

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO

IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA

Attività "B3"

Implementazione modello idrologico
distribuito per la Toscana -

Bacino Toscana Nord

Gruppo di Lavoro:

Fabio Castelli (Responsabile scientifico) – Università di Firenze

Ilaria Lardani – Università di Firenze

Firenze, ottobre 2014

Sommario

Metodologia	3
Impostazione dati geografici	3
Generazione di ietogrammi di progetto per assegnati tempi di ritorno e durate variabili	3
Calcolo degli idrogrammi di piena	4
Selezione degli idrogrammi critici	4
Salvataggio dei risultati	4
Applicazione ai bacini costieri della provincia di Massa e Carrara	6
Dati geografici	6
Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica	10
Calibrazione su eventi di piena	11
Risultati: zona acque alte	13
Risultati: zona acque basse	15
Bibliografia del modello MOBIDIC	17

Figura 1 – Esempio dell'insieme degli idrogrammi calcolati per assegnato tempo di ritorno e diverse durate di pioggia. In rosso è evidenziato quello critico per massima portata al picco.	4
Figura 2 – Esempio di interrogazione dei risultati su shape -file.	5
Figura 3 - Dati geomorfologici di origine (D.T.M. 10 m e reticolo L.R. 79/2012) per la zona di studio.	6
Figura 4 - Conducibilità idraulica a saturazione dello strato superficiale (30 cm) del suolo per la zona di studio. .	7
Figura 5 - Capacità idrica totale del suolo (prodotto di spessore e porosità efficace) per la zona di studio.	7
Figura 6 - D.T.M. e reticolo idrografico in input al modello MOBIDIC per la zona di acque alte.	8
Figura 7 - D.T.M. e reticolo idrografico in input al modello MOBIDIC per la zona di acque basse.	9
Figura 8 - Confronto fra reticolo R.L. 79/2012 e reticolo in input al modello MOBIDIC.	9
Figura 9 - Parametro α della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per Tr 20 0 anni.	10
Figura 10 - Parametro n della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per Tr 200 anni.	10
Figura 11 - Confronto fra valori di portata al picco misurati e modellati per 5 eventi di calibrazione e 5 eventi di validazione sull'Ombrore Pistoiese, con condizioni iniziali medie e condizioni iniziali ottimizzate.	11
Figura 12 - Confronto fra idrogrammi stimati con il modello MOBIDIC (linea blu) e idrogrammi stimati da dati idrometrici con scala di deflusso adattiva (linea rosso) per l'evento di ottobre 2013.	12
Figura 13 - Mappa delle portate al picco per tempi di ritorno 30, 100 e 200 anni (acque alte).	13
Figura 14 - Idrogrammi di piena per i principali canali per tempi di ritorno da 2 a 200 anni.	14
Figura 15 - Analisi di regressione sull'area delle portate al picco per diversi tempi di ritorno.	16

Metodologia

Il metodo adottato per il calcolo delle portate di piena per assegnati tempi di ritorno si basa sull'utilizzo di un modello idrologico distribuito (MOBIDIC) che consente il calcolo degli idrogrammi di piena contemporaneamente su tutti i rami del reticolo idrografico della regione considerata in risposta ad eventi di pioggia di arbitraria distribuzione spaziale e temporale.

Ciò consente di non predefinire forma e durata di eventi critici per ciascun tratto fluviale, ma di simulare invece un elevato numero di eventi con pari tempo di ritorno e selezionare a posteriori come evento critico quello che genera il più elevato valore di picco di portata per ciascun tratto.

Per ciascun tratto sarà quindi disponibile l'idrogramma di piena per assegnati tempi di ritorno, ma anche potenzialmente l'idrogramma di piena in risposta ad eventi critici per altri tratti fluviali. In tale modo sono quindi anche potenzialmente valutabili le probabilità congiunte di piena in diversi tratti fluviali.

Per contro, non è possibile utilizzare coefficienti di ragguaglio all'area per singoli sottobacini della regione considerata. Tale rigidità può comunque ritenersi accettabile per regioni di area non superiore ai 1000 kmq.

I passi fondamentali della metodologia sono:

Impostazione dati geografici

L'impostazione dei dati geografici per la regione di interesse viene effettuata con criteri analoghi a quelli già utilizzati dal programma MOBIDIC per i calcoli di previsione in tempo reale o bilancio idrologico, al cui manuale e bibliografia si rimanda per ulteriori dettagli.

Gli elementi geografici strettamente necessari sono:

- Modello digitale del terreno in forma raster a maglia quadrata, corredato di matrice delle direzioni di deflusso.
- Reticolo idrografico in forma vettoriale semplicemente connesso (senza loop), eventualmente con più foci se la regione non coincide con un singolo bacino idrografico.
- Mappe di caratteristiche idrauliche del suolo (conducibilità idraulica a saturazione dello strato superficiale, capacità idrica totale e capacità di campo).

Sono utilizzabili, ma non strettamente necessarie, mappe su parametri legati all'uso del suolo e agli acquiferi.

Generazione di idrogrammi di progetto per assegnati tempi di ritorno e durate variabili

Nella versione attualmente implementata gli idrogrammi vengono generati per tutte le durate multiple del passo di calcolo Δt fino ad un valore massimo prefissato. Ciascun idrogramma ha intensità costante nel tempo, funzione di durata e tempo di ritorno secondo la classica formulazione in termini di linea segnalatrice $i = at^n$, ma variabile nello spazio. In particolare si considerano variabili nello spazio i parametri a e n . Questi

vengono geo-interpolati dal programma di calcolo a partire da valori puntuali corrispondenti a singole stazioni di misura o punti virtuali risultanti da altre procedure di tipo geostatistico.

Calcolo degli idrogrammi di piena

Per ciascun ietogramma di progetto, il programma MOBIDIC calcola la risposta idrologica del bacino (vedi letteratura di riferimento) e quindi l'idrogramma di piena in ciascun ramo del reticolo.

Selezione degli idrogrammi critici

Per ciascun ramo di reticolo, vengono automaticamente selezionati due idrogrammi critici fra tutti quelli calcolati con lo stesso tempo di ritorno: quello con massima portata al picco e quello con massimo volume di piena. Nel caso particolare in cui siano calcolati gli idrogrammi di piena con tempo di ritorno 2 anni, i volumi di piena vengono calcolati come volumi al di sopra della portata massima per tale tempo di ritorno. In tale maniera si considerano volumi derivanti sostanzialmente dai soli deflussi superficiali.

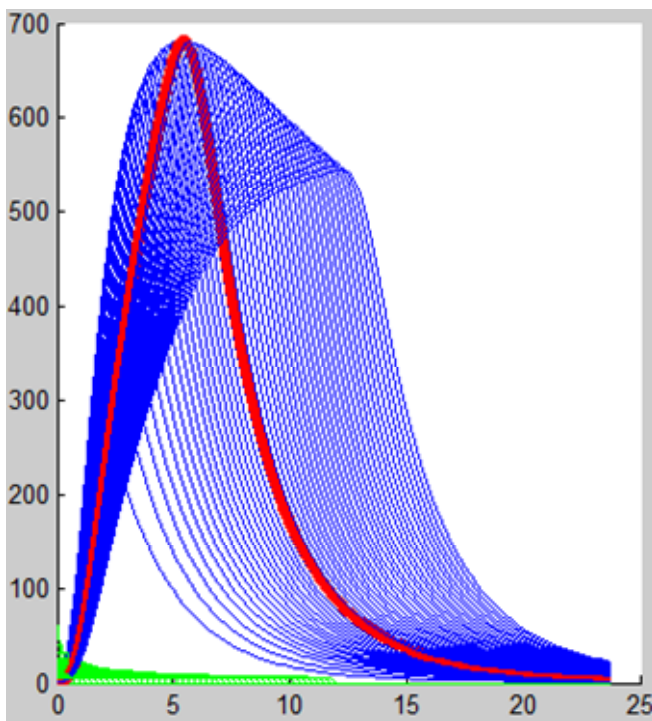


Figura 1 – Esempio dell'insieme degli idrogrammi calcolati per assegnato tempo di ritorno e diverse durate di pioggia. In rosso è evidenziato quello critico per massima portata al picco.

Salvataggio dei risultati

Per ciascun tempo di ritorno ### i risultati vengono salvati nel seguente modo:

Shape-file del reticolo idrografico contenente, per ciascun ramo, i seguenti campi:

- Qmax### – Portata massima [m^3/s] per evento con massima portata al picco.
- dQmax### - Durata [ore] dell' evento con massima portata al picco.
- VQmax### - Volume di piena [$100 \times \text{m}^3$] dell' evento con massima portata al picco.
- Vmax### - Portata massima [m^3/s] per evento con massimo volume di piena.

- dVmax### - Durata [ore] dell' evento con massimo volume di piena .
- QVmax### - Volume di piena [100 x m³] dell' evento con massimo volume di piena.

Tabella in formato .csv in cui è riportato, per ciascun ramo del reticolo, l'andamento temporale dell'idrogramma di piena per evento con massima portata al picco.

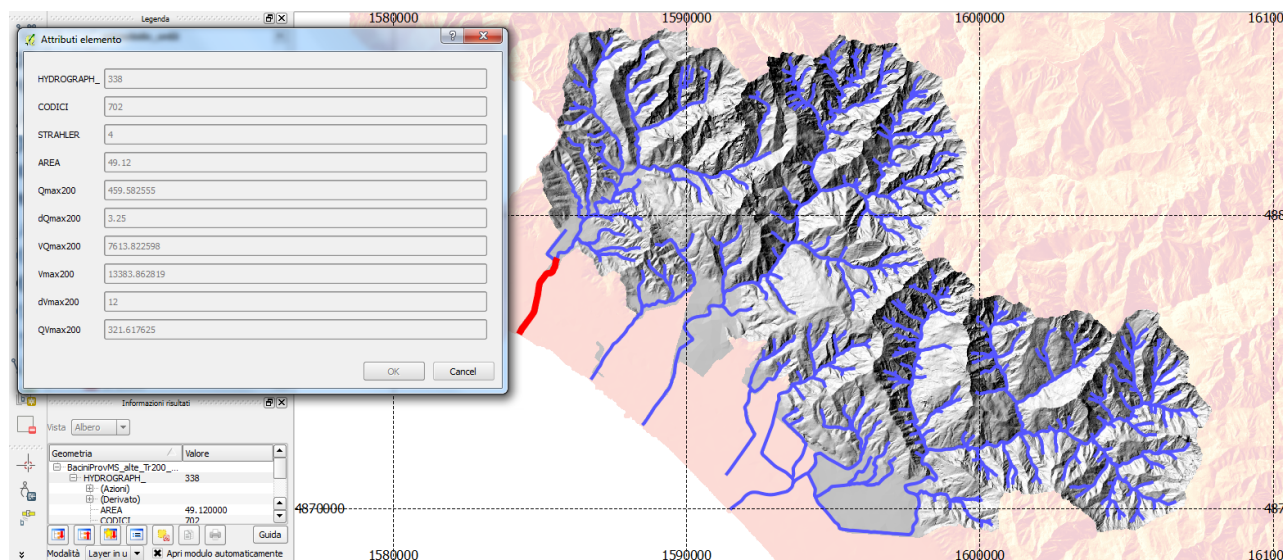


Figura 2 – Esempio di interrogazione dei risultati su shape-file.

Applicazione ai bacini costieri della provincia di Massa e Carrara

Dati geografici

I dati geografici utilizzati sono i seguenti:

- Modello digitale del terreno a 10m di risoluzione (fonte Regione Toscana – DG Governo del Territorio - Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale).
- Reticolo idrografico ai sensi della L.R. 79/2012 (fonte Regione Toscana – DG Governo del Territorio - Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale).
- Carta delle proprietà idrauliche dei suoli, aggiornamento 2014 (fonte SoilData & Unifi -DICEA per Regione Toscana).

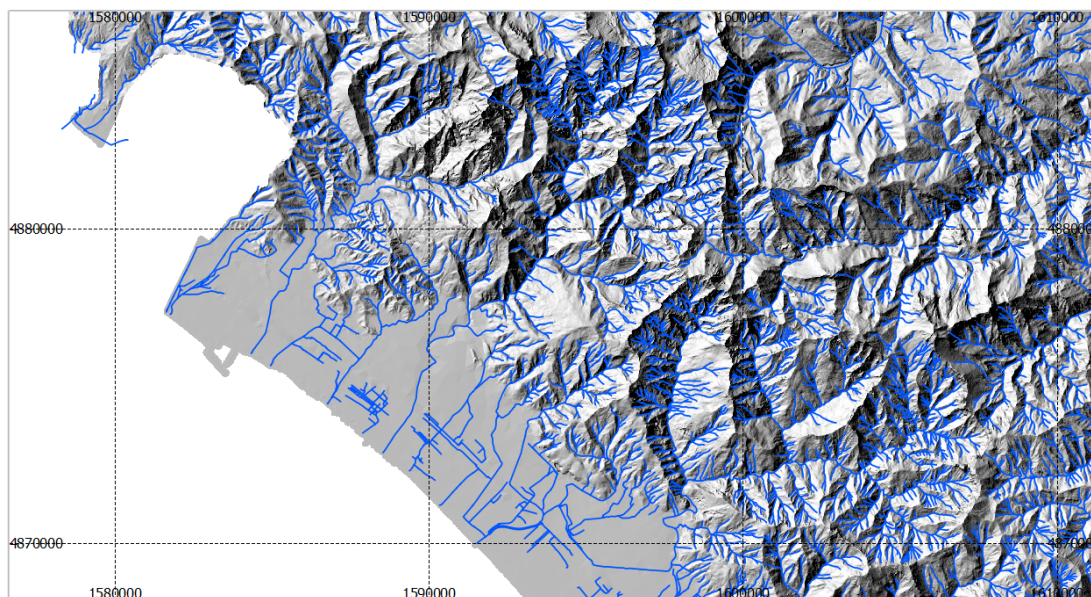


Figura 3 - Dati geomorfologici di origine (D.T.M. 10 m e reticolo L.R. 79/2012) per la zona di studio.

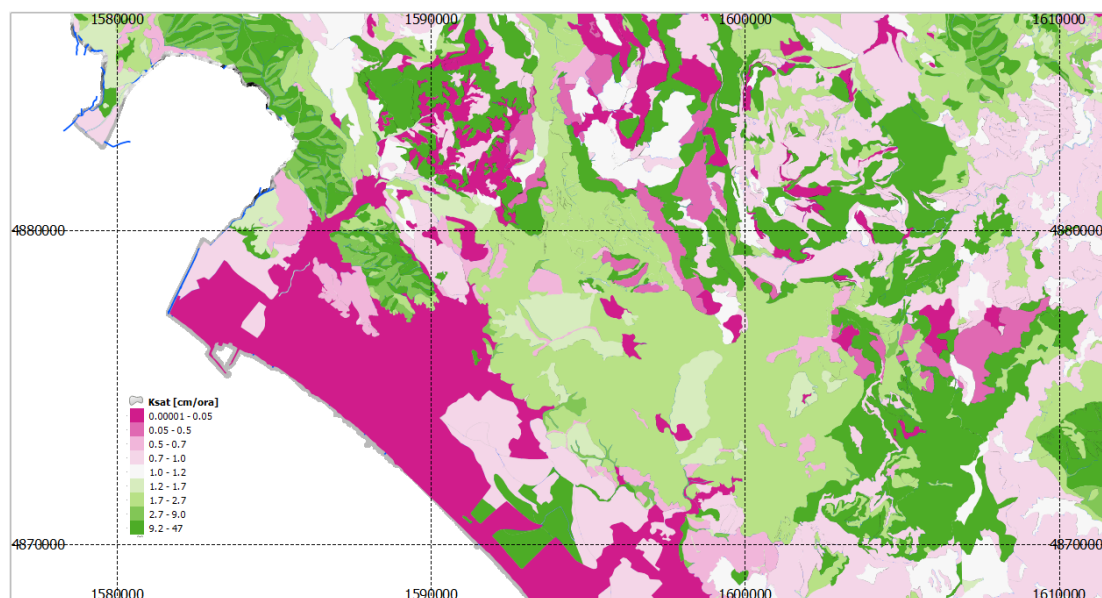


Figura 4 - Conducibilità idraulica a saturazione dello strato superficiale (30 cm) del suolo per la zona di studio.

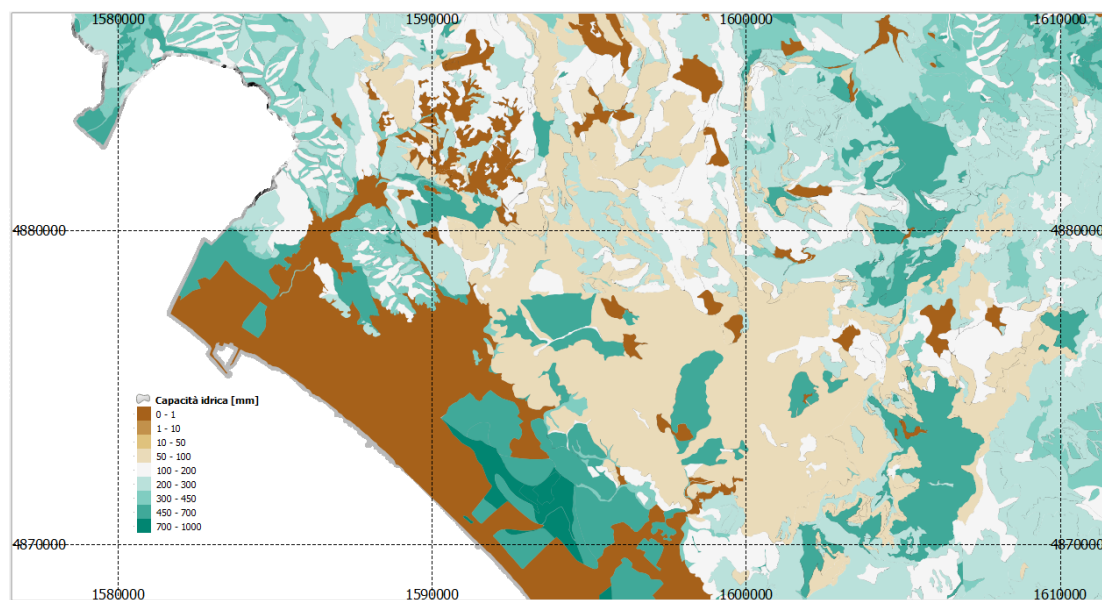


Figura 5 - Capacità idrica totale del suolo (prodotto di spessore e porosità efficace) per la zona di studio.

Il calcolo delle portate con il modello MOBIDIC richiede un pre-processamento dei dati geografici di origine, e in particolare del D.E.M., effettuabile con strumenti GIS comunemente disponibili (es: la funzione `r.watershed` di GRASS), volto alla identificazione delle direzioni di drenaggio e alla conseguente delimitazione dei bacini idrografici. Inoltre il reticolo idrografico deve risultare strutturato ad albero (assenza di maglie chiuse) e con direzioni di scolo coerenti con la struttura idrologica naturale.

La zona di studio è chiaramente distinguibile in due zone, quella collinare e montana interessata da una struttura geomorfologica (pendenze e reticolo idrografico) sostanzialmente naturale, e quella della pianura interessata da una struttura geomorfologica sostanzialmente artificiale.

Il pre-processamento dei dati geografici, ed il conseguente calcolo delle portate di piena, è stato fatto quindi in maniera separata per le due zone, denominate per semplicità 'acque alte' e 'acque basse'.

Per la zona di acque alte è stato possibile utilizzare i normali strumenti GIS automatici sopra richiamati, con l'accortezza di mascherare (escludere dall'analisi) le zone di pianura attraversate dai tratti terminali arginati dei corsi d'acqua d'origine montana. È stato inoltre necessario correggere manualmente alcuni dettagli del reticolo (presenza di tratti di lunghezza millimetrica e maglie chiuse anche nella parte montana) e ordinarlo secondo Strahler per poter escludere i rami di ordine 1 (dettaglio coerente con i bacini della Toscana in cui è già applicato e calibrato MOBIDIC, vedi paragrafo successivo sulla calibrazione).

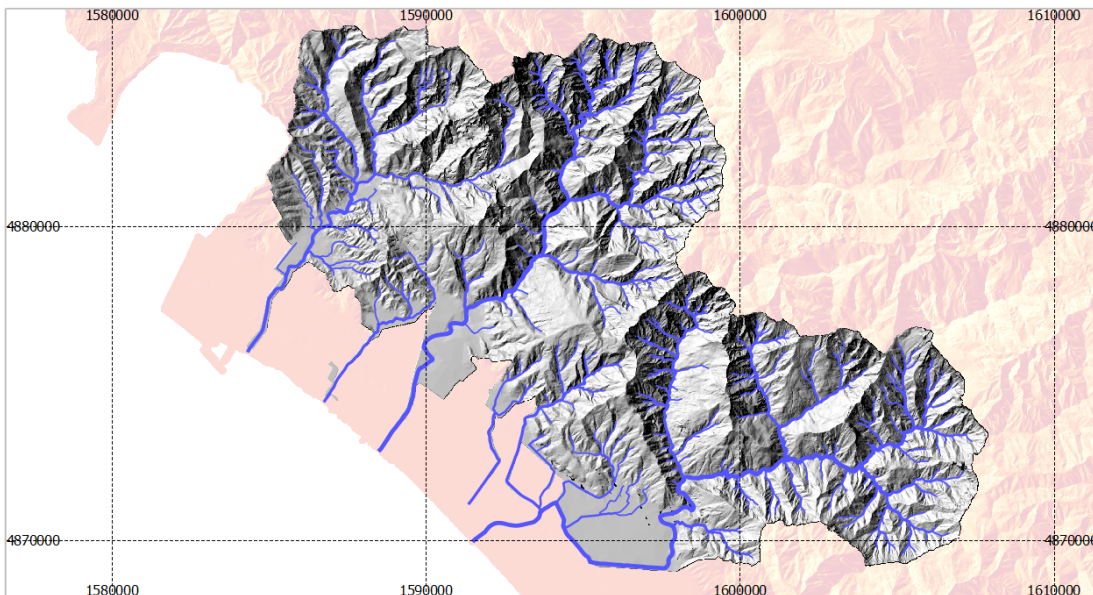


Figura 6 - D.T.M. e reticolo idrografico in input al modello MOBIDIC per la zona di acque alte.

Per il pre-processamento della zona delle acque basse è stato invece necessario ricorrere a procedure ad hoc. Per quanto riguarda il D.E.M., tramite il quale devono essere identificabili le zone di scolo in ciascun ramo del reticolo, è stato necessario predefinire manualmente gli spartiacque sulla base degli elementi territoriali rilevanti (rilevato fer roviari, argini, viabilità principale ecc.) e sulla base di questi, della linea di costa e del tracciato del reticolo costruire un D.E.M. artificiale dal quale conseguissero coerenti direzioni di scolo. Per quanto riguarda il reticolo è stato necessario prima di tutto 'scucire' le numerose maglie chiuse presenti, e poi ridefinire in molti casi le direzioni di scolo del reticolo originario (vedi esempi nelle figure successive).

Soprattutto l'editazione del reticolo idrografico ha richiesto un certo livello di soggettività, non essendo ad esempio le direzioni di scolo non oggettivamente definibili, con le informazioni a disposizione, in diversi rami del reticolo. I risultati relativi alle acque basse sono quindi da considerarsi come una prima stima, da rivedere e a seguito di una migliore conoscenza dell'effettivo assetto della rete di drenaggio artificiale nella zona di pianura.

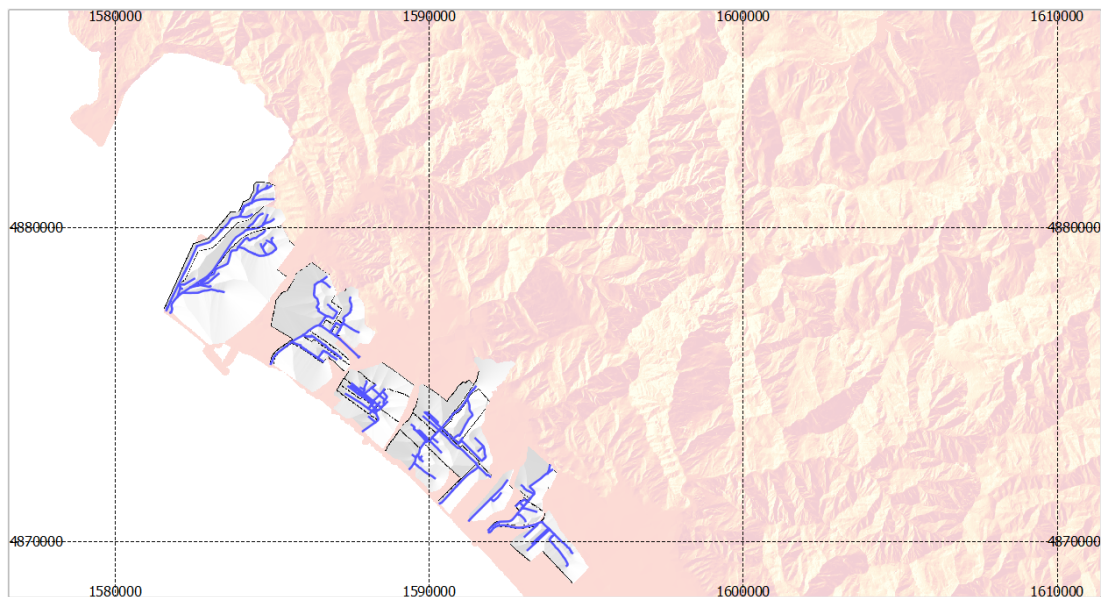


Figura 7 - D.T.M. e reticolo idrografico in input al modello MOBIDIC per la zona di acque basse.

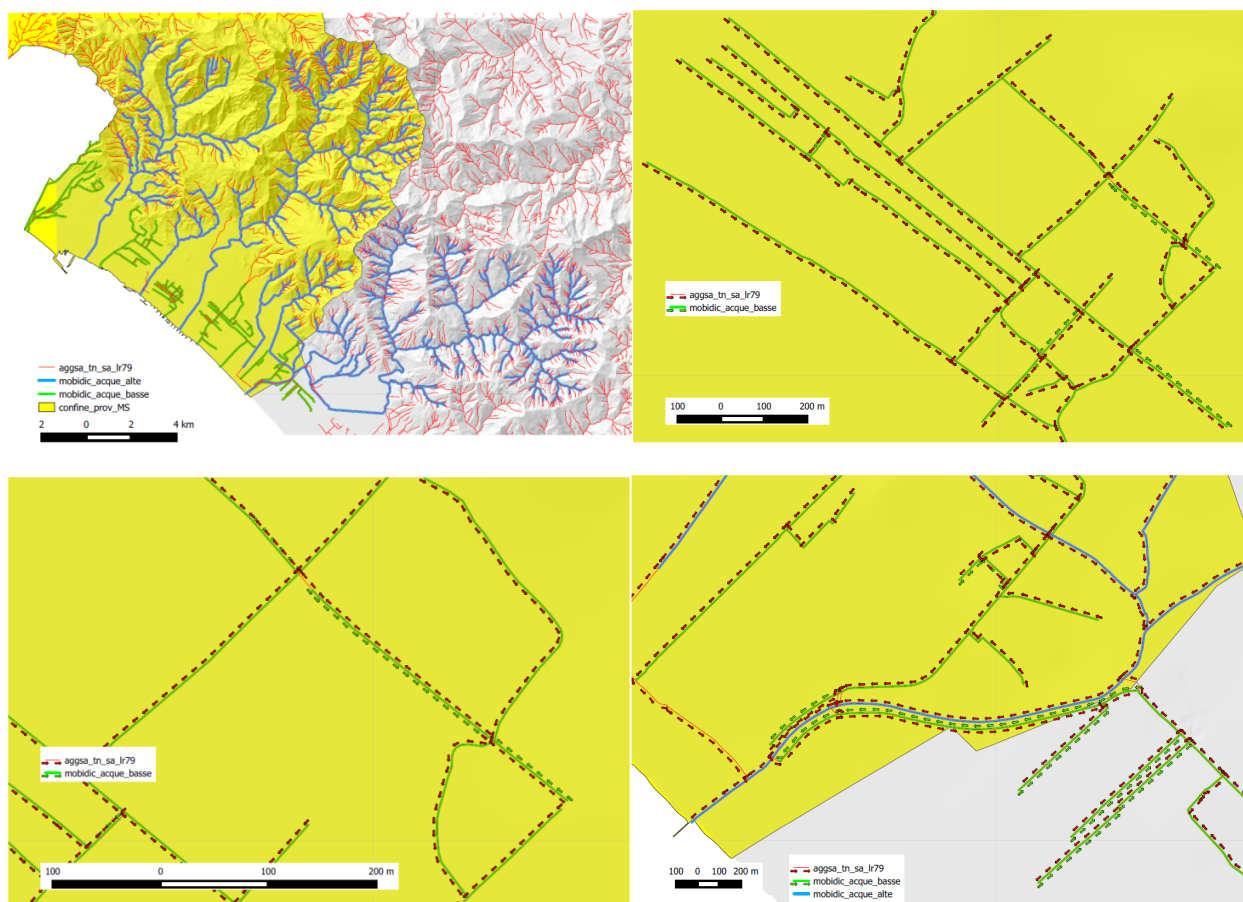


Figura 8 - Confronto fra reticolo R.L. 79/2012 e reticolo in input al modello MOBIDIC.

Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica

Per i parametri delle linee segnalatrici nella forma monomia $i = at^n$, con parametri a e n dipendenti dal tempo di ritorno, sono stati utilizzati gli aggiornamenti dello studio di Caporali et al., 2014, per conto della Regione Toscana, disponibili per l'intero territorio regionale su griglia a maglia quadrata di passo 1km.

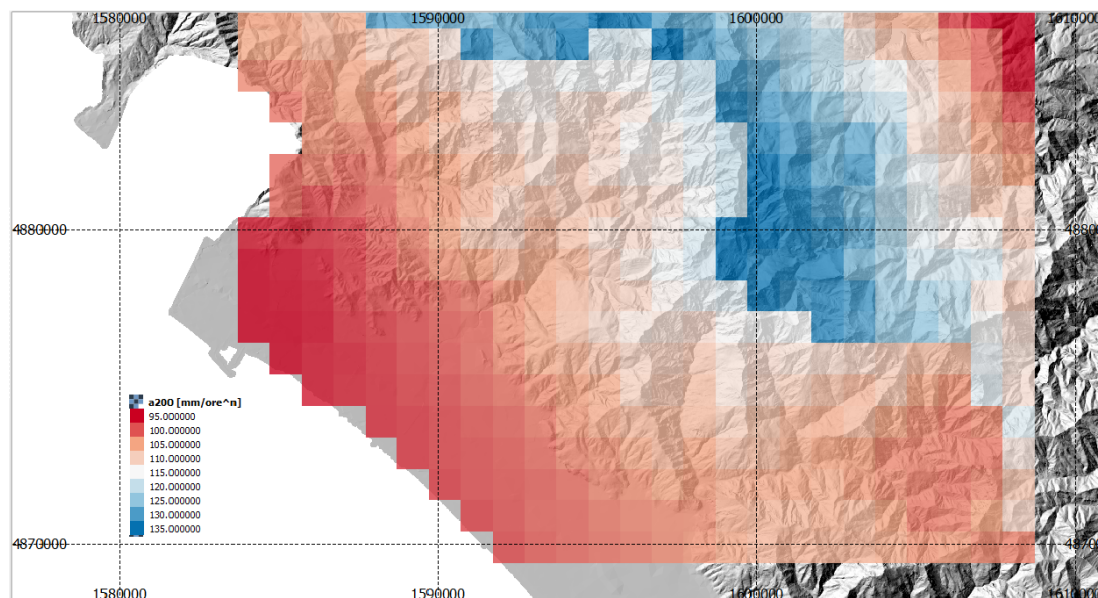


Figura 9 - Parametro a della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per Tr 200 anni.

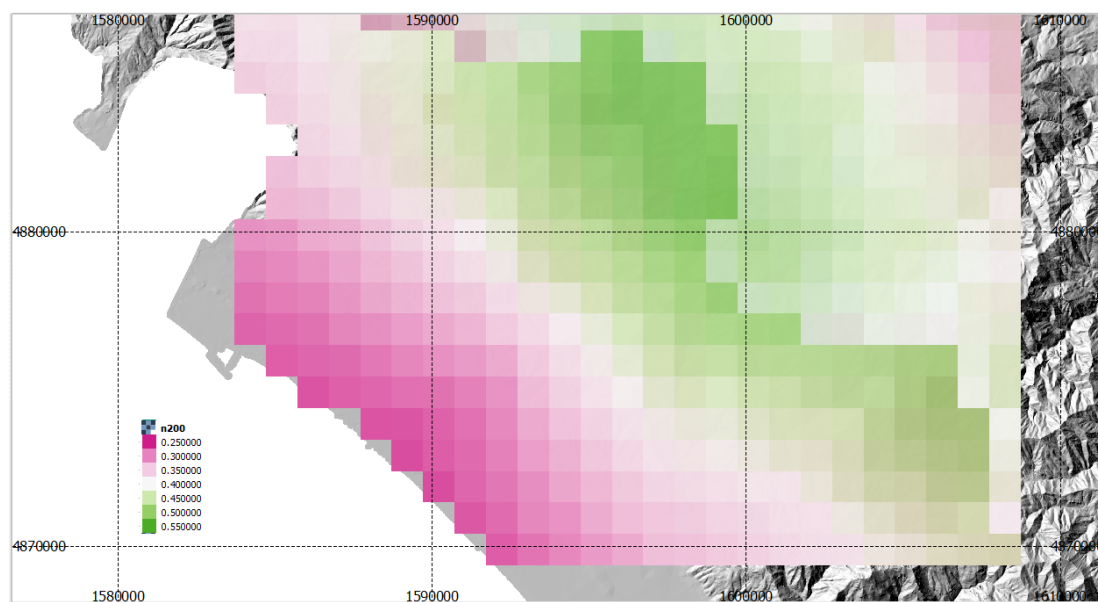


Figura 10 - Parametro n della linea segnalatrice di possibilità pluviometrica per Tr 200 anni.

Calibrazione su eventi di piena

Il modello MOBIDIC, distribuito e fisicamente basato, anche a fronte dei nuovi strati informativi sulle proprietà idrauliche dei suoli, richiede la calibrazione di un numero limitato di parametri globali. Solo alcuni di questi poi influenzano i fenomeni di piena, risultando ad esempio molto poco rilevanti quelli relativi alla risposta degli acquiferi e all'evapotraspirazione. I parametri soggetti a calibrazione per il calcolo delle piene sono:

1. Parametro di celerità del deflusso canalizzato
2. Parametro di celerità del deflusso superficiale di versante
3. Parametro di celerità del deflusso sub-superficiale (ipodermico) di versante
4. Parametro di percolazione dal suolo verso le falde
5. Parametro di assorbimento capillare

Nella zona di studio sono presenti diverse stazioni idrometriche in telemisura, ma le scale di deflusso per tali stazioni sono tutt'ora in corso di definizione e/o validazione. In accordo con il Servizio Idrologico Regionale, non sono state ritenute idonee ai fini della calibrazione. I dati delle stazioni idrometriche per recenti eventi di piena possono perciò essere utilizzati solo per calibrare i tempi di risposta del modello, ma non le portate o i volumi.

La calibrazione del modello MOBIDIC sull'area di studio è stata quindi effettuata con la seguente strategia:

1. Adozione, per il parametro che lega la celerità dei rami del reticolo a valori geomorfologici (area a monte, pendenza, ordine di Strahler), del valore calibrato per l'intero reticolo della Regione Toscana sulla base delle principali scale di deflusso ritenute affidabili (vedi relazione generale attività B2).
2. Calibrazione del parametro che lega la celerità del deflusso superficiale alla pendenza e all'area a monte tramite i tempi di picco degli eventi di piena registrati nell'area di studio (ottobre 2011, novembre e dicembre 2012, ottobre 2013).
3. Adozione, per gli altri parametri, dei valori calibrati per i bacini dell'Arno e dell'Ombrone Pistoiese (vedi relazione generale attività B2).

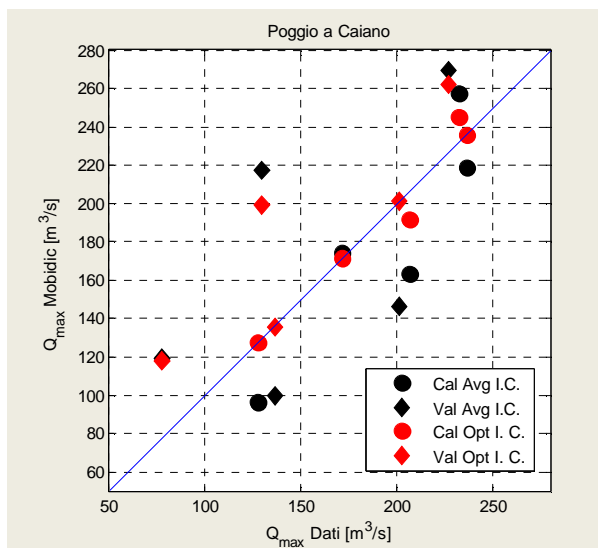


Figura 11 - Confronto fra valori di portata al picco misurati e modellati per 5 eventi di calibrazione e 5 eventi di validazione sull'Ombrone Pistoiese, con condizioni iniziali medie e condizioni iniziali ottimizzate.

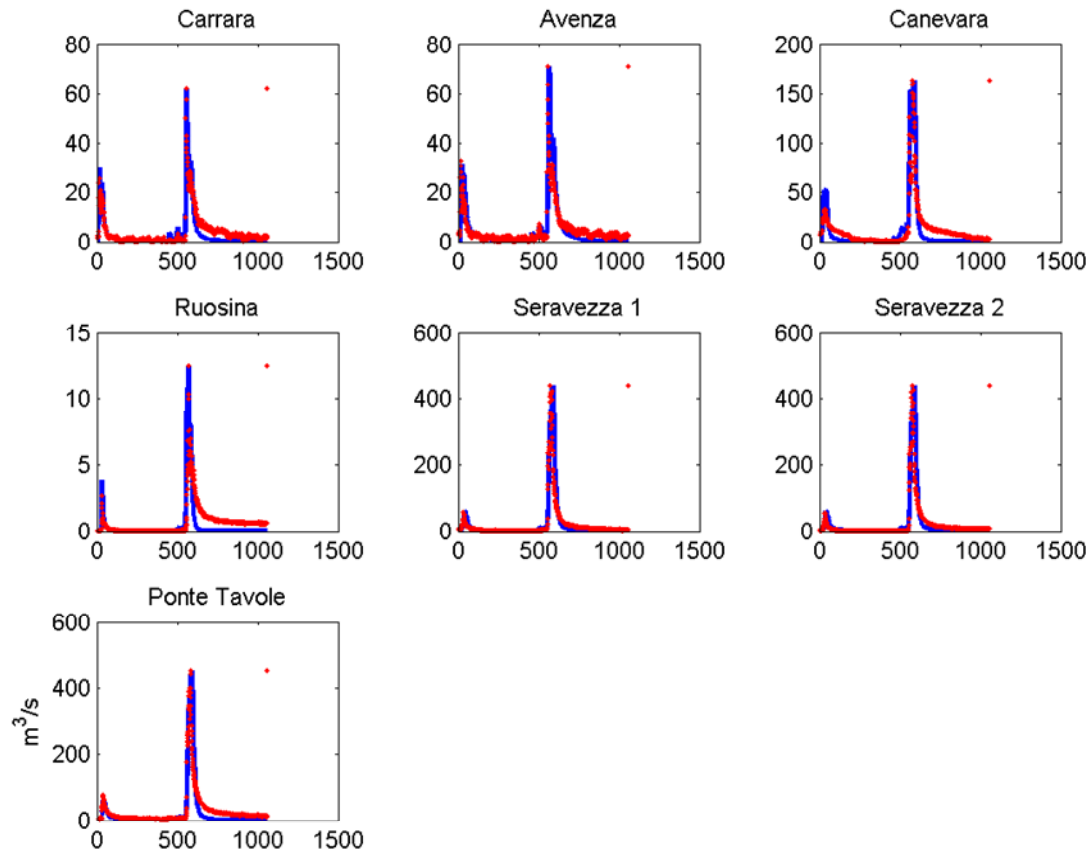


Figura 12 - Confronto fra idrogrammi stimati con il modello MOBIDIC (linea blu) e idrogrammi stimati da dati idrometrici con scala di deflusso adattiva (linea rosso) per l'evento di ottobre 2013.

Risultati: zona acque alte

Per quanto esposto sopra, i risultati sono da considerarsi oggettivamente stimati sui singoli rami del reticolo per la sola zona delle acque alte, relativamente alla quale si riportano qui alcuni risultati principali.

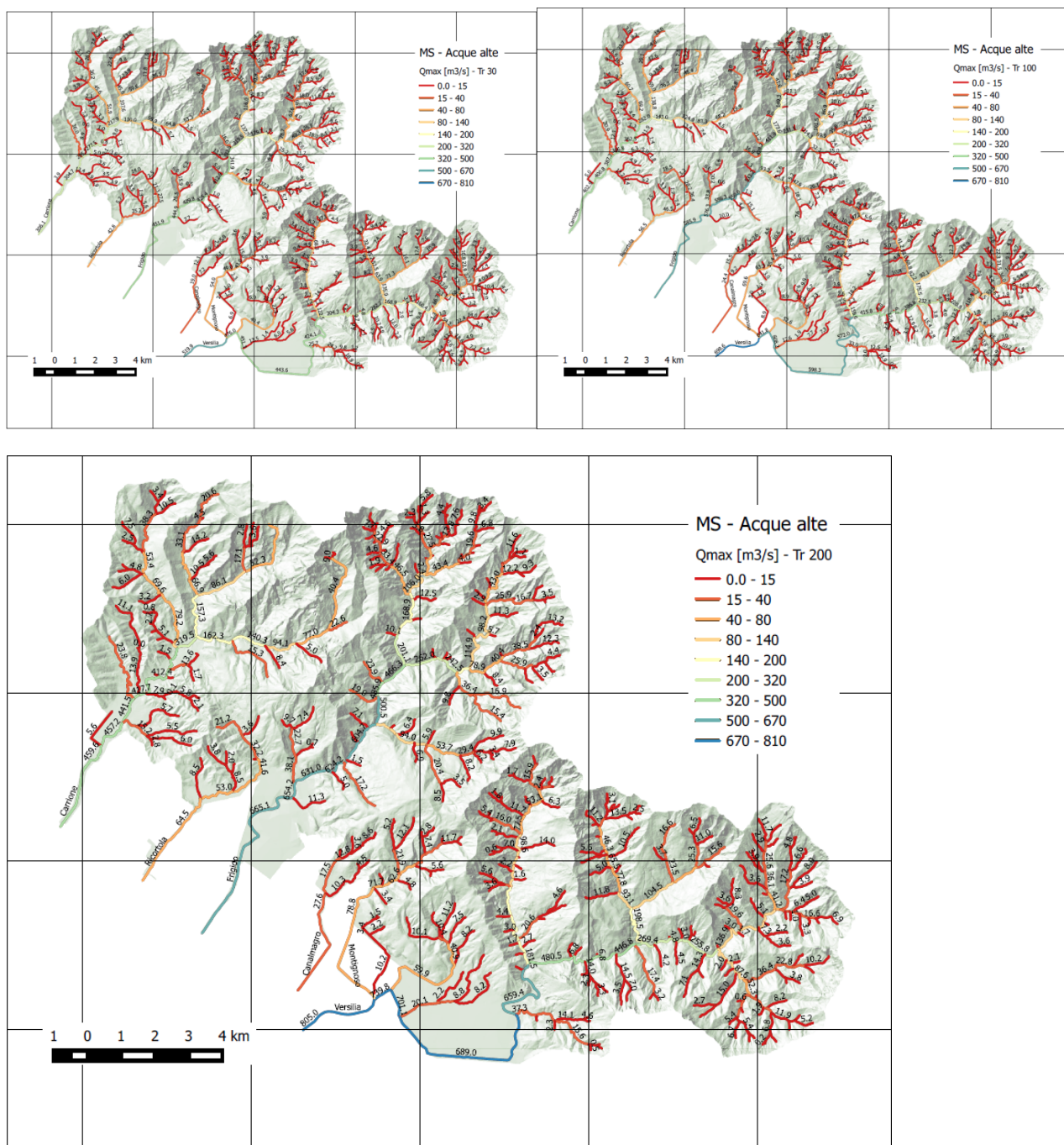


Figura 13 - Mappa delle portate al picco per tempi di ritorno 30, 100 e 200 anni (acque alte).

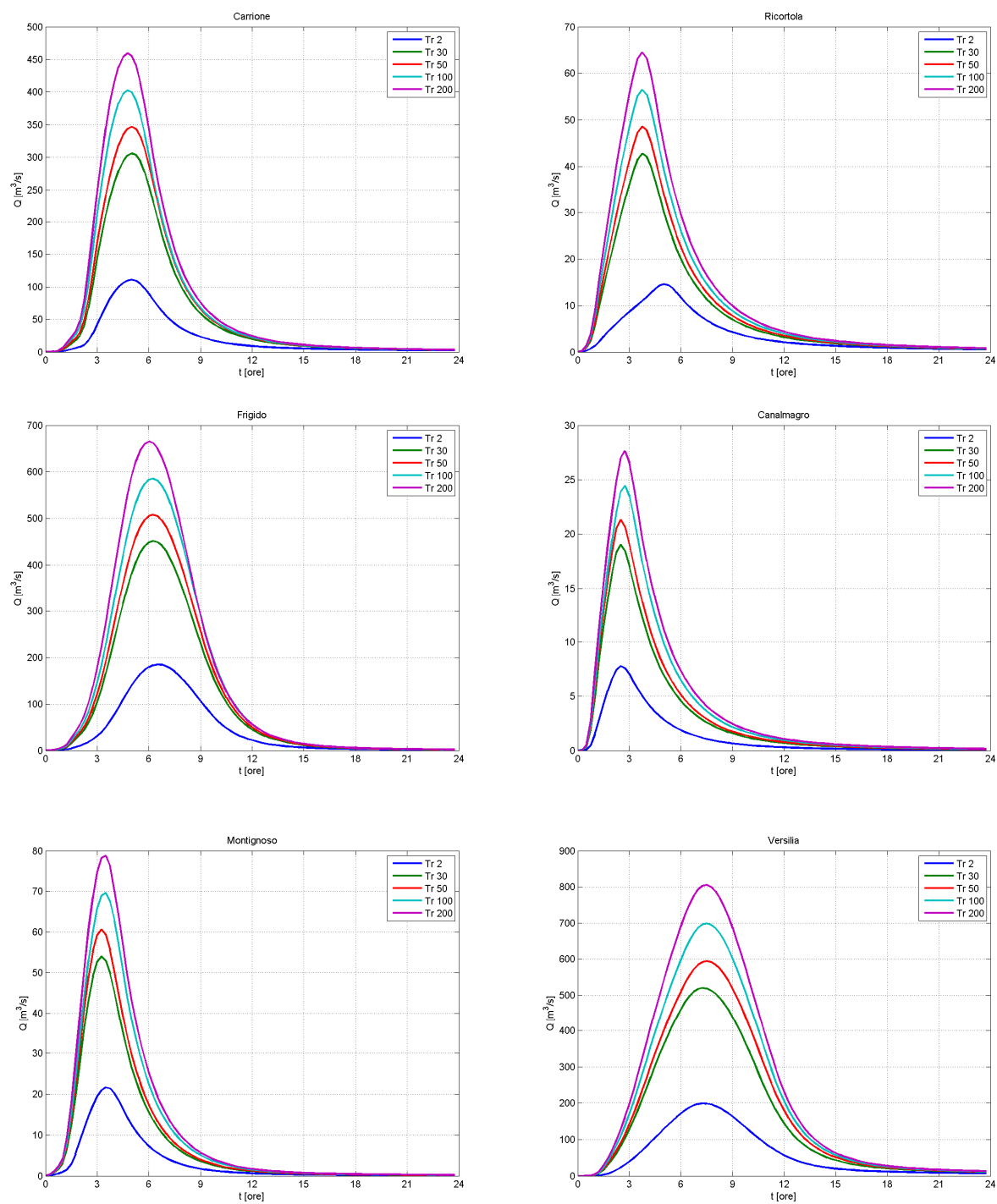
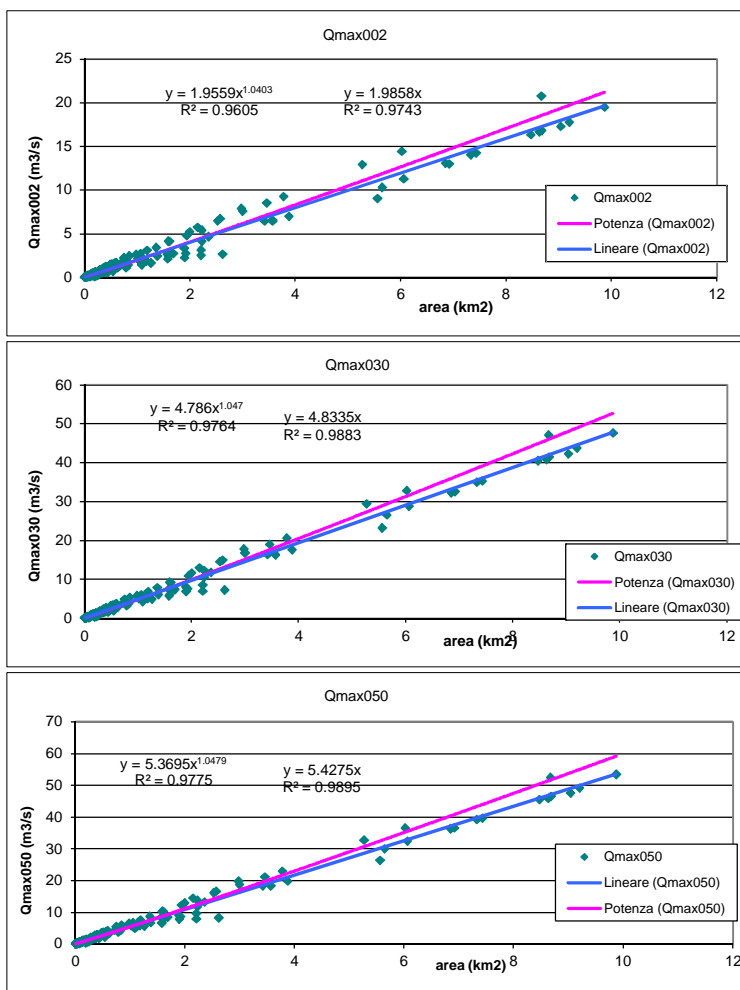


Figura 14 - Idrogrammi di piena per i principali canali per tempi di ritorno da 2 a 200 anni.

Risultati: zona acque basse

Per la zona delle acque basse, stanti le incertezze sulla identificazione di molti rami del reticolo e sulle relative aree scolanti, i risultati sono da ritenersi rappresentativi solo in termini statistici e non su ogni singolo ramo. La mappa sotto riportata a titolo di esempio è quindi da considerarsi come rappresentativa delle stime successivamente elaborate in termini statistici.

L'analisi statistica di tali risultati mostra l'esistenza di una legge, pressoché univoca per l'intera zona (coefficiente di determinazione > 0.95), di regressione delle portate e dei volumi di piena per assegnato tempo di ritorno in funzione dell'area scolante. Le maggiori precipitazioni nelle zone collinari risultano compensate dalla minore urbanizzazione e conseguente maggiore capacità di assorbimento del terreno.



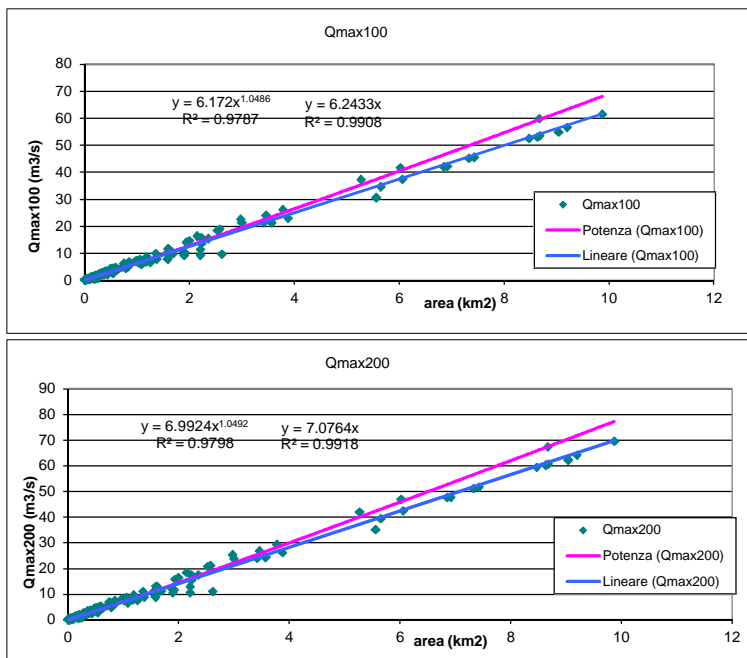


Figura 15 - Analisi di regressione sull'area delle portate al picco per diversi tempi di ritorno.

L'analisi mostra inoltre che, in termini di coefficiente di determinazione indistorto R^2 , l'adozione di una semplice legge lineare mono parametrica (valori costanti per i contributi specifici per unità di area) risulta vantaggiosa. Si riportano nella tabella seguente i risultati di tali analisi effettuate sia per le portate al picco che per i volumi di piena (N.B. Per volumi di piena si intendono qui i volumi al di sopra della portata con tempo di ritorno 2 anni).

Tr	Portata specifica al picco per evento con massima portata di piena		Portata specifica al picco per evento con massimo volume di piena		Volume specifico di piena per evento con massima portata di piena		Volume specifico di piena per evento con massimo volume di piena	
	q (m³/s/km²)	R²	q (m³/s/km²)	R²	v (m³/km²)	R²	v (m³/km²)	R²
2	1.9559	0.9743	-	-	-	-	-	-
30	4.8335	0.9883	4.0509	0.9885	15.009	0.9823	19.863	0.9890
50	5.4275	0.9895	4.2810	0.9884	17.202	0.9842	28.111	0.9910
100	6.2433	0.9908	4.4974	0.9887	28.127	0.9867	41.582	0.9931
200	7.0764	0.9918	4.7185	0.9899	36.538	0.9887	57.539	0.9944

Una ulteriore analisi di tali risultati consente di esprimere, in buona approssimazione, i contributi specifici per portate e volumi in funzione del tempo di ritorno. Fra le varie relazioni testate (e.g la curva di crescita di Gumbel) la relazione logaritmica fornisce il miglior valore del coefficiente di determinazione. In particolare, per la portata specifica al picco per evento con massima portata di piena si ha (ottenendo $R^2 = 0.998$):

$$q \left[\frac{m^3}{s \cdot km^2} \right] = 1.146 + 1.106 \ln(T_r)$$

Bibliografia del modello MOBIDIC

- Campo, L., Caparrini, F. and Castelli, F. (2006). Use of multi-platform, multi-temporal, remote sensing data for calibration of a distributed hydrological model: an application in the Arno basin, Italy. *Hydrological Processes* 20, 2693–2712.
- Tartaglia, V. and Castelli, F. (2006). L'ensemble Kalman filter applicato ad un modello distribuito per il bilancio idrologico ed il preannuncio di piena nel bacino dell'Arno. In: XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Roma, 10-15 Settembre 2006, pp. 1 -15, ISBN:9788887242812 .
- Castelli, F., Caparrini, F. and Castellani, L. (2006). Flood frequency mapping through distributed modeling and precipitation patterns modulation. In: XXX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche , Roma, 10-15 Settembre 2006, pp. 1 -11, ISBN:9788887242812 .
- Castelli, F., Menduni, G. and Mazzanti, B. (2009). A distributed package for sustainable water management: A case study in the Arno basin . In: H. J. Liebscher, R. Clarke, J. Rodda, G. Schultz, A. Schumann, L. Ubertini, G. Young. *The Role of Hydrology in Water Resources Management* , pp. 52 -61.
- Ercolani, G. and Castelli, F. (2010). Un modello distribuito per lo studio integrato dei bilanci idrici e del trasporto di inquinanti a scala di bacino . In: XXXII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche , Palermo, 14-17 Settembre 2010, pp. 1 -10.
- Yang, J., Castelli, F. and Chen, Y. (2014). Multiobjective sensitivity analysis and optimization of a distributed hydrologic model MOBIDIC . *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* , 11, 3505-3539.
- Castillo, A., Castelli, F. and Entekhabi, D. (2014). Gravitational and capillary soil moisture dynamics for hillslope - resolving models . *Hydrology and Earth System Sciences Discussion* , 11, 7133-7168.
- Yang, J., Entekhabi D., Castelli, F. and Chua, L. (2014). Hydrologic response of a tropical watershed to urbanization. *Journal of Hydrology* , 517, 538-546.