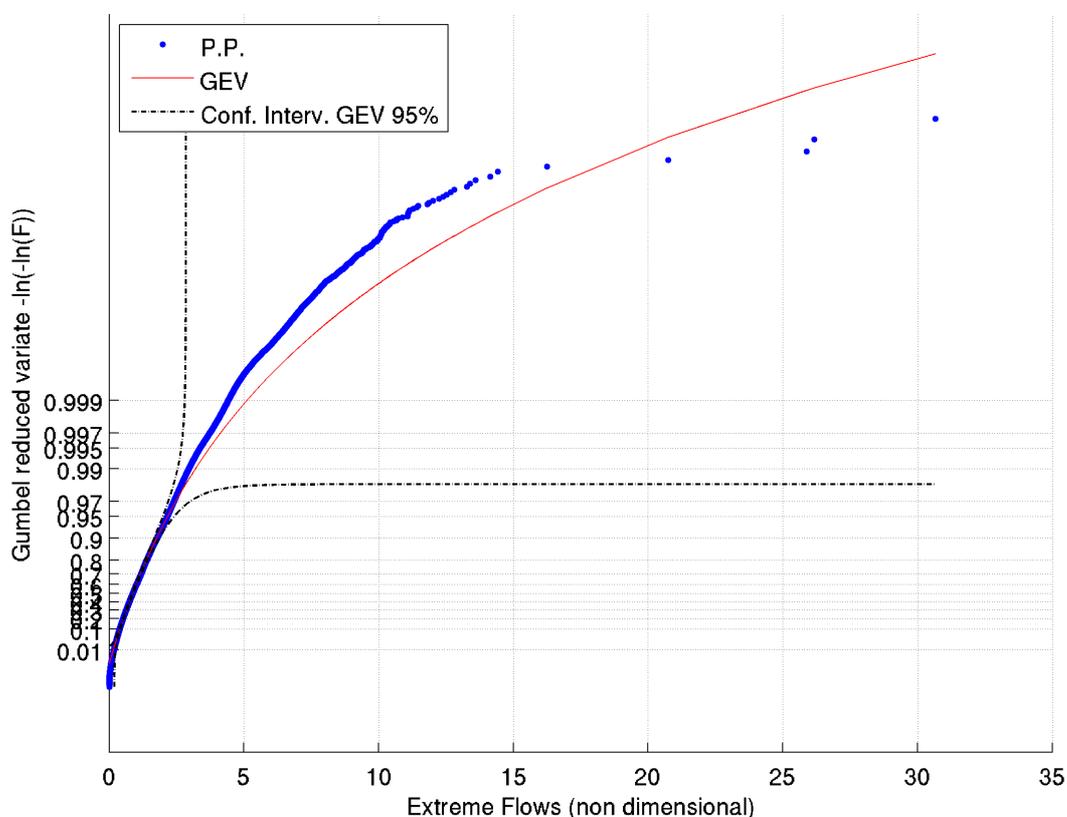


Figura 16 Fit GEV della distribuzione adimensionale dei piccoli bacini (area drenata inferiore ai 50 km²). In verde sono riportati i dati delle singole celle.

La variabile indice considerata è la portata media dei massimi di piena annuali generati sinteticamente ed è stata effettuata un'analisi di regressione tra la variabile indice e l'area drenata a monte (Figura 17). L'area drenata ha una dipendenza consistente con la variabile

indice, ma con una considerevole variabilità. E' stata quindi fittata una relazione media con un'opportuna legge di potenza che descrive l'andamento della variabile indice in funzione dell'area drenata espressa in km²:

$$Q_i = 1.6119 A^{0.9735} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

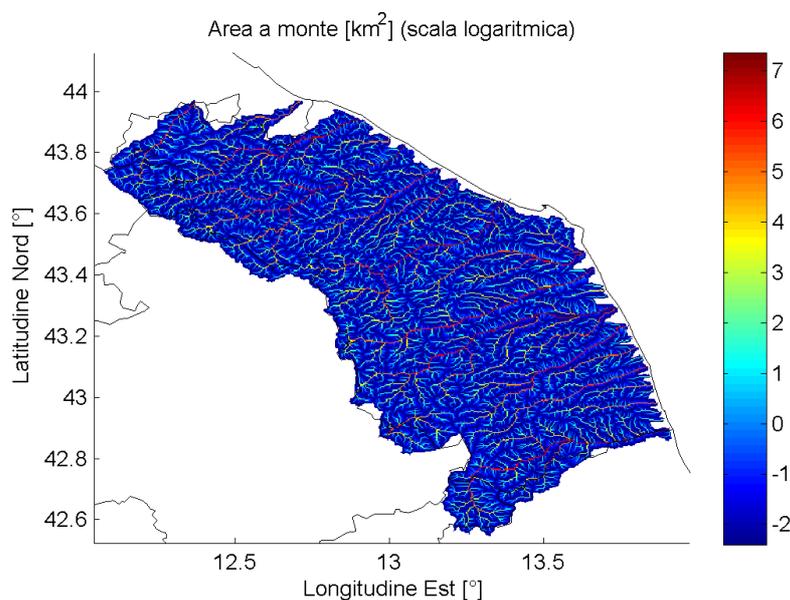


Figura 17 Mappa dell'area drenata in ogni punto del territorio regionale (scala logaritmica).

Tempo di ritorno [anni]	2	5	10	20	50	100	150	200	500	1000
Fattore di crescita K_T	0.864	1.375	1.755	2.155	2.730	3.207	3.505	3.725	4.482	5.115

Tabella 1 Fattori di crescita per i piccoli bacini non simulati.

Mediante tale relazione, quindi, si è ricavata una metodologia alternativa per la stima delle portate estreme nei piccoli bacini consistente nella seguente procedura:

1. Si calcola l'area A a monte della sezione in cui si vuole dare una stima della portata con dato tempo di ritorno T;
2. Si applica la legge di potenza (1) per ottenere la variabile indice (Q_i) in funzione dell'area drenata;
3. Si applicano i valori del fattore di crescita K_T riportati in Tabella 1 per ottenere il quantile desiderato: $Q(T) = K_T Q_i$.

Tale metodologia si pone in alternativa all'utilizzo diretto delle mappe di quantili su bacini con area drenata inferiore a 50 km². Poiché entrambi i metodi presentano incertezze (le mappe di quantili a causa della mancanza di dati a questa scala su cui calibrare il modello idrologico e il metodo appena descritto a causa della notevole variabilità della relazione area-portata e degli errori dei dati single-site rispetto alla curva regionale) si suggerisce, a favore di sicurezza la seguente procedura per la stima della portata per dato tempo di ritorno in un punto avente area drenata a monte inferiore a 50 km²:

1. Ricavare il valore di portata (Q_{mappe}) dalle mappe di quantili;
2. Calcolare il valore di portata ($Q_{A<50km^2}$) seguendo la procedura descritta in questo paragrafo mediante la relazione (1) e la Tabella 1;
3. Selezionare il valore massimo $Q = \max(Q_{mappe}, Q_{A<50km^2})$; il valore di porta finale (Q) è dato, in favore di sicurezza, dal massimo tra i due valori.

Per stimare le portate relative ai bacini più grandi (maggiori di 50 km²) dovranno essere utilizzate solamente le mappe di quantili.

La Tabella 2 riporta i valori di portata massimi annuali per assegnato tempo di ritorno per i principali bacini regionali chiusi alla foce.

Tempo di ritorno [anni]	2	5	10	20	50	100	150	200	500
Foglia	188	361	505	682	904	1079	1230	1270	1515
Arzilla	93	147	184	220	259	286	303	307	387
Metauro	306	488	658	838	1018	1310	1407	1481	1711
Cesano	205	342	441	535	659	776	844	870	1112
Misa	216	341	450	587	752	903	991	1038	1085
Esino	329	581	750	1017	1403	1674	1859	2007	2404
Musone	155	286	400	528	676	819	915	954	1157
Potenza	199	341	445	543	664	770	802	842	1147
Chienti	315	547	742	928	1158	1350	1421	1456	1637
Tenna	250	354	451	550	661	789	836	925	1099
Ete Vivo	105	172	218	263	309	344	370	408	467
Aso	130	222	286	396	490	664	697	829	1041
Menocchia	96	145	179	209	241	265	279	289	352
Tesino	118	188	231	284	338	382	400	404	528
Tronto	263	426	546	662	962	1138	1257	1309	1665

Tabella 2 Valori di portata massima annuale per assegnato tempo di ritorno sui principali bacini regionali chiusi alla foce

2.5 Considerazioni in merito ai risultati ottenuti

Per la scarsa numerosità delle serie campionarie di massimi annuali al colmo di piena nello studio per la regionalizzazione delle portate al colmo di piena è stato necessario utilizzare un approccio di tipo modellistico. Tale approccio prevede la generazione di eventi di precipitazione sintetici, generati sulla base dei risultati della regionalizzazione delle precipitazioni intense, e un modello idrologico per rappresentare la risposta dei bacini.

Il modello idrologico utilizzato è stato calibrato su un periodo di un anno di dati ottimizzando gli scores che pesano maggiormente gli eventi di piena rispetto alle portate di magra. Il modello è stato poi validato su un periodo di circa 6 anni ottenendo valori degli scores paragonabili a quelli ottenuti in fase di calibrazione.

La capacità del modello di riprodurre la portata osservata è fortemente influenzata dalla possibilità di calibrare il modello su dati di portata affidabili, infatti anche le scale di deflusso con cui si determina la portata dato il livello osservato sono affette da incertezza.

Il modello idrologico è stato calibrato su bacini di medio-grandi dimensioni presenti sul territorio regionale (l'area del bacino più piccolo calibrato è pari a 50 km²) per cui i risultati della regionalizzazione su tali aree sono ritenuti affetti da una minor incertezza rispetto ai

risultati ottenuti per bacini di piccole dimensioni (alcuni km²) per cui non erano disponibili serie storiche di portata per la calibrazione.

Qualora fossero disponibili nuove osservazioni per raffinare la calibrazione del modello idrologico sarà possibile ripetere la procedura per la regionalizzazione delle portate al colmo di piena.

Anche la distribuzione spaziale delle mappe di precipitazione per fissato tempo di ritorno e fissata durata influisce sui risultati finali. Sono infatti presenti differenze non trascurabili tra diverse aree regionali, di conseguenza i volumi di precipitazione degli eventi generati dati in ingresso al modello idrologico possono cambiare notevolmente per differenti bacini o sottobacini anche con caratteristiche morfologiche similari.

Le caratteristiche che conferiscono robustezza e fisicità al metodo utilizzato sono:

1. La generazione di numerosi eventi (N=1000), che rende disponibili serie di N anni di massimi di portata su ogni punto del reticolo idrografico;
6. La generazione di eventi di precipitazione distribuiti con strutture spatio-temporali realistiche dei campi stessi;
7. La generazione di eventi di precipitazione su diverse durate per diverse classi di tempo di corrivazione dei bacini;
8. La generazioni di condizioni variabili di saturazione del suolo antecedenti l'evento, (come è noto infatti la saturazione iniziale dei suoli regola le discrepanze tra il tempo di ritorno delle precipitazioni e il tempo di ritorno delle portate);
9. L'aver considerato nella modellazione il contributo delle dighe che possono influenzare i quantili nelle sezioni a valle delle stesse;
1. L'aver utilizzato un modello idrologico distribuito che considera le caratteristiche distribuite dei suoli. Il *Continuum* è un modello completo, continuo e distribuito: cioè descrive tutte le componenti del ciclo idrologico del bacino in modo continuato nel tempo su una griglia spaziale. Esso è in grado di rappresentare gli scambi di massa ed energia tra atmosfera e suolo fornendo l'evoluzione spatio-temporale della portata, dell'umidità del suolo, della temperatura superficiale del suolo, dell'evapotraspirazione e della falda acquifera.

E' chiaro che alcune fenomenologie particolari che potrebbero essere presenti nei singoli bacini (ad esempio fenomeni di carsismo molto pronunciati) non sono state considerate.

Nel seguito sono riportati dei commenti specifici per alcuni bacini del territorio regionale.

2.5.1 Bacino del Misa

Si evidenzia che per il Misa la calibrazione del modello idrologico ha portato a stimare valori dei parametri che regolano il deflusso superficiale e sub-superficiale tali per cui si possono produrre risposte più veloci ed appiccate rispetto ad altri bacini o sottobacini della medesime dimensioni sul territorio regionale.

Inoltre le mappe di precipitazione a durata e tempo di ritorno fissato derivate dalla regionalizzazione delle piogge evidenziano un massimo relativo a cavallo tra il Misa e l'Esino. Questo ha contribuito, in fase di generazione degli eventi, a produrre volumi di precipitazione maggiori rispetto ad altre zone a parità di durata e tempo di ritorno.

I fattori sopra elencati contribuiscono ad avere quantili, per fissato tempo di ritorno T , più alti rispetto ad altri bacini o sottobacini della medesime dimensioni sul territorio regionale.

2.5.2 Bacino dell'Esino

Similmente al Misa la calibrazione ha portato a stimare valori dei parametri che regolano il deflusso superficiale che producono risposte più veloci ed appiccate rispetto ad altri bacini o sottobacini della medesime dimensioni sul territorio regionale.

Inoltre le mappe di precipitazione a durata e tempo di ritorno fissato derivate dalla regionalizzazione delle piogge evidenziano un massimo relativo a cavallo tra il Misa e l'Esino. Questo ha contribuito, in fase di generazione degli eventi, a produrre volumi di precipitazione maggiori rispetto ad altre zone a parità di durata e tempo di ritorno.

Si è notato che i valori dei quantili alla foce dell'Esino sono più alti rispetto a bacini di dimensioni simili o maggiori (ad esempio Metauro, Chienti e Tronto). I fattori di cui sopra hanno contribuito a tale risultato. C'è inoltre da evidenziare che sull'Esino non ci sono dighe di dimensioni rilevanti, mentre negli altri corsi citati esse son presenti. Le loro dimensioni non sono in generale tali da impedire il passaggio delle piene importanti ma contribuiscono a ridurre i picchi e a laminare parzialmente i volumi di piena nel tempo.

Non è stato possibile tenere conto nella modellazione idrologica di eventuali fenomeni carsici che potrebbero essere presenti nel bacino.

2.5.3 Bacino del Metauro

Il bacino del fiume Metauro è il più esteso a scala regionale ma ha valori al colmo di piena inferiori a quelli di bacini di dimensioni comparabili, come l'Esino e il Chienti (in quest'ultimo caso per i tempi di ritorno più bassi). Tale risultato è dovuto ad una combinazione tra caratteristiche pluviometriche e caratteristiche fisiche del bacino e alla presenza di diverse dighe. Le dighe sono state implementate nel modello utilizzando le caratteristiche strutturali relative agli organi di sfioro e ai volumi massimi di invaso rese disponibili dai gestori.

Nel caso del Metauro sono presenti tre dighe posizionate lungo l'asta principale e drenano aree via via crescenti, in particolare la diga di san Lazzaro drena un'area pari a circa 2/3 dell'area totale del bacino e quella di Tavernelle è posta ancora più a valle della precedente.

Le singole dighe non hanno grossa capacità di assorbire i volumi di piena che transitano lungo l'asta principale ma contribuiscono a laminare i picchi. Il quantile immediatamente a monte della diga di san Lazzaro (sezione 1) è maggiore di quello immediatamente a monte della diga di Tavernelle (sezione 2), e quest'ultimo è maggiore del quantile alla foce (sezione 3). Come esempio, la $Q(T=200 \text{ anni})$ è circa $1630 \text{ m}^3/\text{s}$ in corrispondenza della sezione 1, $1530 \text{ m}^3/\text{s}$ in corrispondenza della sezione 2 e $1480 \text{ m}^3/\text{s}$ in corrispondenza della sezione 3. Facendo un ragguglio areale se ne deduce che, in assenza di dighe il quantile alla foce risulterebbe maggiore di $2000 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.5.4 Bacino del Musone

Il bacino del fiume Musone ha nella sua area di testata la diga di Castreccioni che ha elevato volume di invaso rispetto all'area drenata a monte. La diga è in grado di assorbire buona parte dei volumi d'acqua associati agli eventi con tempi di ritorno anche elevati. Pertanto i quantili nel tratto di corso d'acqua immediatamente a valle della diga risultano bassi. Scendendo a valle e aumentando la porzione di area drenata l'influenza della diga diminuisce.

2.5.5 Bacino dell'Aspio

Si evidenzia che per l'Aspio la calibrazione del modello idrologico ha portato a stimare valori dei parametri che regolano il deflusso superficiale e sub-superficiale tali per cui si possono produrre risposte più veloci ed appiccate rispetto ad altri bacini o sottobacini della medesima dimensioni sul territorio regionale.

Questa condizione si è verificata anche per altri bacini, ad esempio il Misa, ma nel caso dell'Aspio è più marcata. La risposta molto impulsiva agli eventi di pioggia che ne consegue sembra essere confermata sia dalle osservazioni di portata sia dalla conoscenza più qualitativa del comportamento del bacino.

2.6 Esempio di applicazione

Nel presente paragrafo viene eseguito un esempio di applicazione della procedura per determinare la portata per assegnato tempo di ritorno in due bacini, uno con area superiore a 50 km² e uno con area inferiore a 50 km².

È possibile caricare le mappe dei quantili per assegnato tempo di ritorno e la mappa delle aree drenate in un qualunque software GIS, come ad esempio QGIS (www.qgis.org);

2.6.1 Esempio 1 – bacino con area superiore a 50 km²

Supponiamo di voler determinare la portata con tempo di ritorno 200 anni in un'assegnata sezione del reticolo idrografico di coordinate: latitudine pari a 43.822 gradi, longitudine pari a 13.047 gradi (coordinate geografiche WGS84-EPGS4326).

La Figura 18 mostra l'ambiente GIS con visualizzate la mappe della porta al colmo di piena per tempo di ritorno 200 anni (a) e la mappa delle aree drenate (b) con lo sfondo "Bing Road" (caricabile dal menu di QGIS: Web-> OpenLayers Plugin-> Bing Road).

Dopo aver caricato in ambiente GIS le mappe è sufficiente interrogarle utilizzando lo strumento "Identify Features" contraddistinto dal simbolo "i" bianca su campo blu in QGIS (Figura 18 pannello c, pannello d).

In tale caso l'area drenata dalla sezione considerata è 1413 km² e la portata per il tempo di ritorno 200 anni è 1484 m³/s.

2.6.2 Esempio 2 – bacino con area inferiore a 50 km²

Supponiamo di voler determinare la portata con tempo di ritorno 200 anni in un'assegnata sezione del reticolo idrografico di coordinate: latitudine pari a 43.474 gradi, longitudine pari a 12.525 gradi (coordinate geografiche WGS84-EPGS4326).

La Figura 19 mostra l'ambiente GIS con visualizzate la mappa della porta al colmo di piena per tempo di ritorno 200 anni (a) e la mappa delle aree drenate (b) con lo sfondo "Bing Road" (caricabile dal menu di QGIS: Web-> OpenLayers Plugin-> Bing Road).

Dopo aver caricato in ambiente GIS le mappe è sufficiente interrogarle utilizzando lo strumento "Identify Features" contraddistinto dal simbolo "i" bianca su campo blu in QGIS (Figura 18 pannello c, pannelo d).

In tale caso l'area drenata dalla sezione considerata è 14.2 km² e la portata per il tempo di ritorno 200 anni letta dalla mappa è: $Q_1(T) = 81.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

La porta indice per tale sezione ricavata applicando la formula (1) è:

$$Q_i = 1.6119 \cdot 14.2^{0.9735} = 21.3 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Il fattore di crescita K_T (Tabella 1) per tempo di ritorno 200 anni è pari a 3.725, per cui:

$$Q_2(T) = 21.3 \cdot 3.725 = 79.3 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

La porta per assegnato tempo di ritorno (T=200 anni) per il bacino con area inferiore a 50 km² preso in esame è il massimo tra le due portate sopra determinate:

$$Q(T) = \max(Q_1, Q_2) = 81.7 \text{ m}^3/\text{s}$$

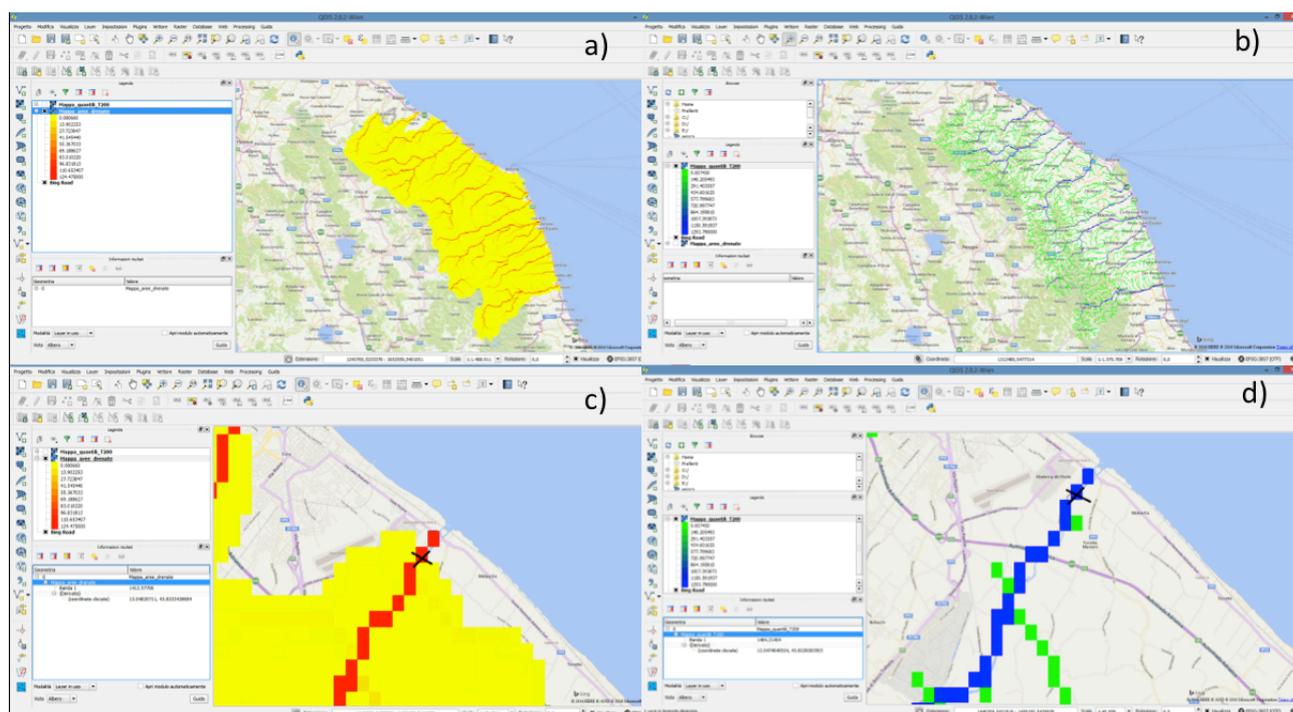


Figura 18 Esempio di determinazione della portata per tempo di ritorno 200 anni in un bacino con area maggiore di 50 km².

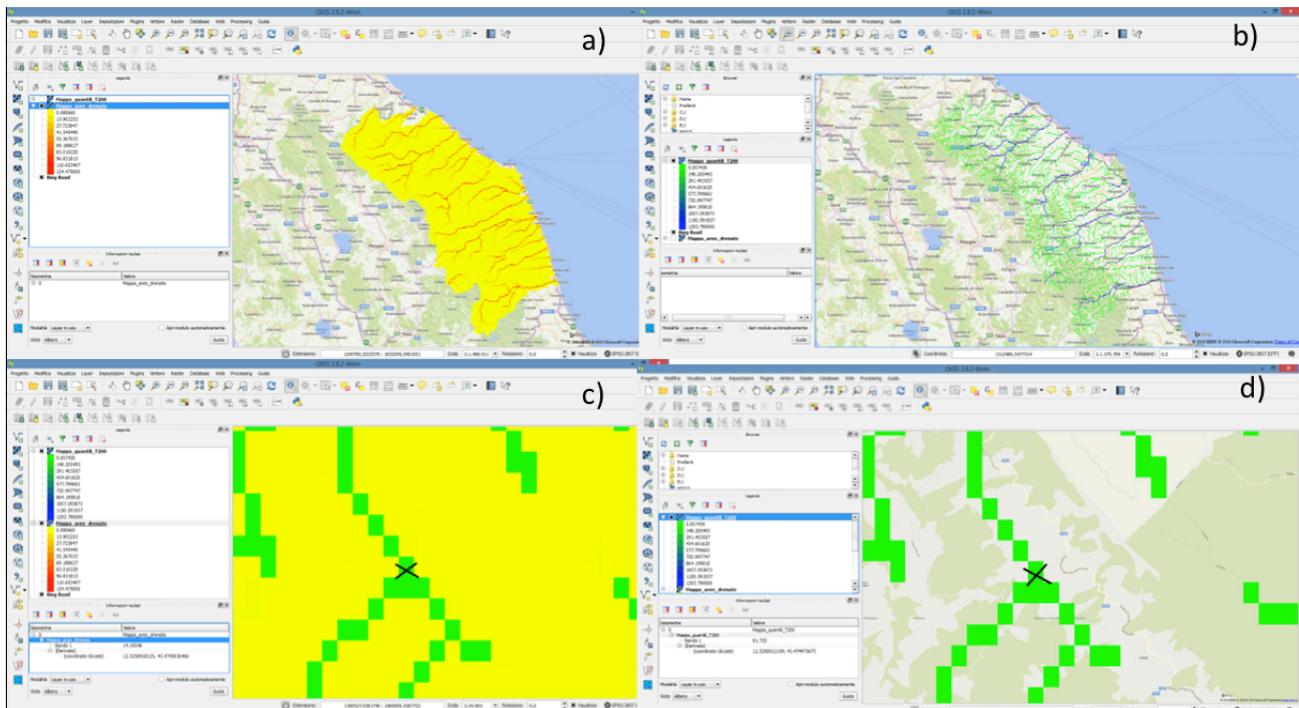


Figura 19 Esempio di determinazione della portata per tempo di ritorno 200 anni in un bacino con area minore di 50 km².

Bibliografia

- Brath, Castellarin, Franchini, Galeati, Estimating the index flood using indirect methods, *Hydrological Sciences, Hydrological Sciences Journal*, 46(3), 399-418, 2001.
- Castellarin, Vogel, Matalas, Probabilistic behavior of a regional envelope curve, *Water Resources Research*, W06018, doi:10.1029/2004WR003042, 2005.
- Castellarin, Probabilistic envelope curves for design flood estimation at ungauged sites, *Water Resources Research* (43), W04406, doi:10.1029/2005WR004384, 2007.
- Castellarin, Vogel, Matalas, Multivariate probabilistic regional envelopes of extreme floods, *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 376-390, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.007, 2007.
- Castellarin, Merz, Blöschl, Probabilistic envelope curves for extreme rainfall events, *Journal of Hydrology*, 378, 263–271, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.09.030, 2009.

Merz, Blöschl , Flood frequency regionalisation—spatial proximity vs. catchment attributes, *Journal of Hydrology*, 302, 283–306, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.07.018, 2005.

Rebora, N., L. Ferraris, J. von Hardenberg, and A. Provenzale: Rainfall downscaling and flood forecasting: A case study in the Mediterranean area. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 611–619, doi:10.5194/nhess-6-611-2006.

Rebora, N., L. Ferraris, J. von Hardenberg, and A. Provenzale: RainFARM: Rainfall downscaling by a filtered autoregressive model. *J. Hydrometeor.*, 7, 724–738, doi:10.1175/JHM517.1, 2006

Lista Allegati

1. Mappe_Regionalizzazione_Q.zip: mappe in formato ESRII grid, lat-lon EPSG-4326, delle:
 - a. Portate per diversi tempi di ritorno ($T= 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 200, 500$ anni).
 - b. Area drenata da ciascun punto sul reticolo modellistico (espressa in km^2).