



UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI
MODENA E REGGIO EMILIA

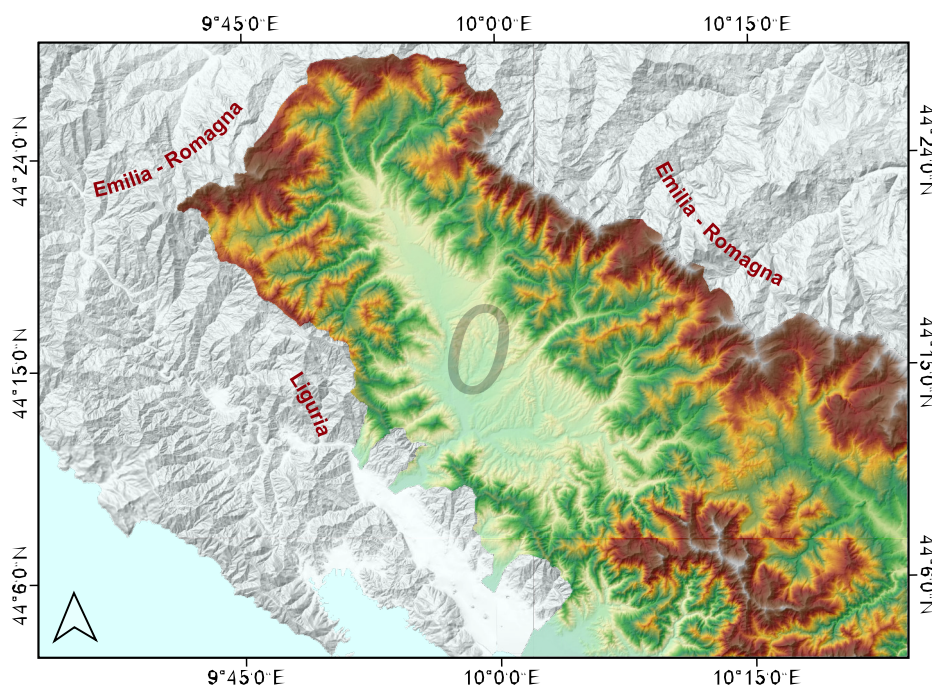


Finanziato
dall'Unione europea
NextGenerationEU

REDAZIONE DI TRE STUDI DI FATTIBILITÀ (ACQUA POTABILE, SICCIÀ, ALLUVIONI) E REALIZZAZIONE DI PROGRAMMI DI FORMAZIONE PER UNA NUOVA E CONSAPEVOLE GESTIONE DELLA RISORSA ACQUA

Stefano Orlandini, Giovanni Moretti, Marco Redolfi, Simone Pizzileo, Riccardo Gasperoni, Rachit Soni

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari



Agosto 2024

Stefano Orlandini, Professore Ordinario di Costruzioni Idrauliche
Giovanni Moretti, Professore Associato di Costruzioni Idrauliche
Marco Redolfi, Professore Associato di Idraulica
Simone Pizzileo, Dottorando di Ricerca
Riccardo Gasperoni, Dottorando di Ricerca
Rachit Soni, Dottorando di Ricerca

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari
Via Pietro Vivarelli 10, 41125 Modena
<http://www.idrologia.unimore.it>

In copertina è riportato il DTM (Digital Terrain Model) dell'intera area della Lunigiana, con risoluzione $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, utilizzato per la redazione degli studi di fattibilità.

Premessa

La presente relazione illustra i risultati dell'attività di ricerca condotta dal Gruppo di Idrologia e Morfodinamica Fluviale del Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari dell'Università di Modena e Reggio Emilia nell'ambito del contratto di ricerca stipulato con l'Unione di Comuni Montana Lunigiana.

Lo studio approfondisce la gestione delle risorse idriche nel territorio della Lunigiana, regione situata in Toscana, nella provincia di Massa-Carrara. La zona è caratterizzata da un contesto geografico e climatico unico tale da incidere profondamente sull'approvvigionamento idrico e sulla gestione della risorsa acqua. Tre studi di fattibilità trattanti i temi di acqua potabile, siccità e alluvioni per il territorio della Lunigiana sono stati condotti. I temi delle analisi proposte riguardano:

1. ACQUA POTABILE: studio della rete acquedottistica esistente, identificazione delle fonti di approvvigionamento idrico e gestione dei sistemi di trasporto;
2. SICCATÀ: analisi territoriale ed idrologica per il dimensionamento di un invaso artificiale e stima dei benefici economico-sociali;
3. ALLUVIONI: modelli idrologici per la valutazione della sicurezza idraulica del territorio della Lunigiana.

La collocazione geografica dell'area oggetto di studio è illustrata in Figura 0.1.

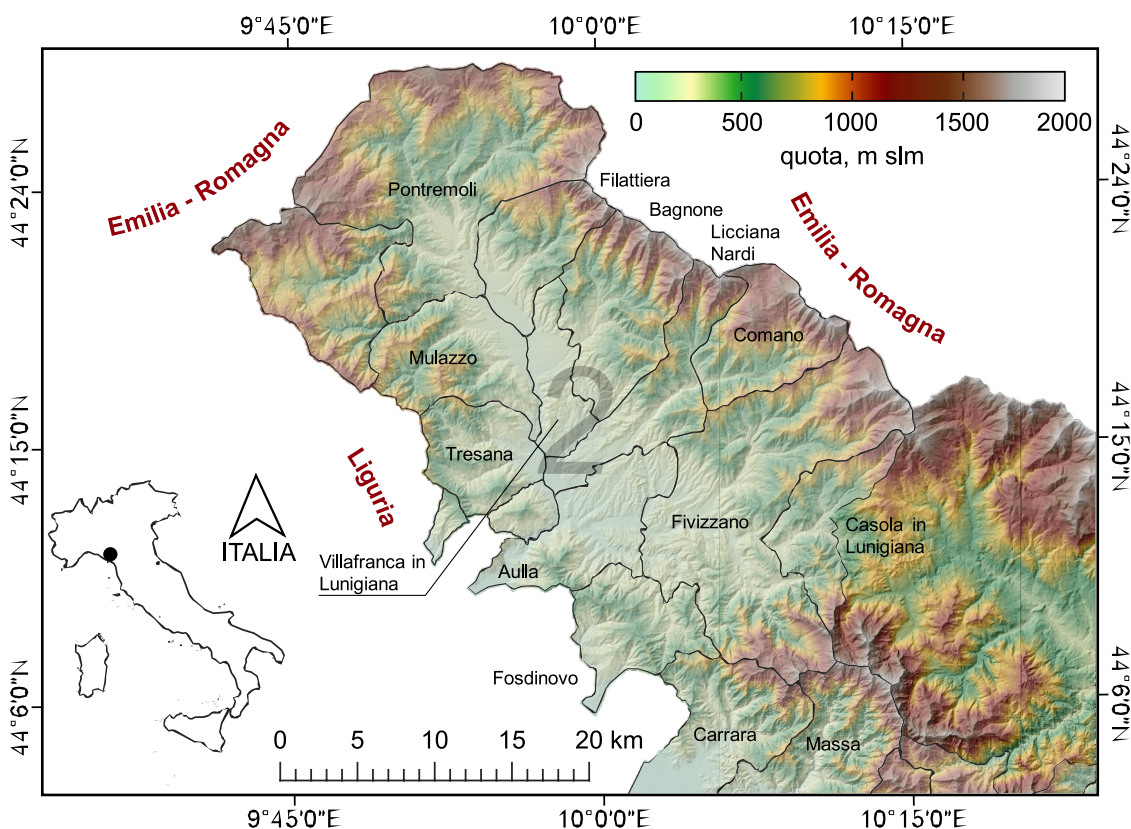


Figura 0.1. Collocazione geografica e limiti amministrativi dei comuni ubicati nella zona della Lunigiana, provincia di Massa-Carrara, Toscana, Italia. Rappresentazione del modello digitale del terreno (DTM) con risoluzione $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, utilizzato per le modellazioni idrologiche e idrauliche in questo studio.

Il lavoro si suddivide in tre parti. Nella Parte I, vengono esaminate le fonti di acqua potabile disponibili nella regione, comprese le infrastrutture esistenti per la raccolta e la distribuzione dell'acqua. Viene analizzata la problematica della stagionalità, che vede la concentrazione delle precipitazioni principalmente nei periodi autunnali, invernali e primaverili, e delle variazioni topografiche, che influenzano la gestione delle risorse idriche.

L'obiettivo primario è potenziare la disponibilità idrica per la Green Community della Lunigiana, aumentando la portata dell'acquedotto di circa 100 litri al secondo. Questo verrà raggiunto attraverso tre strategie principali: la conservazione delle acque di piena per sostenere le riserve idriche montane e sotterranee, l'implementazione di sistemi di trasporto idrico per gravità, che riducono i costi energetici e, ove possibile, generano energia elettrica, e l'assicurazione di una dotazione idrica sufficiente per abitazioni e insediamenti produttivi, mantenendo le pressioni idriche adeguate per limitare le perdite.

Nella Parte II, lo studio si divide in due sezioni: la prima riguarda l'identificazione di un sito idoneo per la costruzione di un serbatoio artificiale, una soluzione pensata per fronteggiare la problematica della siccità; la seconda utilizza modelli di bilancio idrologico per stimare i benefici che tale invaso potrebbe apportare alla comunità e all'ecosistema della Lunigiana.

La Parte III si focalizza sulla valutazione idrologica e idraulica del territorio, con particolare attenzione al bacino del Fiume Magra e ai suoi principali affluenti. Viene sviluppato un modello afflussi-deflussi per caratterizzare la risposta idrologica del territorio alle precipitazioni e un modello idraulico bidimensionale (HEC-RAS 2D) per studiare la propagazione delle portate nell'area valliva, calibrati attraverso dati reali. Questi strumenti permettono di valutare le condizioni di rischio idraulico, di simulare scenari di piena per eventi rari e di supportare le decisioni in situazioni di emergenza.

In sintesi, questo studio fornisce una panoramica completa delle dinamiche idriche nella Lunigiana, proponendo soluzioni per la gestione sostenibile delle risorse idriche e per la mitigazione dei rischi idraulici, a beneficio delle comunità locali e dell'ambiente.

Indice

1	Acqua Potabile	3
1.1	Introduzione	3
1.2	Analisi dei dati	5
1.3	Simulazioni idrauliche	9
1.3.1	Stato attuale della rete acquedottistica	10
1.3.2	Intervento di connessione tra reti indipendenti	13
1.3.3	Costruzione di un vaso ad uso plurimo	16
1.4	Analisi dei risultati	22
2	Siccità	26
2.1	Introduzione	26
2.2	Analisi territoriale	26
2.2.1	Serbatoio Fiume Magra	30
2.2.2	Serbatoio Fiume Mangiola	32
2.2.3	Serbatoio Torrente Taverone	34
2.2.4	Serbatoio Torrente Pescicola	36
2.2.5	Serbatoio Torrente Bardinello	38
2.3	Analisi idrologica	40
2.3.1	Analisi dei dati	40
2.3.2	Bacino idrologico di Mignegno	44
3	Alluvioni	51
3.1	Introduzione	51
3.2	Modellazione afflussi-deflussi	53
3.2.1	Analisi dei dati	54
3.2.2	Precipitazione efficace	68
3.2.3	Idrogrammi di piena	71
3.3	Modellazione idraulica	78
3.3.1	Geometria	78
3.3.2	Evento di piena Dicembre 2017	81
3.3.3	Risultati	81
3.4	Valutazione della sicurezza	83
3.5	Conclusioni	90
4	Programmi di Formazione	93
4.1	Summer School in Lunigiana	93
4.2	Temi Rilevanti	95
4.3	Visite sul Campo	97
4.4	Primi Riconoscimenti	99
5	Riferimenti Bibliografici	101

Parte I
Acqua Potabile

1 Acqua Potabile

1.1 Introduzione

L'acqua potabile è una risorsa essenziale per la sopravvivenza umana e per lo sviluppo socioeconomico. Essa deve essere priva di contaminanti microbiologici, chimici e fisici per essere sicura per il consumo umano (WHO, 2017). L'approvvigionamento idrico, che comprende la raccolta, il trattamento, il trasporto e la distribuzione dell'acqua, rappresenta una componente critica delle infrastrutture di ogni società (UN WWAP, 2015).

L'approvvigionamento idrico varia significativamente tra le regioni montane e quelle di pianura, principalmente a causa delle differenze topografiche, climatiche e idrogeologiche. In ambito montano, le fonti idriche primarie spesso includono sorgenti e corsi d'acqua di montagna alimentati da nevai e ghiacciai (Barnett et al., 2005). Queste risorse tendono ad avere un'acqua di buona qualità grazie alla minore contaminazione antropica. Tuttavia, l'accessibilità e la distribuzione possono essere sfidanti a causa del terreno accidentato. In contrasto, nelle aree di pianura, l'approvvigionamento idrico si basa maggiormente su fiumi, laghi e falde acquifere. La qualità dell'acqua può essere compromessa da un'alta densità di popolazione e attività agricole e industriali che contribuiscono all'inquinamento (Fekete et al., 2002). Le pianure, però, offrono il vantaggio di una distribuzione più facile e infrastrutture di trasporto dell'acqua più efficienti. La stagionalità gioca un ruolo cruciale nell'approvvigionamento idrico. Durante le stagioni piovose, la disponibilità di acqua tende ad aumentare, con abbondanti riserve nei serbatoi e falde acquifere ricaricate. Al contrario, nelle stagioni secche, la scarsità di piogge può portare a una diminuzione delle risorse idriche disponibili, causando stress idrico (Gleick, 1996). Le aree montane possono sperimentare variazioni stagionali più estreme, con abbondanza di acqua durante la primavera e l'estate grazie allo scioglimento delle nevi, mentre le regioni di pianura potrebbero essere più influenzate dalle variazioni delle precipitazioni stagionali.

La Parte I dello studio tratterà la risorsa idropotabile nell'ambito del territorio della Lunigiana, situato in Toscana nella provincia di Massa-Carrara (Figure 0, 1.1 e 1.2). La Lunigiana è una regione con caratteristiche geografiche e climatiche uniche che influenzano significativamente l'approvvigionamento idrico. Analizzeremo le specifiche fonti di acqua potabile, le infrastrutture esistenti per la raccolta e la distribuzione, nonché le sfide legate alla stagionalità e alle variazioni topografiche. Questo studio offrirà una panoramica completa delle dinamiche idriche locali, fornendo dati e strategie per una gestione sostenibile delle risorse idriche in questa regione montuosa e storicamente ricca.

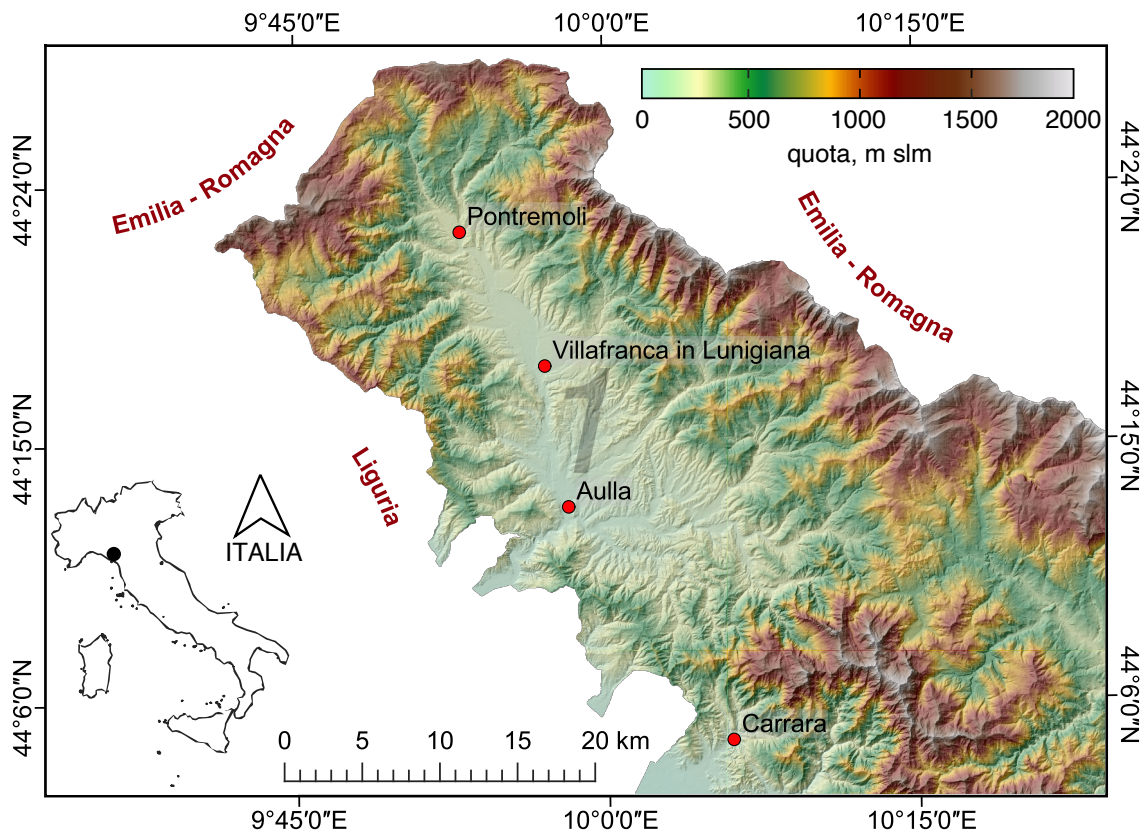


Figura 1.1. Modello digitale del terreno a risoluzione 10 m utilizzato per lo studio di fattibilità e localizzazione di alcuni dei centri urbani nel territorio della Lunigiana.

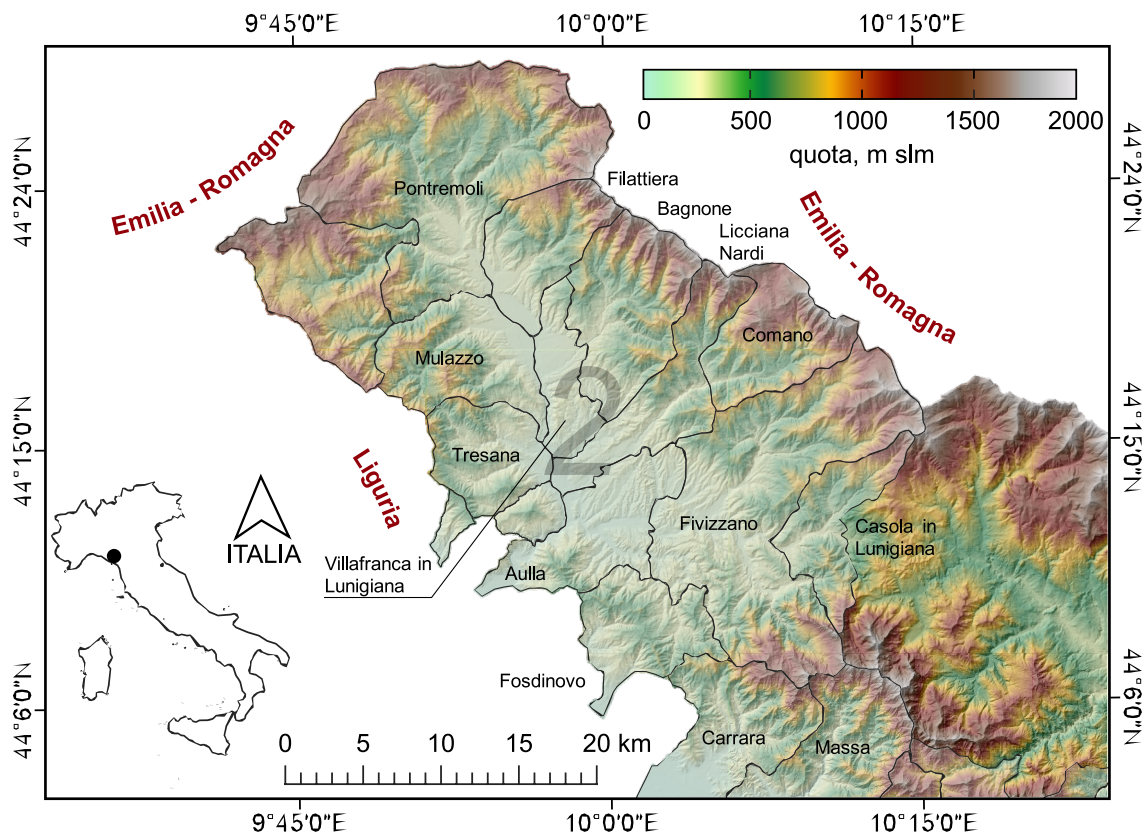


Figura 1.2. Identificazione dei confini amministrativi dei comuni nel territorio della Lunigiana.

Lo scopo dello studio è:

- identificare fonti di approvvigionamento idrico superficiali immagazzinando le acque di piena abbondanti nei periodi autunnali, invernali e primaverili a vantaggio della conservazione delle sorgenti idriche montane e delle riserve idriche sotterranee;
- garantire sistemi di trasporto – o adduzione – per gravità evitando spese di sollevamento meccanico e favorendo – se possibile – la produzione di energia elettrica;
- garantire la dotazione idrica delle abitazioni e degli insediamenti produttivi con pressioni ovunque sufficienti, ma non eccessive anche al fine di limitare le perdite idriche.

Alla luce di questi tre obiettivi generali si è cercato di potenziare la disponibilità idrica per la Green Community della Lunigiana aumentando le emissioni del sistema acquedottistico di circa 100 litri al secondo.

Nei paragrafi seguenti sono quindi illustrate: le analisi dei dati della rete di approvvigionamento idrico forniti dalla società GAIA S.p.A che gestisce il Servizio Idrico Integrato nel territorio che comprende parte dei comuni della Provincia di Lucca (Garfagnana, Media Valle del Serchio, Versilia), tre comuni della Val di Lima in Provincia di Pistoia e i comuni della Provincia di Massa-Carrara (tranne Zeri), le simulazioni idrauliche effettuate per tre scenari (stato attuale della rete acquedottistica, intervento di connessione tra reti indipendenti, costruzione di un invaso ad uso plurimo) e l'analisi dei risultati.

1.2 Analisi dei dati

Analizzando il territorio (Figure 0, 1.1 e 1.2), si nota come l'area in esame presenti una notevole variabilità altimetrica, con altitudini che variano dai circa 1500 m delle zone più elevate fino a quote inferiori ai 100 m nella valle. Questa conformazione morfologica offre alcuni vantaggi significativi. In particolare, la presenza di sorgenti nella zona alpina consente l'installazione di opere di presa, utilizzate per l'approvvigionamento idrico. Inoltre, la discesa naturale dell'acqua dalle aree montane a quelle di valle sfrutta la gravità, eliminando la necessità di pompe, e semplificando così la rete di adduzione. La rete di adduzione è la componente del sistema acquedottistico che trasporta l'acqua dalle opere di presa ai punti di utilizzo. Tuttavia, la complessità orografica della zona montana può rappresentare una sfida nella costruzione delle infrastrutture idriche.

La rete idrica esistente in Lunigiana è gestita da GAIA S.p.A., società a capitale pubblico responsabile del Servizio Idrico Integrato. Questo servizio comprende la captazione, adduzione e distribuzione dell'acqua, nonché la gestione delle acque reflue, la loro depurazione e lo smaltimento dei fanghi residui.

Gli studi condotti in questa ricerca sono stati eseguiti utilizzando due software: QGIS ed EPANET. QGIS consente di integrare dati provenienti da diverse fonti in un unico file per l'analisi territoriale. EPANET è un software che simula il comportamento idraulico e la qualità dell'acqua all'interno di reti di condotte in pressione, sia in condizioni stazionarie che per periodi prolungati. Questo strumento semplifica la rappresentazione della rete acquedottistica attraverso elementi nodo, quali nodi (nodes), pompe (pumps), valvole (valves) e serbatoi di stoccaggio (tanks o reservoirs) aventi il compito di connettere gli elementi arco come le tubazioni (pipes). EPANET è in grado di valutare

diversi parametri, tra i quali la portata liquida, le perdite di carico e le velocità nelle tubazioni e la pressione in ciascun nodo.

La conversione del dato grezzo fornito da GAIA S.p.A., fornito in formato shapefile, in un formato compatibile con EPANET, ha rappresentato un passaggio fondamentale. Gli shapefile sono un formato di dati geospaziali utilizzato principalmente nei Sistemi Informativi Geografici (GIS) per rappresentare e memorizzare la posizione, la forma e gli attributi degli oggetti geografici. Dalla tabella attributi della rete sono state estratte le informazioni essenziali come il diametro e la lunghezza delle tubazioni. Successivamente, grazie all'utilizzo del codice Python SHP2INP sviluppato da Hydrology and Fluvial Morphodynamics Research Lab – UNIMORE, il dato grezzo è stato processato e convertito in un formato leggibile dal software EPANET (Figura 1.3).

Lo schema della rete implementata in EPANET è basato sulla interconnessione tra gli elementi nodo e gli elementi arco. Per studiare il comportamento dell'acqua all'interno della rete, è necessario fornire le seguenti informazioni:

- diametro, lunghezza e scabrezza delle tubazioni;
- quota delle giunzioni;
- quantità di acqua richiesta da un nodo specifico in un sistema di distribuzione idrica durante un periodo di tempo standard (Base demand);
- schema di emungimento della rete in funzione dei consumi stimati o calcolati (Time pattern).

Le giunzioni sono elementi ideali che rappresentano i punti di connessione tra le tubazioni, dove l'acqua può essere prelevata o aggiunta al sistema.

Le opere di presa sono state schematizzate in EPANET attraverso serbatoi (reservoirs), assegnando a ciascuno la rispettiva quota e portata, e collegandoli alla rete esistente. I reservoirs rappresentano una fonte d'acqua con un livello di superficie libera costante. Le opere di presa nel caso oggetto di studio includono sorgenti e pozzi, per i quali, grazie ai dati forniti da GAIA S.p.A. (Figura 1.5), sono note le coordinate, l'altitudine e la portata disponibile.

Per realizzare una simulazione realistica, le giunzioni sono state suddivise in funzione della loro collocazione, urbana o rurale, e associate al time pattern di riferimento. Il pattern urbano corrisponde ad aggregati di case urbane, prevalentemente situati nelle aree di valle tra Aulla, Pontremoli e Villafranca in Lunigiana. Le restanti giunzioni, con una domanda idrica inferiore, sono state associate al pattern rurale. Un pattern è composto da una serie di fattori temporali (multiplier) applicati alla domanda di base per modellare le variazioni nel tempo. Questi pattern permettono di rappresentare la variazione temporale della domanda idrica durante il giorno, tramite una sequenza di moltiplicatori che influenzano la domanda di base (base demand). Come da letteratura (Becciu e Paoletti, 2010), in fase di progettazione si assegna una domanda idrica più bassa nelle ore notturne, raggiungendo il picco durante le ore diurne.

È stato ipotizzato un pattern con una dotazione idrica media giornaliera di 300 litri al secondo. Di quest'ultimi, 200 litri al secondo sono garantiti dalle opere di presa esistenti e 100 litri al secondo costituiscono il surplus idrico considerato nel presente studio (Figura 1.6).

A ciascuna giunzione è stata quindi assegnata una domanda idrica di base (base demand). Non disponendo dei dati di densità della popolazione per il territorio della Lunigiana, necessari per stimare il numero di utenze servite e la richiesta idrica da associare, si è

deciso di assegnare un'area di pertinenza per ogni nodo. Ogni area di pertinenza normalizzata rappresenta la percentuale della richiesta idrica totale da garantire al sistema. La procedura descritta è resa possibile attraverso la costruzione dei poligoni di Voronoi (Figura 1.4).

La descrizione della domanda idrica ottenuta permette, dunque, di partizionare il territorio in aree di pertinenza: più la popolazione è densa, più nodi sono presenti, più piccola è l'area di pertinenza del nodo. Ne scaturisce un'evidente disparità nella distribuzione della popolazione tra la zona valliva e la zona di montagna. In considerazione della differente domanda idrica, è stato ipotizzato un emungimento del 90% nelle zone vallive ed un emungimento del 10% nelle zone montane rispetto alla domanda idrica totale.

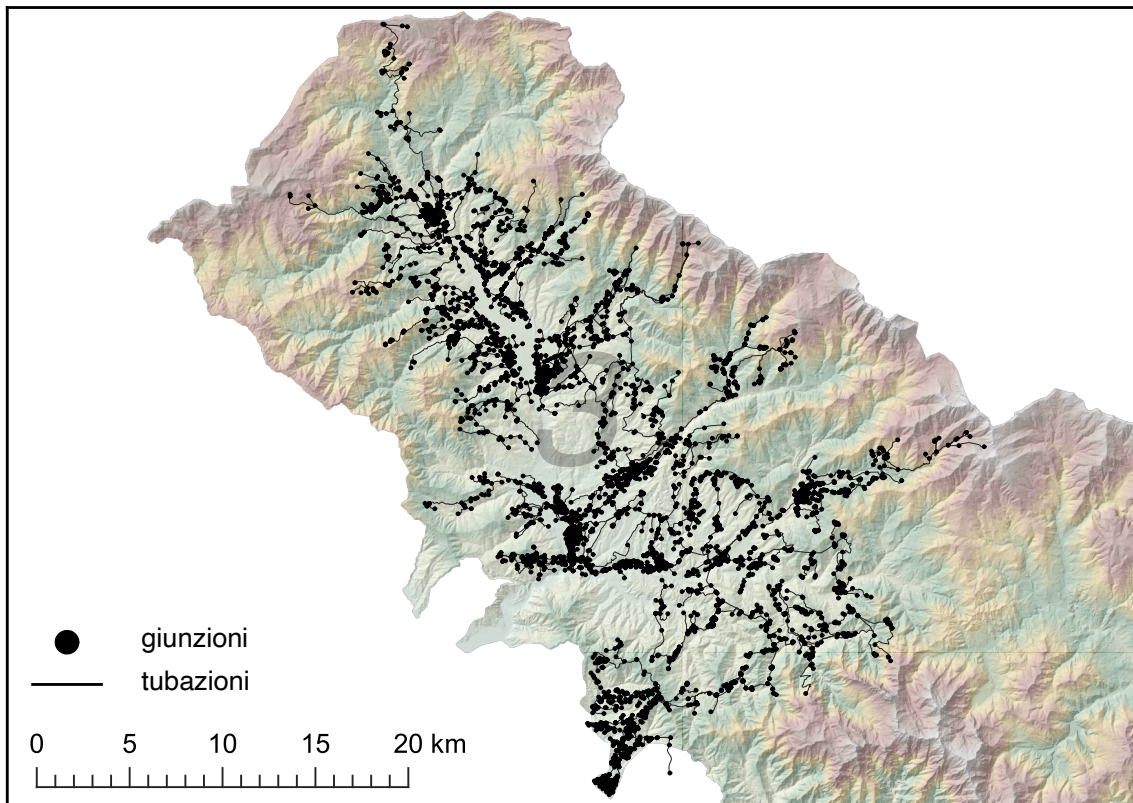


Figura 1.3. Schematizzazione della rete di distribuzione delle acque in Lunigiana.

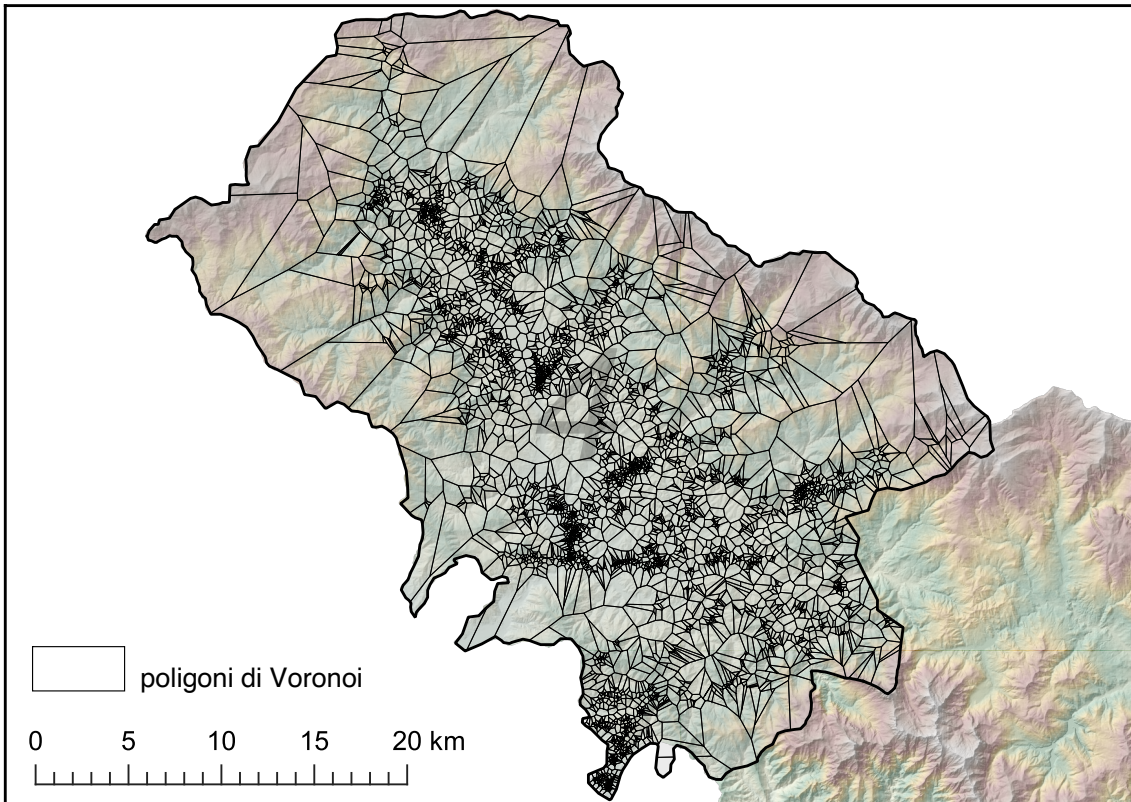


Figura 1.4. Costruzione dei poligoni di Voronoi per l'identificazione delle aree di pertinenza.

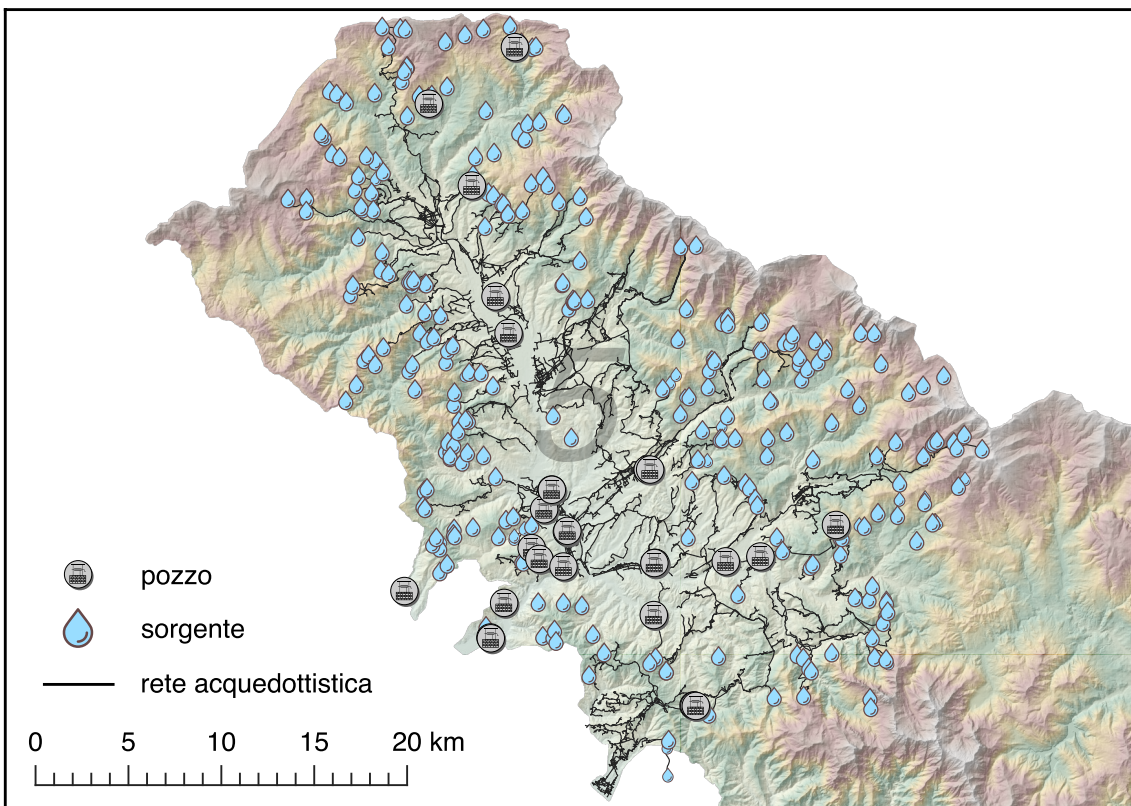


Figura 1.5. Rete di approvvigionamento idrico e identificazione delle opere di presa.

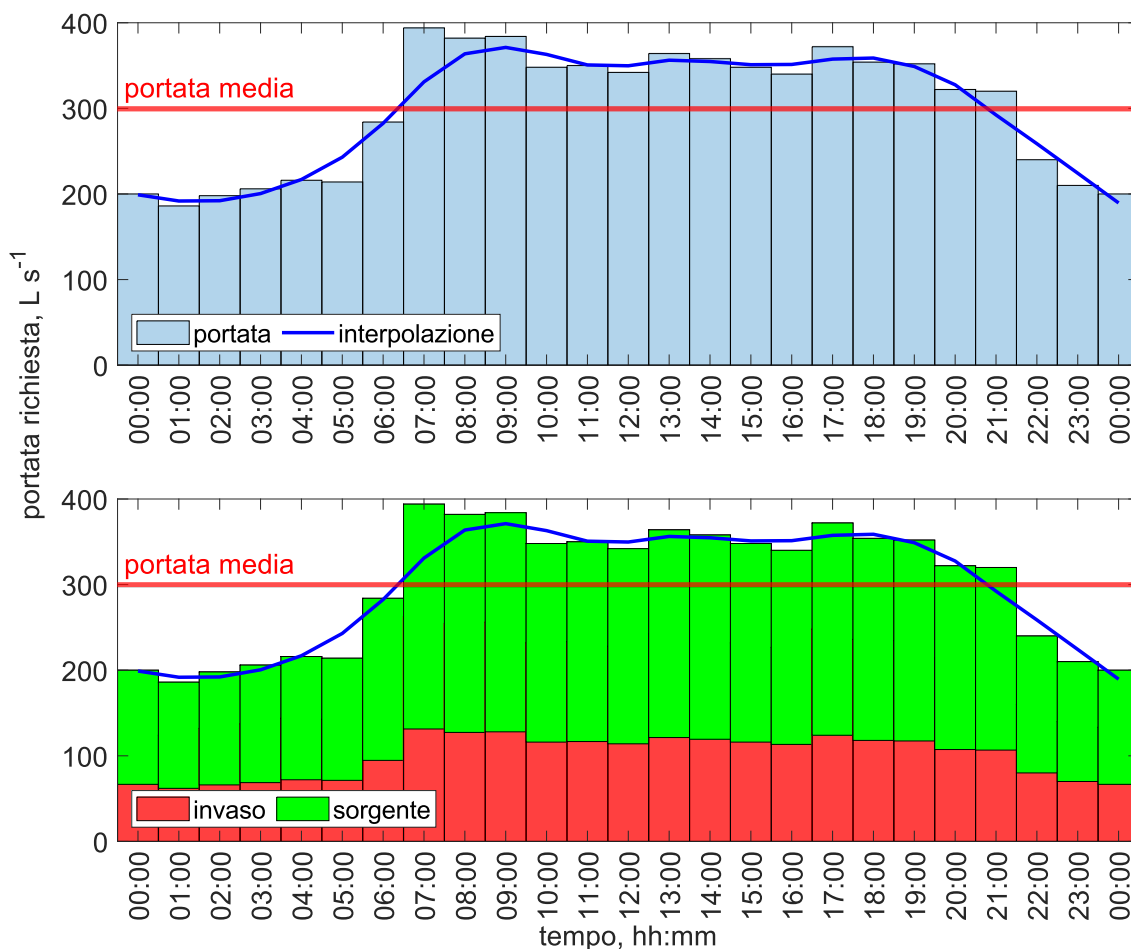


Figura 1.6. Schema di distribuzione giornaliera delle portate totale (sopra) e suddivisa tra sorgente e invaso artificiale (sotto).

1.3 Simulazioni idrauliche

Le analisi idrauliche sono state condotte con EPANET. Come anticipato nei paragrafi precedenti, EPANET è un software di simulazione idraulica utilizzato per l'analisi e la gestione delle reti di distribuzione dell'acqua potabile. Sviluppato dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente degli Stati Uniti (EPA), EPANET consente di modellare il comportamento idraulico e la qualità dell'acqua all'interno di una rete, simulando il flusso, la pressione e la concentrazione di sostanze chimiche lungo i tubi, i serbatoi e le valvole. Questo strumento è fondamentale per progettare nuovi sistemi idrici, ottimizzare le operazioni di reti esistenti e pianificare interventi di manutenzione. Le sue capacità di simulazione permettono di analizzare scenari di domanda variabile, condizioni di emergenza e impatti di eventuali contaminazioni, contribuendo in modo significativo alla gestione sostenibile delle risorse idriche. Nei paragrafi successivi sono descritte nel dettaglio le simulazioni idrauliche condotte per la rete acquedottistica nel territorio della Lunigiana. Oltre allo studio dello stato attuale della rete acquedottistica, in questa sezione è proposto lo studio di un intervento di connessione tra le reti indipendenti e di un intervento di connessione con un invaso artificiale ad uso plurimo, il cui sbarramento è stato previsto in località Mignegno (MS), a nord del comune di Pontremoli (MS). Per ogni scenario studiato sono proposti gli andamenti delle pressioni medie giornaliere nei nodi di connessione e delle portate medie giornaliere, delle perdite di carico unitarie medie giornaliere e delle velocità medie giornaliere nelle tubazioni.

1.3.1 Stato attuale della rete acquedottistica

Una prima simulazione è stata prevista per studiare lo stato attuale della rete acquedottistica oggetto di questo studio (Figura 1.7).

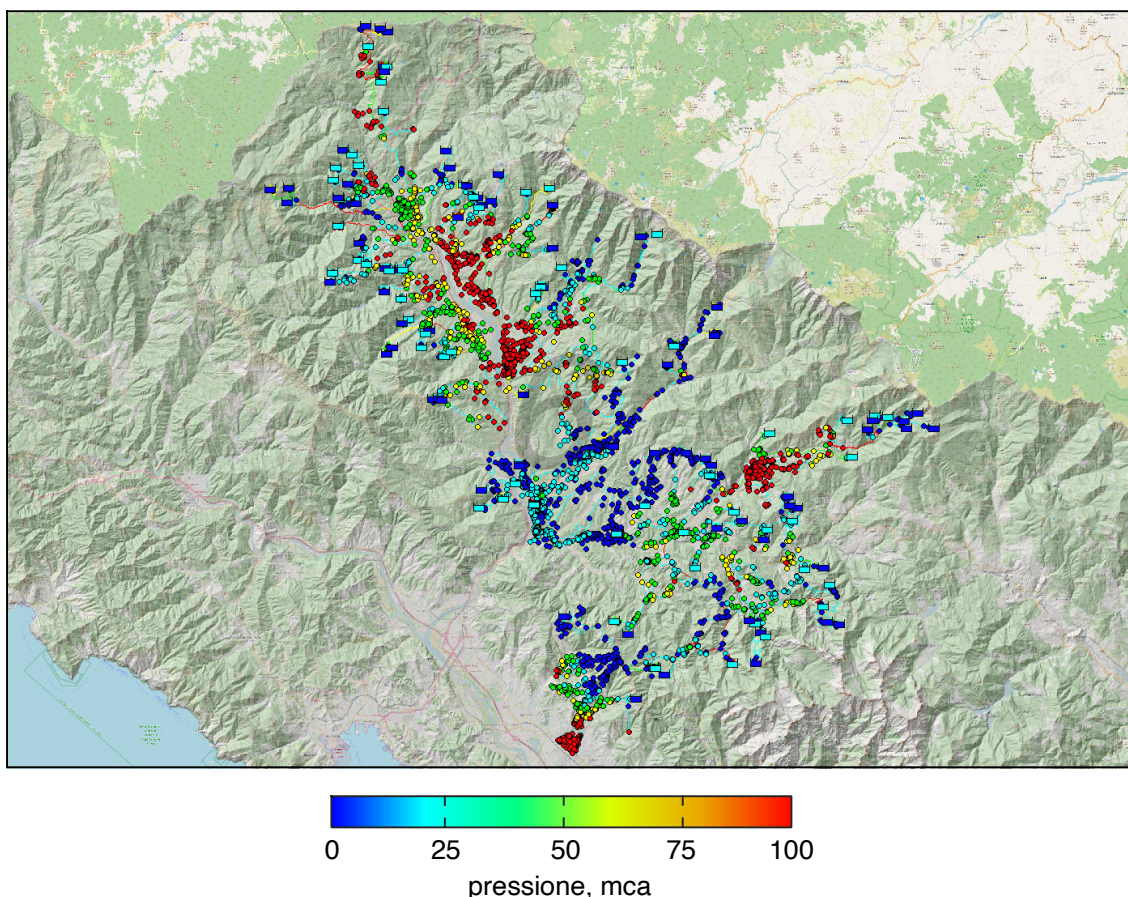


Figura 1.7. Andamento delle pressioni medie giornaliere nei nodi di connessione delle tubazioni per lo stato attuale della rete acquedottistica.

La rete acquedottistica mostra un andamento delle pressioni pressoché equilibrato. Le opere di captazione, collocate nella parte montana (Figura 1.5) garantiscono l'approvvigionamento idrico a tutto il sistema. Le pressioni presentano grande variabilità tra zone vallive (pressioni alte) e zone montane (pressioni basse). Questo effetto è diretta conseguenza dell'assenza – nel modello presentato – di dispositivi di regolazione dei flussi idrici (valves), dell'orografia del territorio e della distribuzione poco uniforme della popolazione. Sebbene in fase di modellazione sia stata ipotizzata una distribuzione della popolazione realistica rispetto alla densità abitativa della Lunigiana (90% delle utenze in zone vallive e 10% delle utenze in zone montane), questa è, comunque, parzialmente affetta dalla necessaria approssimazione conseguente all'utilizzo dei poligoni di Voronoi. Ogni area di pertinenza presuppone una distribuzione uniforme della domanda idrica. In considerazione del principio di generazione dei poligoni di Voronoi, in zona montana le aree di pertinenza sono notevolmente più estese delle aree di pertinenza della zona valliva.

Questo effetto influenza parzialmente la distribuzione della popolazione (nella realtà non uniforme) e, di conseguenza, i risultati delle simulazioni. Per ovviare a questa approssimazione sarebbe opportuno considerare la reale domanda idrica relativa ad ogni singola utenza.

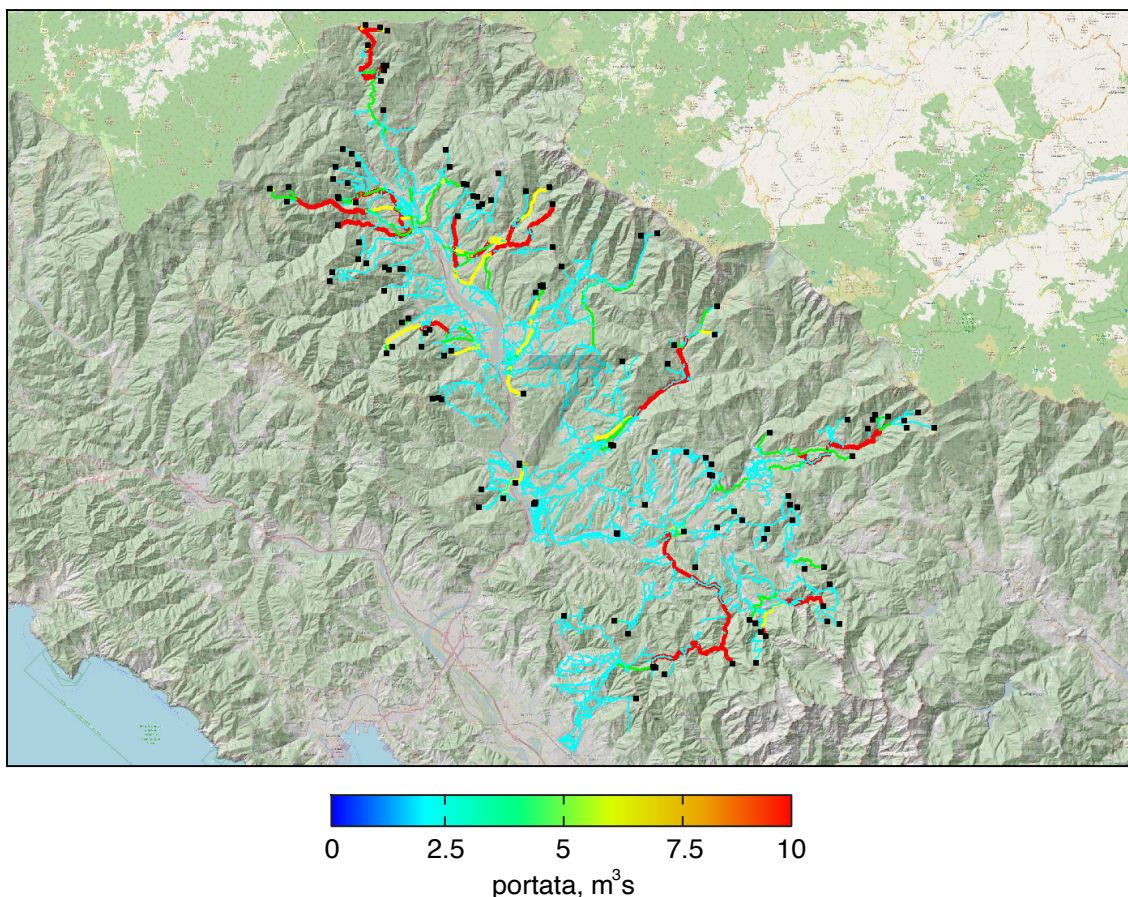


Figura 1.8. Andamento delle portate medie giornaliere nelle tubazioni per lo stato attuale della rete acquedottistica.

L'andamento delle portate medie giornaliere nelle tubazioni è riportato in Figura 1.8. Le portate medie si attestano in zona valliva intorno ai $2,5 \text{ m}^3 \text{ s}$ e in zona montana tendono a valori dell'ordine dei $10 \text{ m}^3 \text{ s}$, confermando – di fatto – la forte influenza dell'orografia del territorio.

Le perdite di carico – il cui andamento è rappresentato in Figura 1.9 – sono un concetto fondamentale nell'idraulica e si riferiscono alla perdita di energia o pressione che un fluido subisce durante il flusso attraverso la tubazione. Queste perdite sono causate da vari fattori, tra cui l'attrito tra il fluido e le pareti della tubazione, i cambiamenti di direzione, le variazioni di sezione e la presenza di componenti come valvole, gomiti e raccordi. Nella rete in esame, la maggior parte delle tubazioni presenta perdite di carico trascurabili, mentre in alcune tratte, nel passaggio dalla zona montana a quella valliva, si riscontra una perdita di carico unitaria compresa tra i 15 m/km e i 50 m/km .

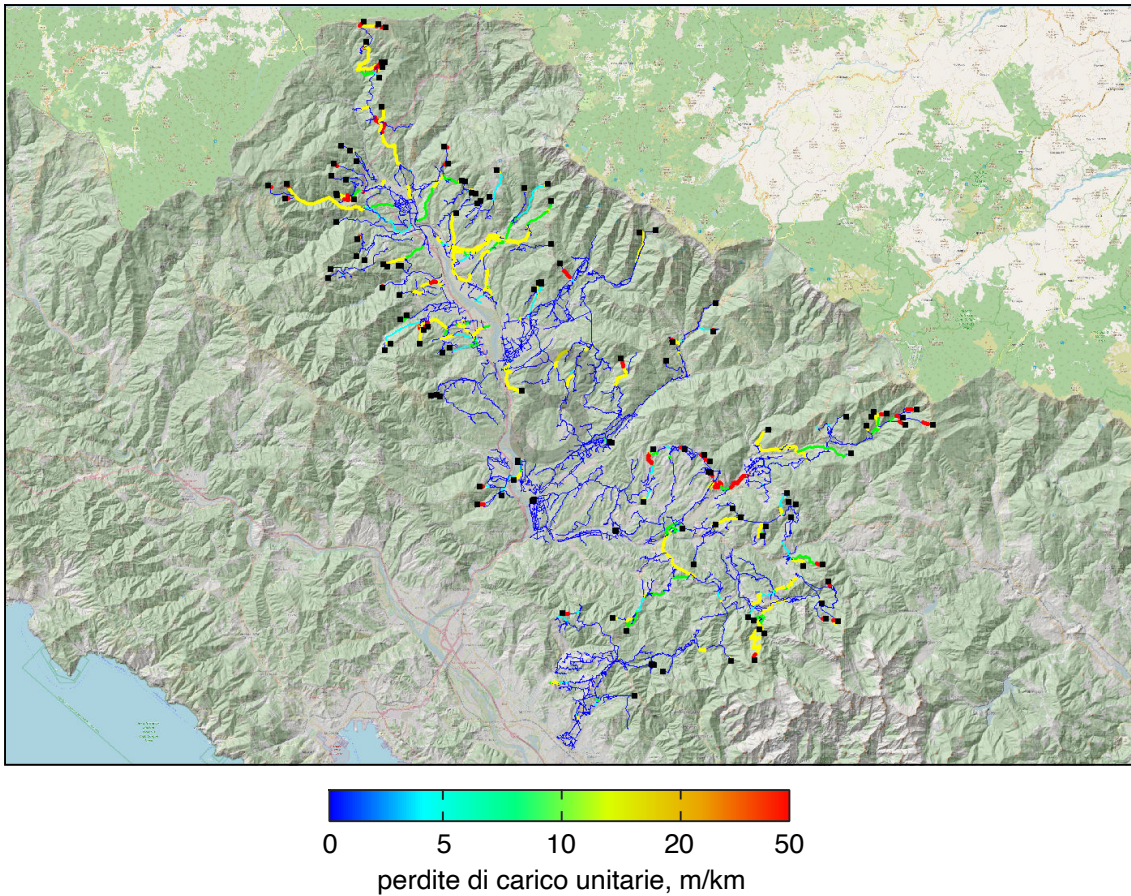


Figura 1.9. Andamento delle perdite di carico unitarie medie giornaliere per lo stato attuale della rete acquedottistica.

La velocità del fluido in tubazione (Figura 1.10) è direttamente correlata alle perdite di carico. Velocità più elevate comportano maggiori perdite di carico dovute all'attrito, il che può ridurre la pressione disponibile a valle e aumentare i costi energetici per il pompaggio. Le velocità medie giornaliere nelle tubazioni, riscontrate nella simulazione qui presentata, si attestano intorno a valori compresi tra 0.7 m/s e 1.5 m/s per quasi tutta la rete, valori che rientrano negli standard previsti dalle normative.

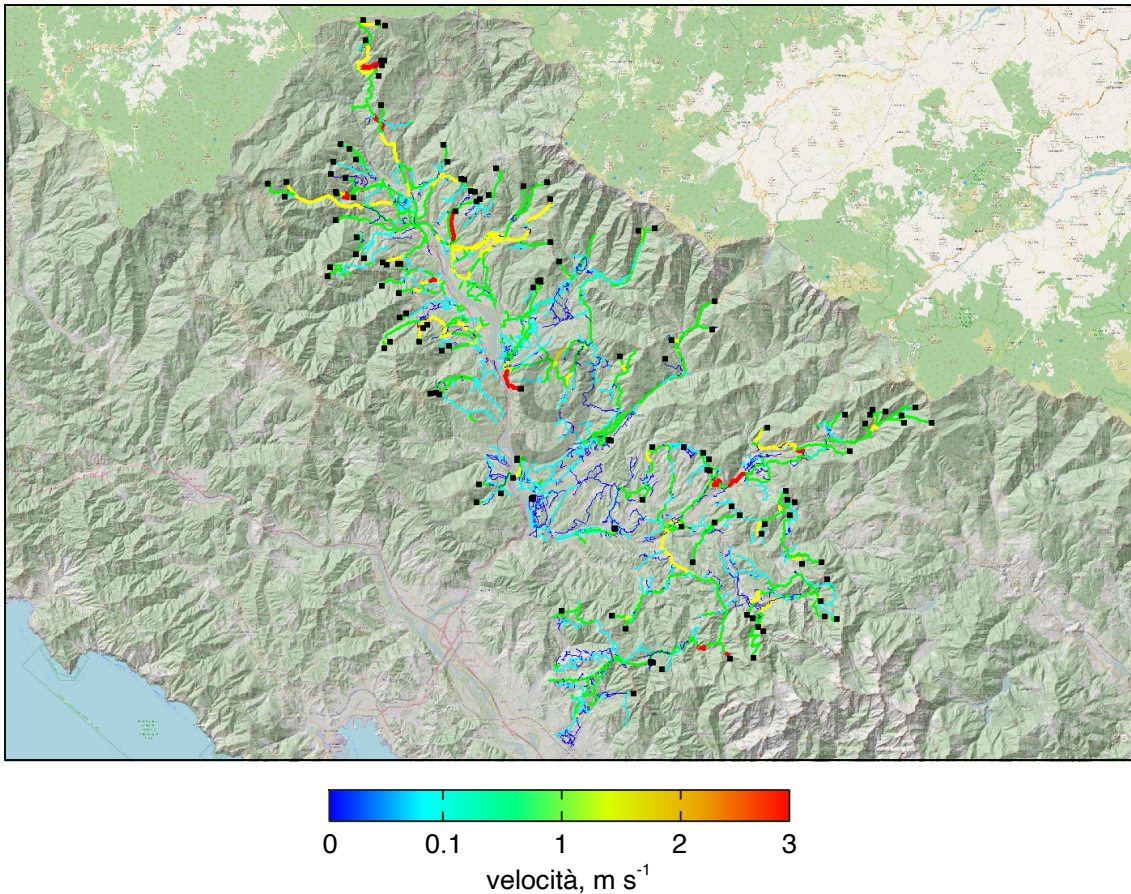


Figura 1.10. Andamento delle velocità medie giornaliere per lo stato attuale della rete acquedottistica.

1.3.2 Intervento di connessione tra reti indipendenti

La rete acquedottistica in esame garantisce l'approvvigionamento idrico a tutti i comuni serviti sia in zona montana che in zona valliva. La configurazione attuale prevede due macro-reti indipendenti. La prima a servizio dei comuni di Pontremoli (MS), Filattiera (MS) e Mulazzo (MS), la seconda a servizio dei restanti comuni. In un'ottica di efficientamento della rete inerente alla regolarizzazione delle pressioni e delle portate nelle tubazioni, in questo paragrafo è stato proposto un intervento di connessione tra queste reti.

Nello specifico le due reti indipendenti sono state connesse in due punti. Il primo punto di connessione è stato previsto tra i comuni di Filattiera (MS) e di Villafranca in Lunigiana (MS) sul versante in sinistra idraulica rispetto al Fiume Magra. L'intervento si è basato sulla connessione mediante tubazione di lunghezza 4315 m e diametro 200 mm. I punti di connessione sono l'incrocio stradale Via Chioschi – Via Nazionale, Strada Statale 62 nel comune di Filattiera (MS) e l'incrocio stradale Via dei Menhir – Via Nazionale, Strada Statale 62 nel comune di Villafranca in Lunigiana (MS). Il secondo punto di connessione è stato previsto tra i comuni di Villafranca in Lunigiana e la località Terrarossa, comune di Licciana Nardi (MS), sul versante in sinistra idraulica rispetto al Fiume Magra. L'intervento si è basato sulla connessione mediante tubazione di lunghezza 5112 m e diametro 200 mm. I punti di connessione sono l'incrocio stradale Strada Cervarola – Via Nazionale, Strada Statale 62 nel comune di Villafranca in Lunigiana (MS) e l'incrocio stradale Via La Cocca – Via Nazionale, Strada Statale 62 in località

Terrarossa, comune di Licciana Nardi (MS). L'andamento delle pressioni nei nodi, delle portate, delle perdite di carico e delle velocità nelle tubazioni è descritto di seguito per l'intervento in oggetto.

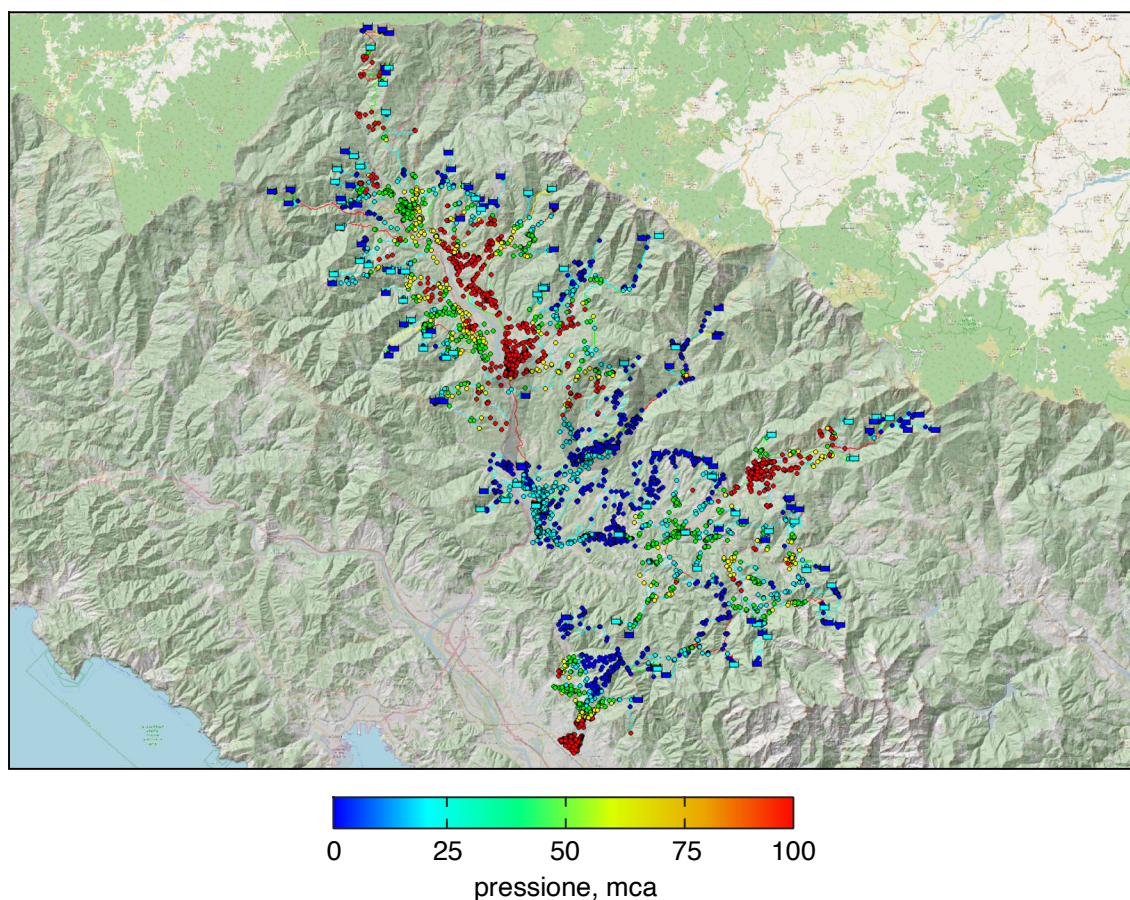


Figura 1.11. Andamento delle pressioni medie giornaliere nei nodi di connessione delle tubazioni per l'intervento di connessione tra le reti indipendenti.

L'intervento proposto non presenta notevoli miglioramenti in termini di pressione nelle giunzioni tra le condotte (Figura 1.11). Questa configurazione è vantaggiosa in termini di una distribuzione dei flussi e, dunque, delle portate e delle velocità migliore tra la rete a servizio dei comuni di Pontremoli (MS), Filattiera (MS) e Mulazzo (MS) e la rete a servizio dei restanti comuni del territorio Lunigianese. La soluzione proposta, infatti, consente un leggero abbassamento delle pressioni nella zona di Pontremoli (MS). Le basse pressioni riportate nei nodi nella zona di Aulla (MS) rimangono invariate.

Come riportato in Figura 1.12, invece, l'intervento in esame consente un incremento delle portate medie giornaliere specialmente in zona valliva. I valori di portata media giornaliera nelle condotte aggiunte in seguito all'intervento di connessione tra reti indipendenti qui proposto superano i $5 \text{ m}^3/\text{s}$ assicurando, in questo modo, una migliore distribuzione della risorsa idrica in tutto il sistema.

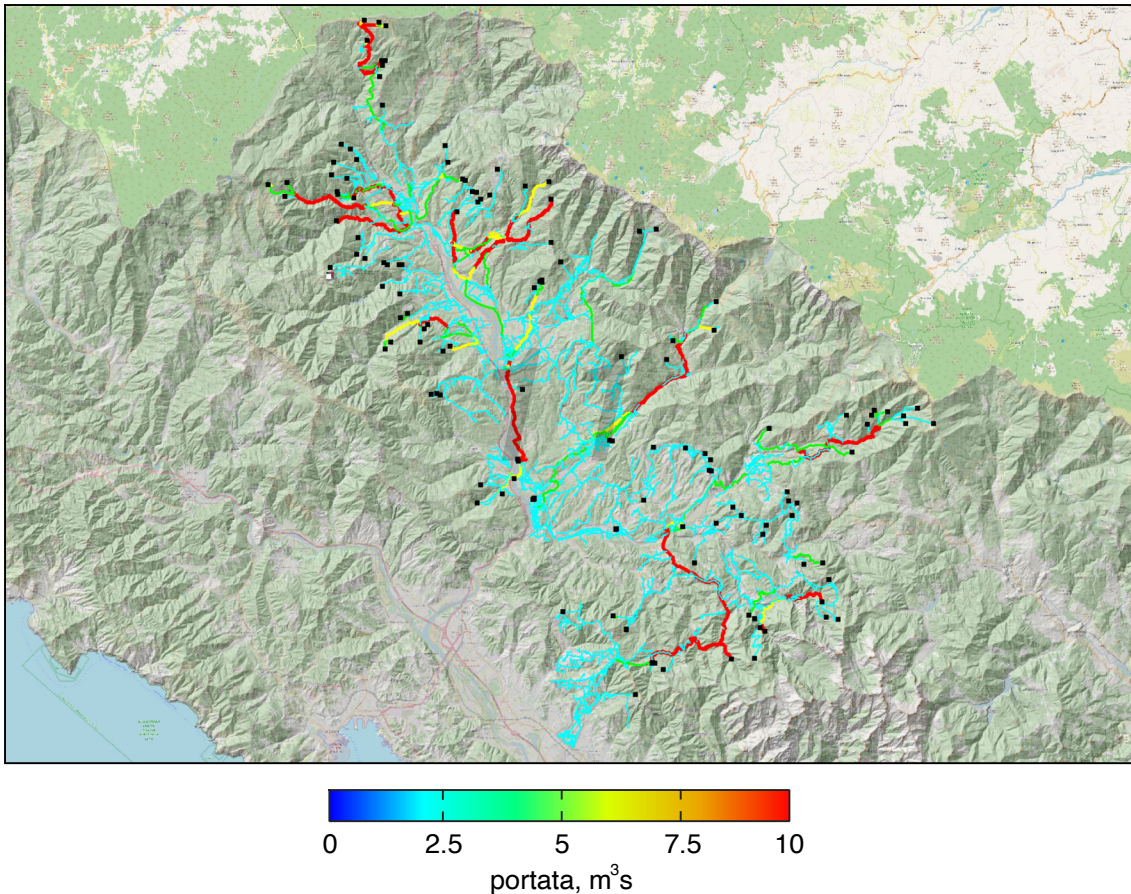


Figura 1.12. Andamento delle portate medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di connessione tra le reti indipendenti.

L'aumento delle portate localizzato nella zona dell'intervento implica un leggero incremento delle perdite di carico a causa della variazione del diametro delle tubazioni. Esse mostrano – comunque – valori molto bassi nelle zona valliva, e valori anche superiori ai 50 m/Km in zona montana (Figura 1.13).

In seguito all'aumento delle perdite di carico unitarie – diretta conseguenza dell'aumento delle portate e degli interventi di connessione proposti – le velocità medie giornaliere nelle tubazioni aumentano. Le velocità riscontrate rispettano complessivamente i limiti normativi come riportato in Figura 1.14, con valori che – in media – oscillano tra 1 m/s e 1.75 m/s.

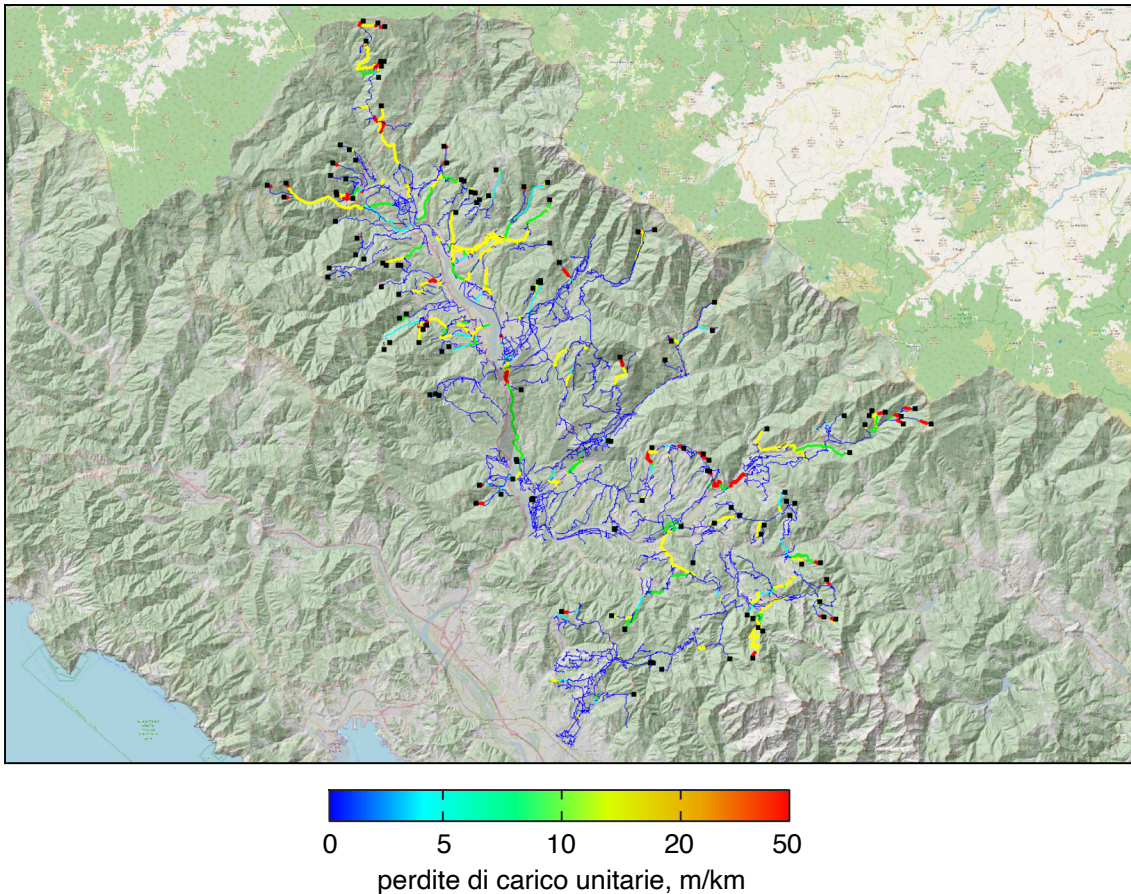


Figura 1.13. Andamento delle perdite di carico unitarie medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di connessione tra le reti indipendenti.

1.3.3 Costruzione di un invaso ad uso plurimo

L'obiettivo primario dello studio qui proposto è il potenziamento della disponibilità idrica per la Green Community della Lunigiana al fine di aumentare le emissioni del sistema acquedottistico di circa 100 litri al secondo. La terza configurazione – analizzata di seguito – ha lo scopo di identificare le possibili fonti di approvvigionamento idrico superficiale garantendo anche l'immagazzinamento delle acque di piena nei periodi autunnali, invernali e primaverili.

Attraverso l'algoritmo di analisi territoriale LANDMARK (Moretti e Orlandini, 2023), è stato possibile individuare la posizione degli invasi artificiali che presenterebbero i requisiti ottimali per rispondere alle necessità sopra elencate sulla base delle caratteristiche topografiche del terreno. L'analisi territoriale svolta per l'individuazione degli invasi artificiali verrà commentata nelle sezioni successive.

La costruzione di un invaso artificiale ad uso plurimo con sbarramento in località Mignegno (MS) e la connessione con la rete acquedottistica esistente è di seguito analizzata.

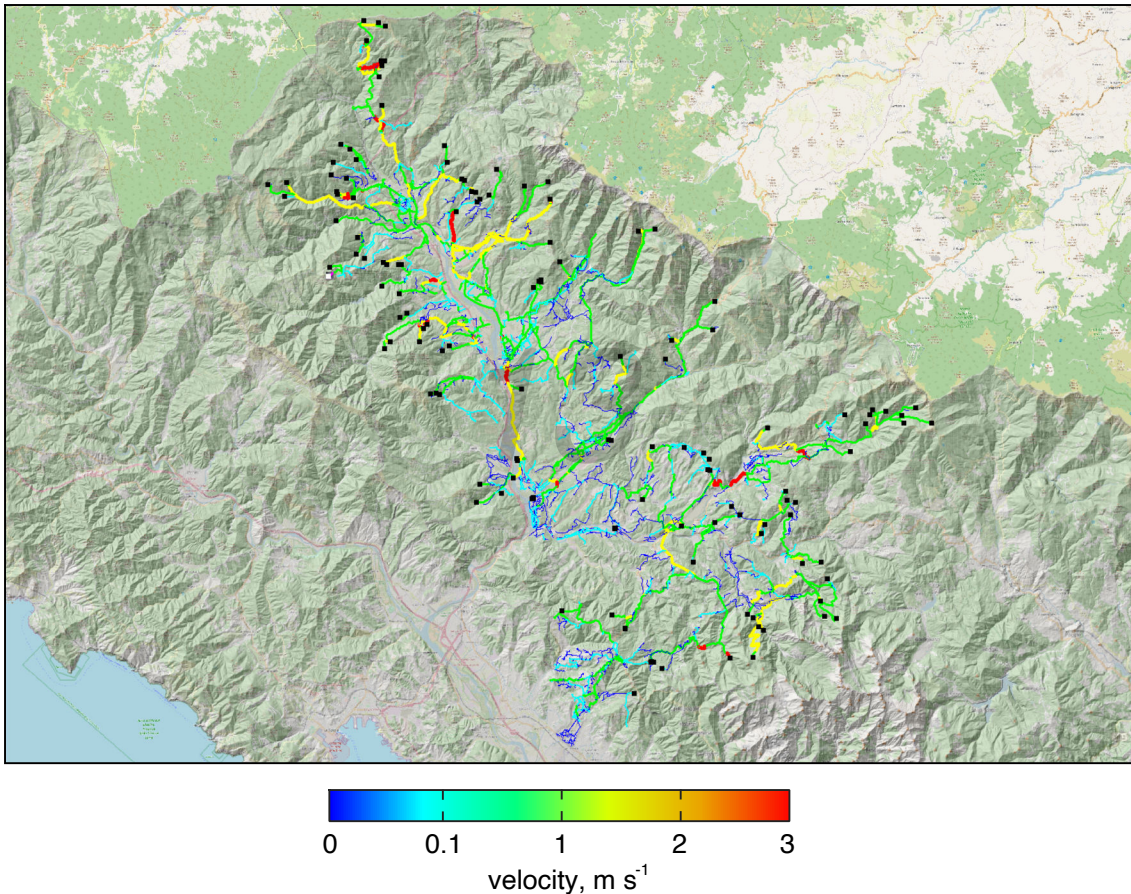


Figura 1.14. Andamento delle velocità medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di connessione tra le reti indipendenti.

La connessione idraulica tra l'invaso artificiale localizzato a Mignegno (MS) e la rete acquedottistica della Lunigiana presenta notevoli miglioramenti nella distribuzione dei flussi idrici. In Figura 1.15 è raffigurato l'andamento delle pressioni medie giornaliere nei nodi di connessione delle tubazioni. Dal confronto con le simulazioni precedentemente proposte (paragrafi 1.3.1 e 1.3.2) si evince come il supporto dell'invaso artificiale consente di ottenere pressioni maggiori nelle tubazioni a servizio di Terrarossa (MS) e Aulla (MS), raggiungendo valori tra i 50 e i 75 metri di colonna d'acqua rispetto a valori inferiori ai 10 metri di colonna d'acqua, ottenuti – invece – nelle simulazioni idrauliche precedentemente illustrate. Nello specifico, la connessione idraulica tra l'invaso artificiale e la rete acquedottistica è resa possibile da una tubazione di lunghezza 21522 m e diametro 500 mm. Il punto di connessione tra l'opera di sbarramento a Mignegno (MS) e la rete acquedottistica è l'incrocio stradale Via dei Pini – Via Nazionale, Strada Statale 62 nel comune di Terrarossa (MS). I valori delle portate medie giornaliere nella condotta adduttrice – opportunamente dimensionata per convogliare 100 litri al secondo – superano i 50 litri al secondo, garantendo una maggiore quantità e una migliore distribuzione giornaliera della risorsa idrica nei comuni di Terrarossa e Aulla (MS) (Figura 1.16).

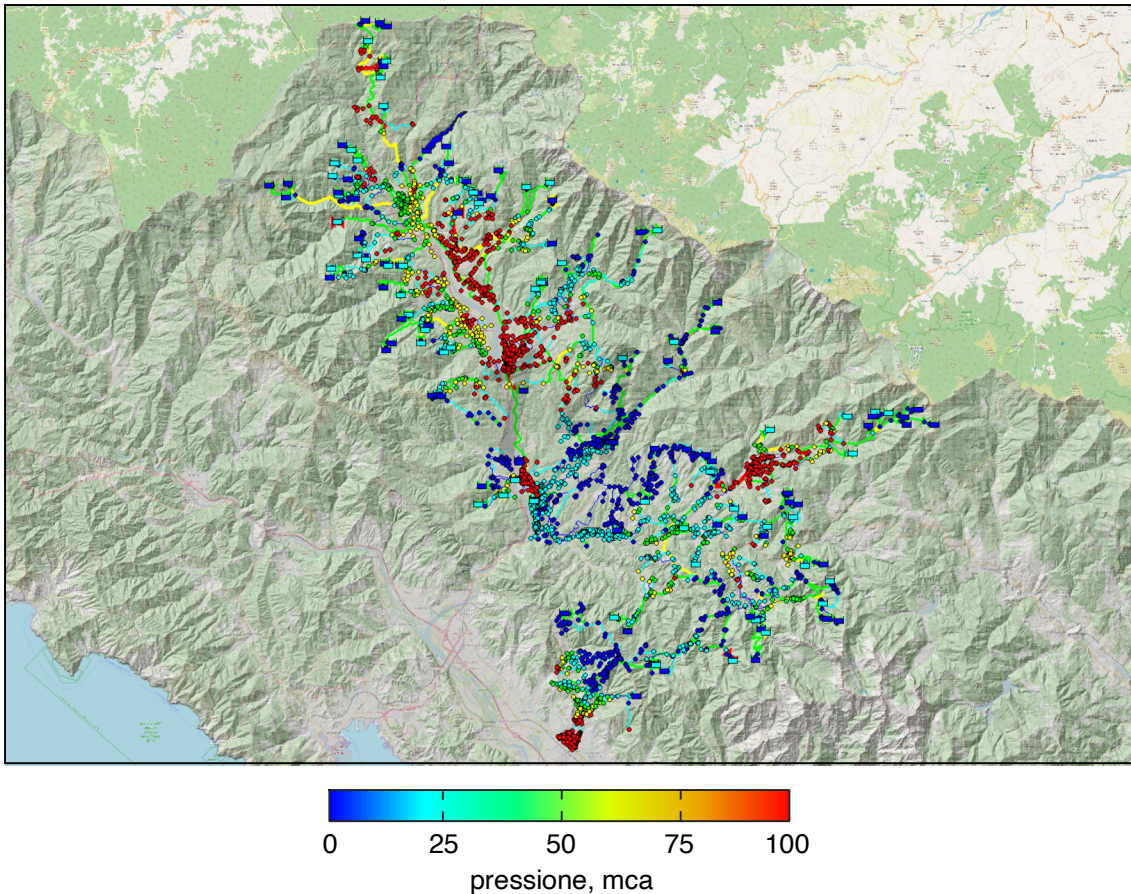


Figura 1.15. Andamento delle pressioni medie giornaliere nei nodi di connessione delle tubazioni per l'intervento di costruzione di un invaso ad uso plurimo.

La connessione idraulica proposta risulta vantaggiosa anche in termini di perdite di carico unitarie (Figura 1.17) e velocità (Figura 1.18) medie giornaliere nelle tubazioni. I valori delle perdite di carico unitarie medie giornaliere nelle tubazioni ottenuti non superano i 0.5 m/km nella condotta adduttrice di collegamento tra lo sbarramento dell'invaso artificiale e la rete acquedottistica. Complessivamente i valori si attestano intorno ai 10 m/km in media. La velocità media giornaliera nella condotta adduttrice di collegamento tra lo sbarramento dell'invaso e la rete acquedottistica è 0.9 m/s. Complessivamente i valori si attestano in un range compreso tra 0.7 e 1.75 m/s.

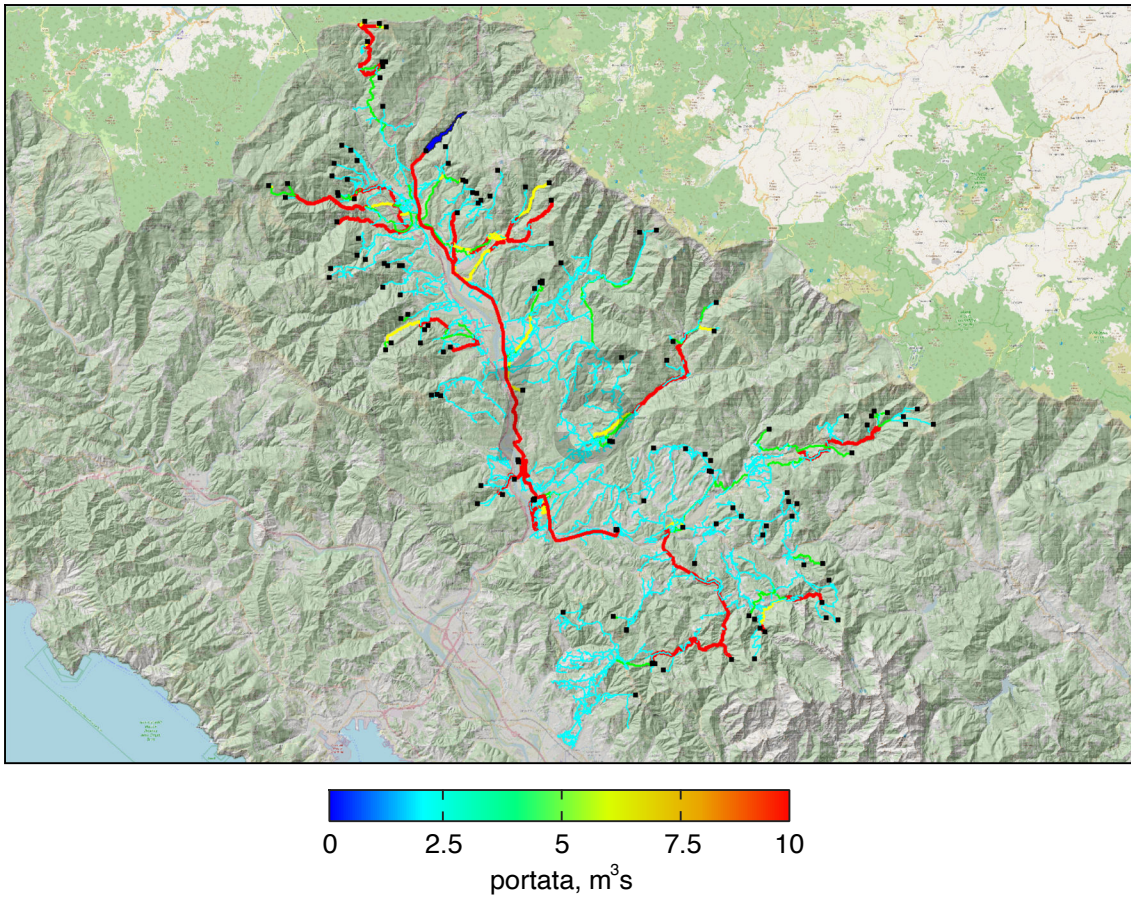


Figura 1.16. Andamento delle portate medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di costruzione dell'invaso ad uso plurimo.

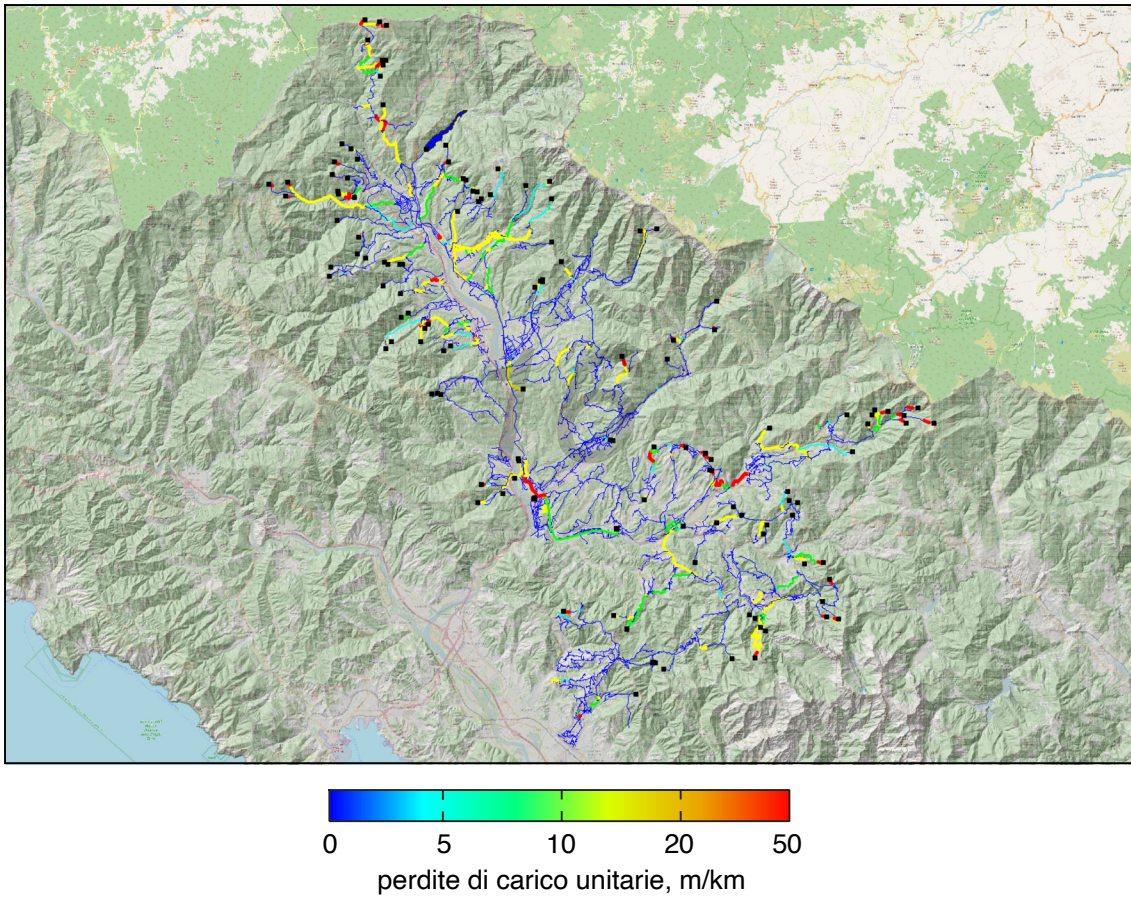


Figura 1.17. Andamento delle perdite di carico unitarie medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di costruzione dell'invaso ad uso plurimo.

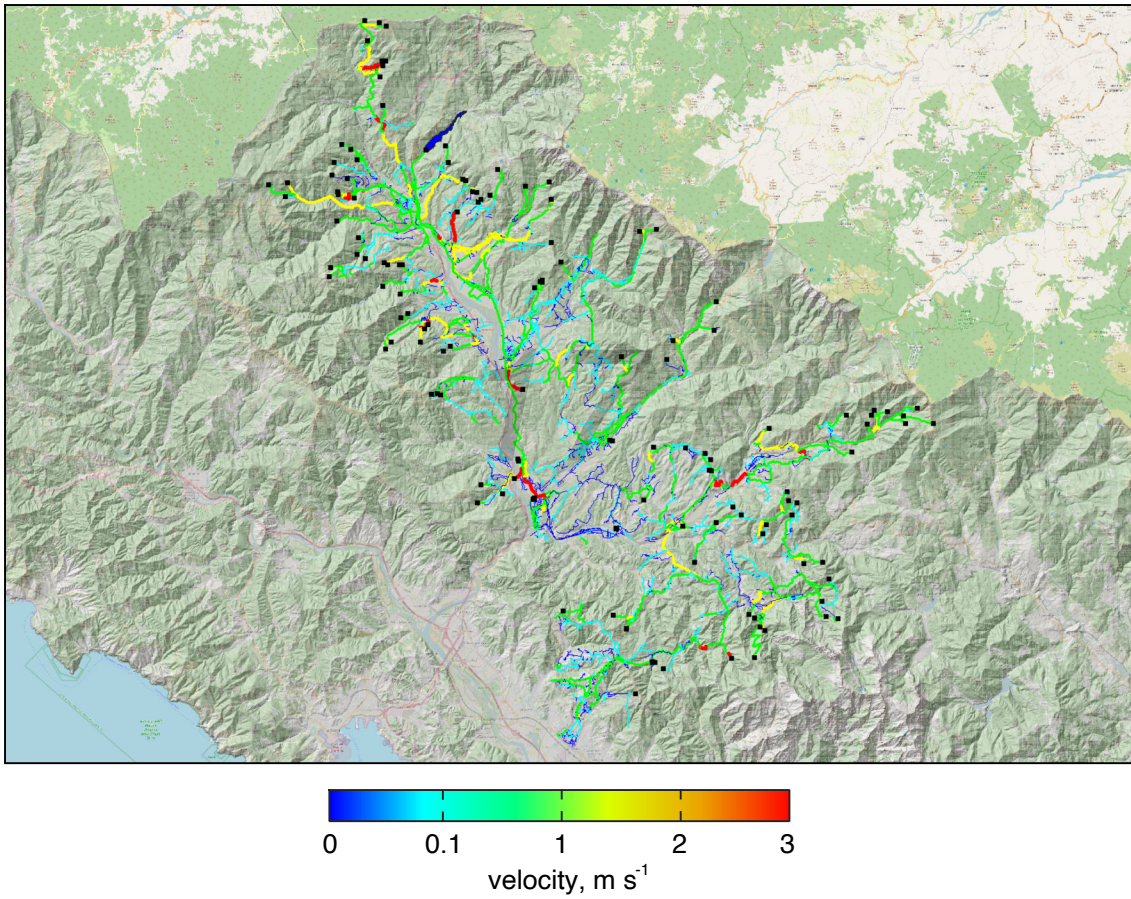


Figura 1.18. Andamento delle velocità medie giornaliere nelle tubazioni per l'intervento di costruzione dell'invaso ad uso plurimo.

1.4 Analisi dei risultati

La rete acquedottistica della Lunigiana non presenta criticità nello stato attuale. In un'ottica di Green Community Lunigianese, sono state proposte delle soluzioni efficienti al fine di potenziare la disponibilità idrica del sistema garantendo sia sistemi di trasporto per gravità evitando le spese di sollevamento meccanico sia pressioni adeguate ed ovunque sufficienti. Dopo aver analizzato lo stato attuale della rete è stata proposta la connessione idraulica tra le reti indipendenti del sistema acquedottistico e la connessione idraulica tra un invaso artificiale e la rete acquedottistica.

Entrambe le soluzioni mostrano un miglioramento nella distribuzione dei flussi idrici in termini di pressioni, portate, perdite di carico e velocità. In particolar modo, la soluzione che prevede la connessione idraulica tra l'invaso artificiale, individuato il località Mignegno (MS) a nord del comune di Pontremoli (MS), supporta maggiormente il potenziamento efficiente della rete. Sebbene la rete – ad oggi – non presenti particolari criticità idrauliche, la gestione dei flussi attraverso la costruzione dell'invaso consentirebbe un aumento delle pressioni nella località di Terrarossa (MS) e nel comune di Aulla (MS), un aumento delle portate nelle stesse zone e velocità e perdite di carico unitarie ovunque accettabili rispetto allo stato attuale.

A fronte di un investimento economico importante per la costruzione dell'opera idraulica, la configurazione che prevede la connessione idraulica tra invaso artificiale e rete acquedottistica esistente consentirebbe sia maggiori quantità d'acqua alla comunità Lunigianese sia la produzione di energia elettrica. Questo è possibile sfruttando il salto idraulico esistente tra la quota dello sbarramento (385 m slm) e la quota di connessione alla rete acquedottistica a valle (68 m slm). L'identificazione di una possibile fonte di approvvigionamento idrico superficiale consente sia l'immagazzinamento delle acque di piena abbondanti nei periodi autunnali, invernali e primaverili a vantaggio della conservazione delle sorgenti idriche montane e delle riserve idriche sotterranee sia la gestione efficiente delle onde di piena a protezione della comunità della Lunigiana, grazie alla posizione favorevole dell'invaso.

Parte II
Siccià

2 Siccità

2.1 Introduzione

La siccità rappresenta una delle sfide ambientali più pressanti a livello globale, con impatti significativi sull'agricoltura, l'approvvigionamento idrico e gli ecosistemi. La crescente frequenza e intensità delle siccità sono strettamente legate ai cambiamenti climatici, deforestazione, eccessivo sfruttamento delle risorse idriche e alterazioni nei pattern meteorologici (IPCC, 2019).

L'impatto della siccità è devastante nelle regioni aride e semi-aride, dove le risorse idriche sono già scarse. In questi contesti, la siccità non solo minaccia la produzione agricola e la sicurezza alimentare, ma può anche causare gravi crisi economiche e sociali. L'accesso limitato all'acqua potabile (Parte I) e alle risorse idriche adeguate porta a competizione tra diversi settori economici e tra diverse comunità, esacerbando le tensioni sociali e politiche (FAO, 2018).

In risposta a queste sfide, la costruzione di serbatoi artificiali si è dimostrata una soluzione efficace per la gestione delle risorse idriche. I serbatoi artificiali, noti anche come bacini di accumulo, sono infrastrutture costruite per raccogliere e conservare l'acqua piovana o fluviale durante i periodi di abbondanza, rendendola disponibile durante le fasi di siccità. Questo sistema di gestione delle acque offre diversi vantaggi: stabilizza l'approvvigionamento idrico per uso domestico, agricolo e industriale; riduce il rischio di alluvioni trattenendo le acque piovane; e sostiene la produzione di energia idroelettrica (World Bank, 2020).

Tuttavia, la realizzazione di serbatoi artificiali comporta anche una serie di sfide e considerazioni. La dislocazione delle comunità locali e le questioni legate alla giustizia ambientale sono temi critici da affrontare durante la progettazione e l'implementazione di tali progetti (UN Water, 2021). Pertanto, è essenziale che la pianificazione e la gestione dei serbatoi siano condotte in modo sostenibile e inclusivo, considerando sia i benefici a lungo termine sia i potenziali impatti negativi. Mentre la siccità rappresenta una sfida complessa e multidimensionale, la costruzione di serbatoi artificiali offre una delle soluzioni più pragmatiche per la gestione delle risorse idriche in un mondo sempre più vulnerabile ai cambiamenti climatici.

Nella parte II dello studio è suddivisa in due sezioni: nella prima è condotta un'analisi territoriale accurata volta all'individuazione di un serbatoio artificiale per far fronte alla problematica della siccità; nella seconda è condotta un'analisi idrologica attraverso modelli di bilancio idrologico al fine di stimare i benefici che un invaso artificiale apporterebbe al territorio e alla comunità della Lunigiana.

2.2 Analisi territoriale

Nel bacino del fiume Magra la risorsa idrica è sfruttata a fini idroelettrici in molteplici modi. I principali sistemi sono riportati di seguito. Il sistema gestito da Edison capta le acque degli affluenti in destra idrografica dei torrenti Magriola, Verde, Pilacca, Betigna, Gordana, Teglia e Mangiola e le convoglia nelle centrali idroelettriche di Teglia e

Rocchetta. Nel sistema sono presenti i serbatoi di Giaredo e Rocchetta che permettono l'invaso di 0.12 e 5 milioni di m³, rispettivamente. In sinistra idrografica invece la presa sul torrente Rosaro in località Matucaso permette la produzione di energia idroelettrica nella centrale ENEL di Arlia. Il presente studio esplorativo sulla possibilità di individuare altri bacini idrografici utilizzabili per lo sfruttamento della risorsa idrica a fini idropotabili, agricoli e idroelettrici, si inserisce quindi nel contesto esistente appena descritto.

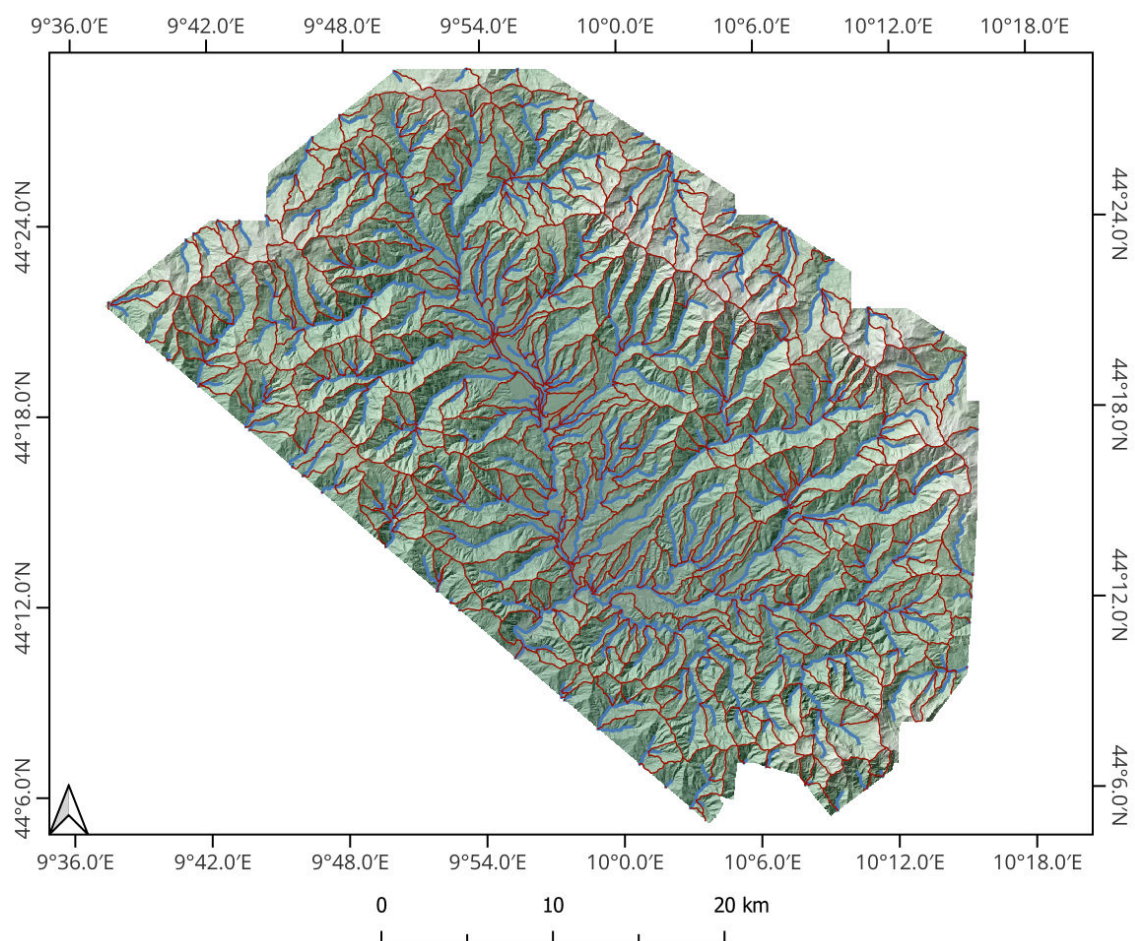


Figura 2.1. Estrazione dei reticoli di drenaggio (in blu) e della rete dei crinali o spartiacque (in rosso) per il bacino del Fiume Magra chiuso in corrispondenza del ponte stradale della Strada Statale SS330.

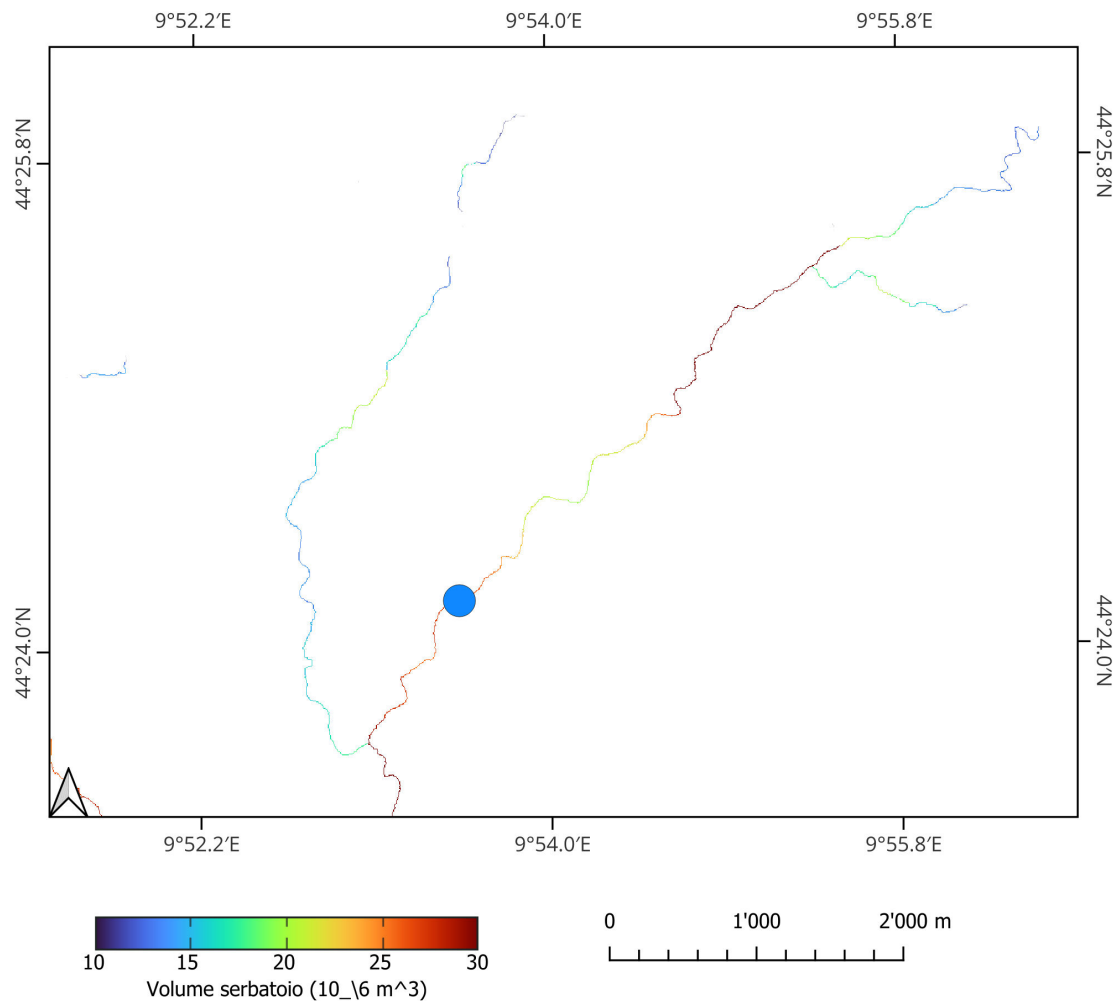


Figura 2.2. Volumi degli ipotetici serbatoi sottesi da uno sbarramento con altezza pari a 80 m posto in diverse sezioni lungo il fiume Magra e il torrente Magriola. Il cerchio blu evidenzia la posizione dello sbarramento considerato nel presente studio.

Per individuare i possibili siti che potrebbero ospitare un serbatoio e i relativi bacini idrografici sottesi si è avvalsi dell'algoritmo di analisi territoriale LANDMARK (Moretti e Orlandini, 2023). Tale algoritmo permette l'elaborazione dei Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione senza modificare l'assetto topografico come avviene utilizzando gli algoritmi simili proposti nel software GIS commerciali. In particolare permette l'estrazione dei reticoli di drenaggio e della complementare rete dei crinali spartiacque. Questi reticoli possono essere estratti alla massima densità del DTM oppure ad una densità minore. Un esempio di estrazione dei reticoli è riportato nella Figura 2.1.

Lo strumento permette – quindi – di effettuare le analisi i cui risultati sono utili ai fini del presente studio. Attraverso l'utilizzo di LANDMARK sono stati identificati i luoghi in cui un ipotetico sbarramento potesse portare alla formazione di un serbatoio di volume assegnato. A titolo di esempio, in Figura 2.2 sono riportati i risultati ottenuti per un tratto del corso del fiume Magra a monte della confluenza con il torrente Magriola. Ipotizzando uno sbarramento alto 80 metri, in figura 2.2 sono state riportate solo le celle a monte delle quali è associato un valore del serbatoio compreso tra 10 e 25 milioni di m^3 . E' evidente che vi siano sezioni sia del fiume Magra che del torrente Magriola che sottendono serbatoi

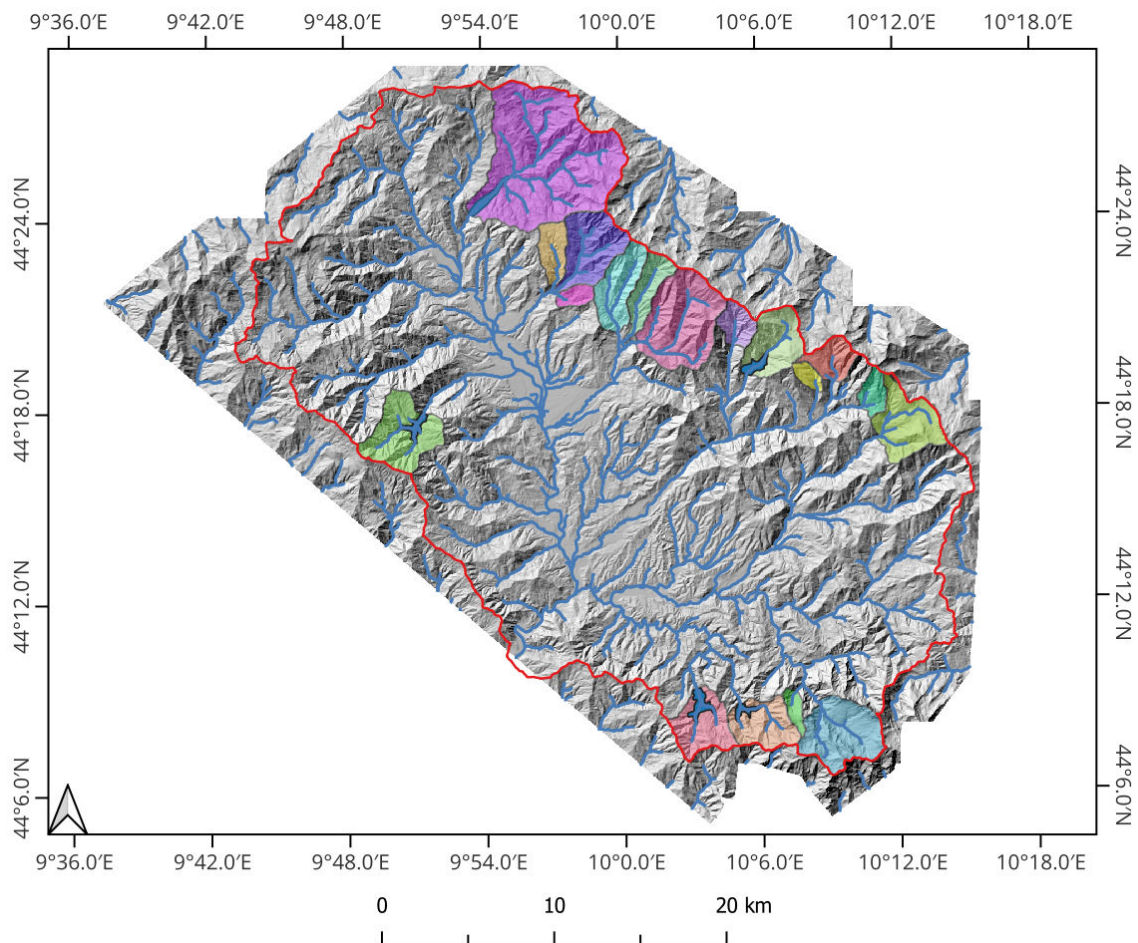


Figura 2.3. Il reticolo idrografico e i potenziali serbatoi individuati. I bacini direttamente contribuenti ed eventuali bacini che potrebbero contribuire indirettamente tramite opere di captazione e canali di derivazione sono riportati.

di notevole capacità, altre – invece – che, in funzione della geometria della valle a monte della sezione considerata, sottendono serbatoi di dimensioni più modeste.

Per l'individuazione delle potenziali sezioni di interesse si è proceduto ad intersecare i risultati appena descritti con altre informazioni. In particolare si è valutata la larghezza dell'ipotetico sbarramento, per scegliere le sezioni in cui a parità di volume del serbatoio, si abbiano delle opere di sbarramento con lunghezza del coronamento contenuta. E in seconda battuta si sono valutate le interferenze tra i serbatoi individuati e le attività antropiche. Eliminati gli sbarramenti che avrebbero causato allagamenti di centri abitati, sono stati individuati come possibili serbatoi quelli riportati nella Figura 2.3 e descritti di seguito. In particolare nella Figura 2.3 oltre ad essere riportata la posizione dei serbatoi individuati, sono anche evidenziati i bacini direttamente sottesi a ciascun serbatoio e i bacini non direttamente sottesi che però potenzialmente potrebbero essere derivati e contribuire alle portate in ingresso dei serbatoi individuati ad essi limitrofi.

2.2.1 Serbatoio Fiume Magra

Il potenziale serbatoio sul fiume Magra è posto a monte della confluenza tra il fiume Magra e il suo affluente in destra idraulica torrente Magriola come riportato in Figura 2.4. Il bacino imbrifero direttamente sotteso è pari a 52.5 km². Seguendo l'ipotesi di aumento dell'area contribuyente, ad esso potrebbero essere connessi anche i bacini limitrofi, attraverso opere di derivazione e adduzione. Ipotizzando uno sbarramento alto 80 m (Figura 2.5), il serbatoio risultante andrebbe ad interessare la viabilità esistente ma non andrebbe ad interessare centri abitati o aree antropizzate. La morfologia del tratto di valle su cui insisterebbe il serbatoio è tale che, come riportato in Figura 2.6, per una altezza dello sbarramento paria 60 m si ottiene un volume pari a 10 milioni di m³, per una altezza dello sbarramento paria 80 m si ottiene un volume pari a 20 milioni di m³. La quota di imposta dello sbarramento è pari a 292.7 m slm. Tale quota permetterebbe, nel caso si prevedesse un uso plurimo dell'invaso, di coniugare le esigenze di produzione idroelettrica con quelle idropotabili.

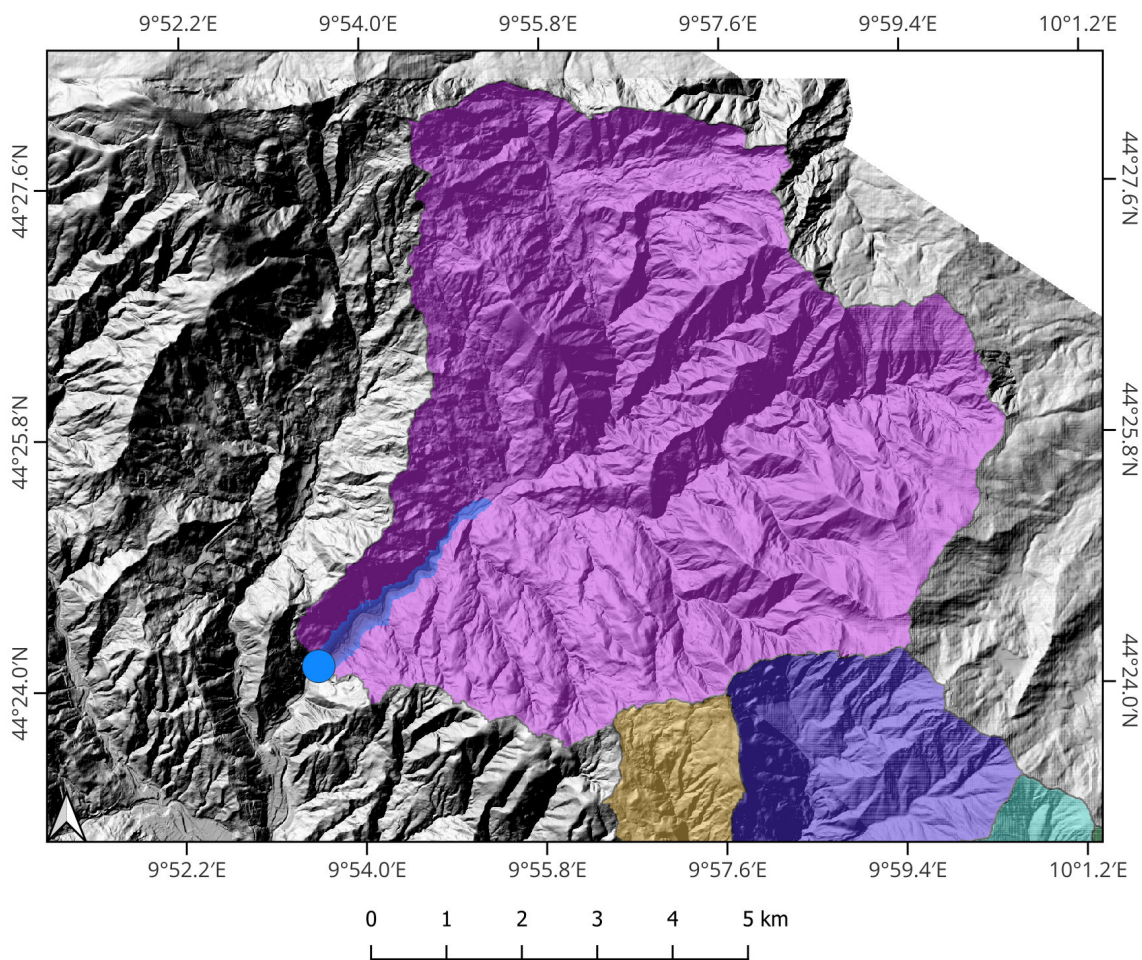


Figura 2.4. Il serbatoio individuato sul fiume Magra. Il cerchio blu indica la posizione dell'opera di sbarramento. In viola il bacino direttamente sotteso ad essa. In azzurro l'area potenzialmente interessata dal serbatoio.

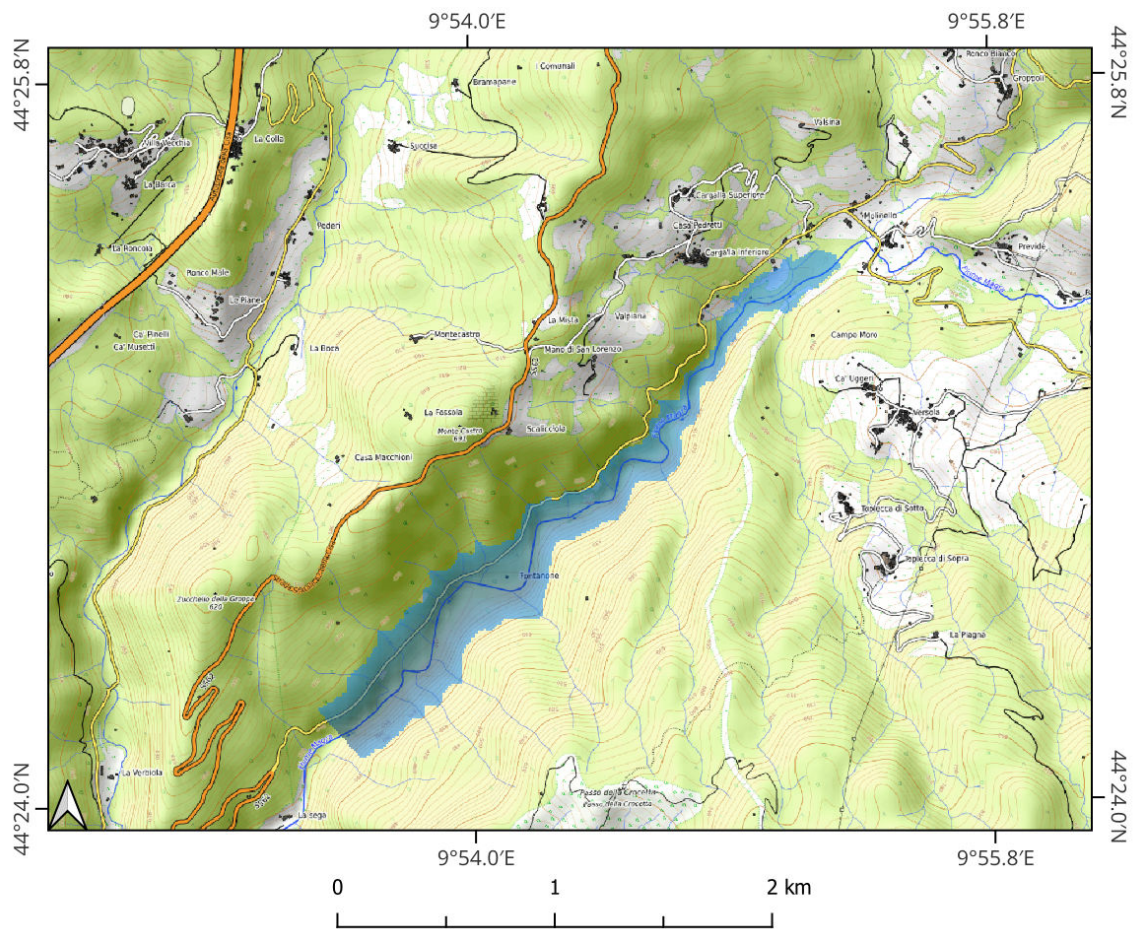


Figura 2.5. Area allagata dal serbatoio sul fiume Magra nel caso l'opera di sbarramento abbia un'altezza di ritenuta pari a 80 m.

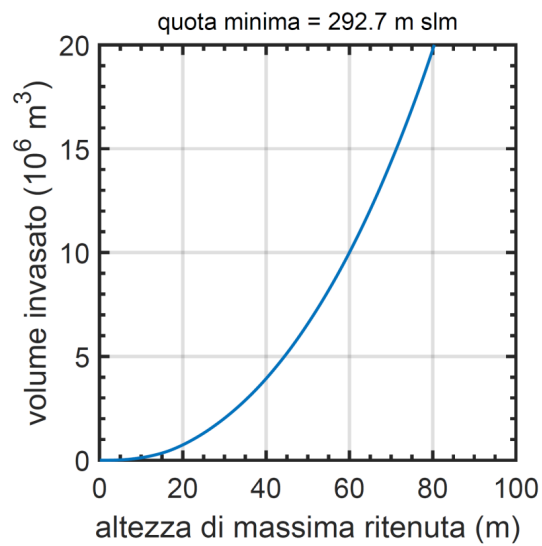


Figura 2.6. Curva di invaso del serbatoio sul fiume Magra.

2.2.2 Serbatoio Fiume Mangiola

Il potenziale serbatoio sul torrente Mangiola (Figura 2.7) è posto in corrispondenza dell'esistente opera di presa che alimenta il serbatoio esistente di Rocchetta. Il bacino imbrifero direttamente sotteso è pari a 14 km². Ipotizzando uno sbarramento alto 80 m, come riportato in Figura 2.8, il serbatoio risultante andrebbe ad interessare la viabilità esistente ma non andrebbe ad interessare centri abitati o aree antropizzate. La morfologia del tratto di valle su cui insisterebbe il serbatoio è tale che, come riportato nelle Figure 2.8 e 2.9, per una altezza dello sbarramento paria 60 m si ottiene un volume pari a circa 7 milioni di m³, per una altezza dello sbarramento paria 80 m si ottiene un volume pari a 15 milioni di m³. La quota di imposta dello sbarramento è pari a 418.8 m slm. Tale bacino potrebbe essere pensato come ampliamento del già esistente serbatoio di Rocchetta per affiancare alla produzione di energia idroelettrica e all'uso idropotabile anche la funzione di accumulo idroelettrico del surplus di energia elettrica prodotta da altre fonti rinnovabili.

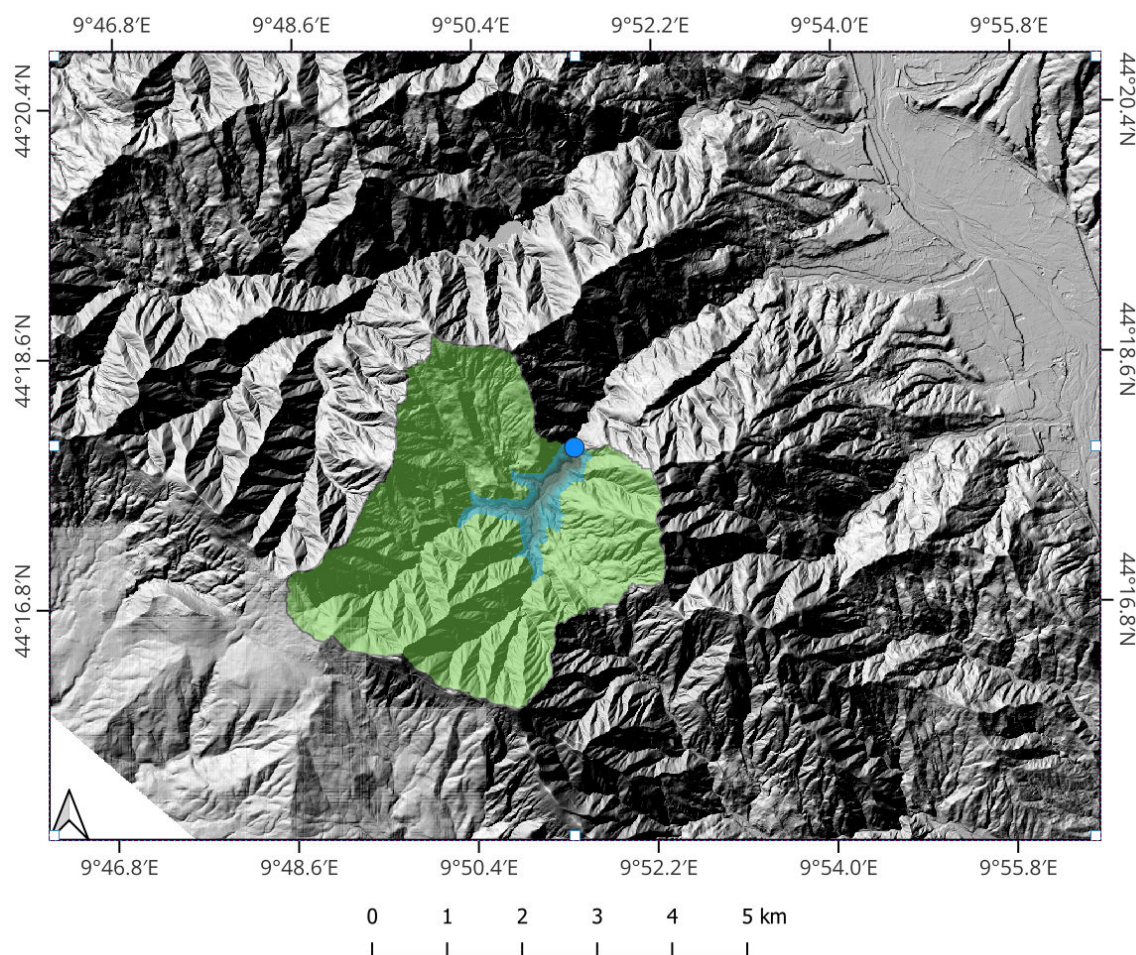


Figura 2.7. Il serbatoio sul torrente Mangiola. Il cerchio azzurro indica la posizione dell'opera di sbarramento. In verde il bacino direttamente sotteso ad essa. In azzurro semitrasparente l'area potenzialmente interessata dal serbatoio.

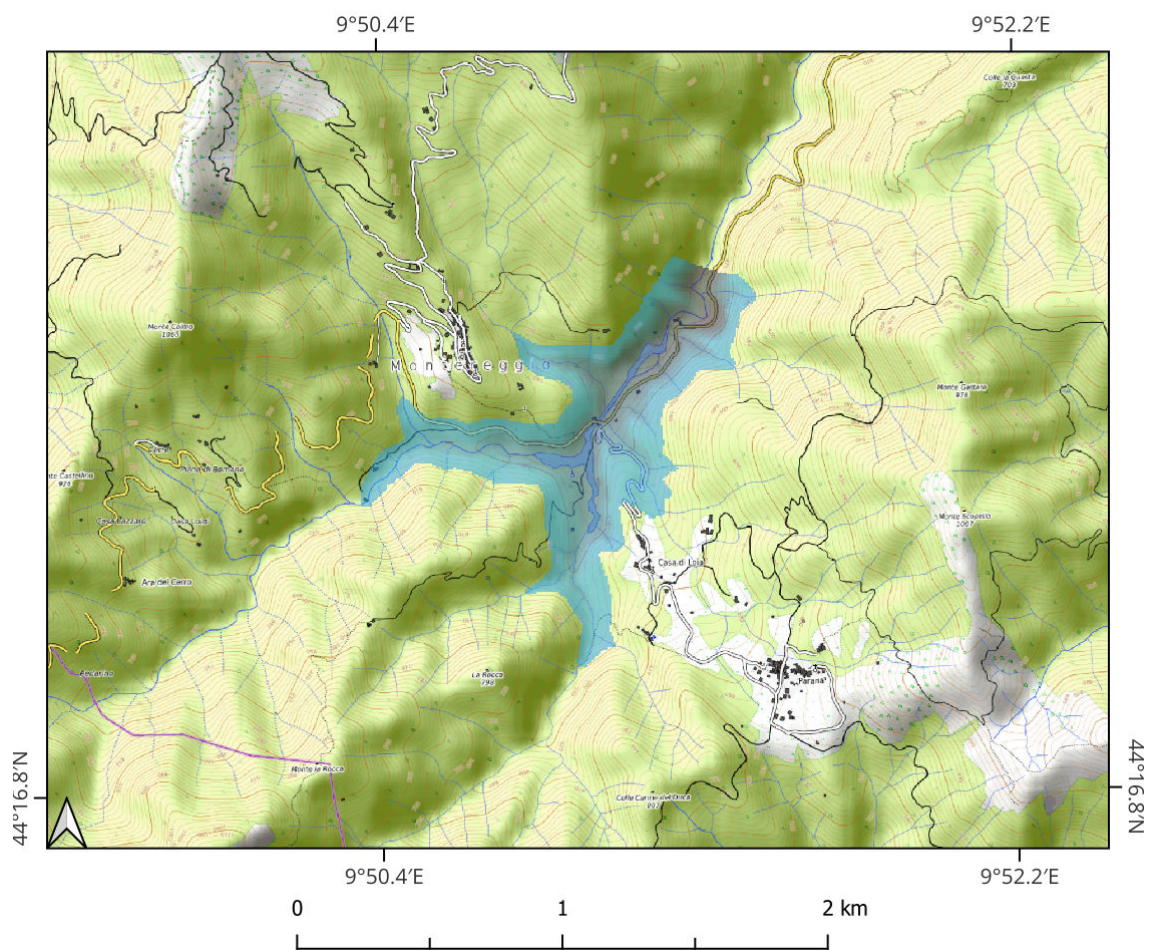


Figura 2.8. Area allagata dal serbatoio sul torrente Mangiola nel caso l'opera di sbarramento abbia un'altezza di ritenuta pari a 80 m.

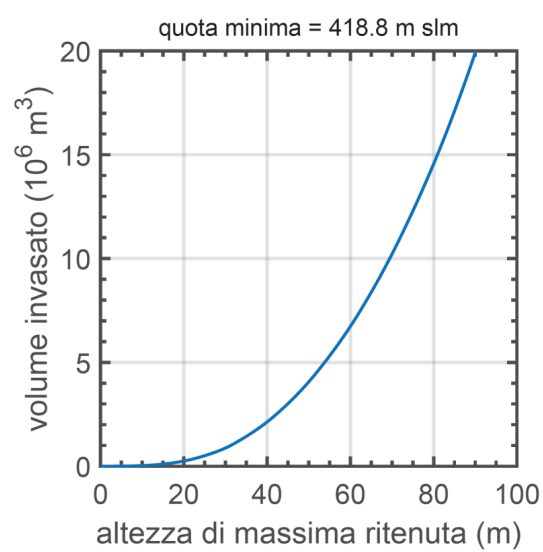


Figura 2.9. Curva di invaso del serbatoio sul torrente Mangiola.

2.2.3 Serbatoio Torrente Taverone

L'ipotetico serbatoio sul torrente Taverone (Figura 2.10) è posto circa 4 km a valle del Passo di Lagastrello. Il bacino imbrifero direttamente sotteso è pari a 10.7 km². Ipotizzando uno sbarramento alto 80 m, come riportato in Figura 2.11, il serbatoio risultante andrebbe ad interessare la viabilità esistente ma non andrebbe ad interessare centri abitati o aree antropizzate. La morfologia del tratto di valle su cui insisterebbe il serbatoio è tale che, come riportato nelle Figure 2.11 e 2.12, per una altezza dello sbarramento paria 60 m si ottiene un volume pari a circa 1.6 milioni di m³, per una altezza dello sbarramento paria 80 m si ottiene un volume pari a 3.5 milioni di m³. La quota di imposta dello sbarramento è pari a 593.3 m slm. Tale bacino potrebbe essere connesso all'esistente Lago Paduli per affiancare alla produzione di energia idroelettrica e all'uso idropotabile anche la funzione di accumulo idroelettrico del surplus di energia elettrica prodotta da altre fonti rinnovabili.

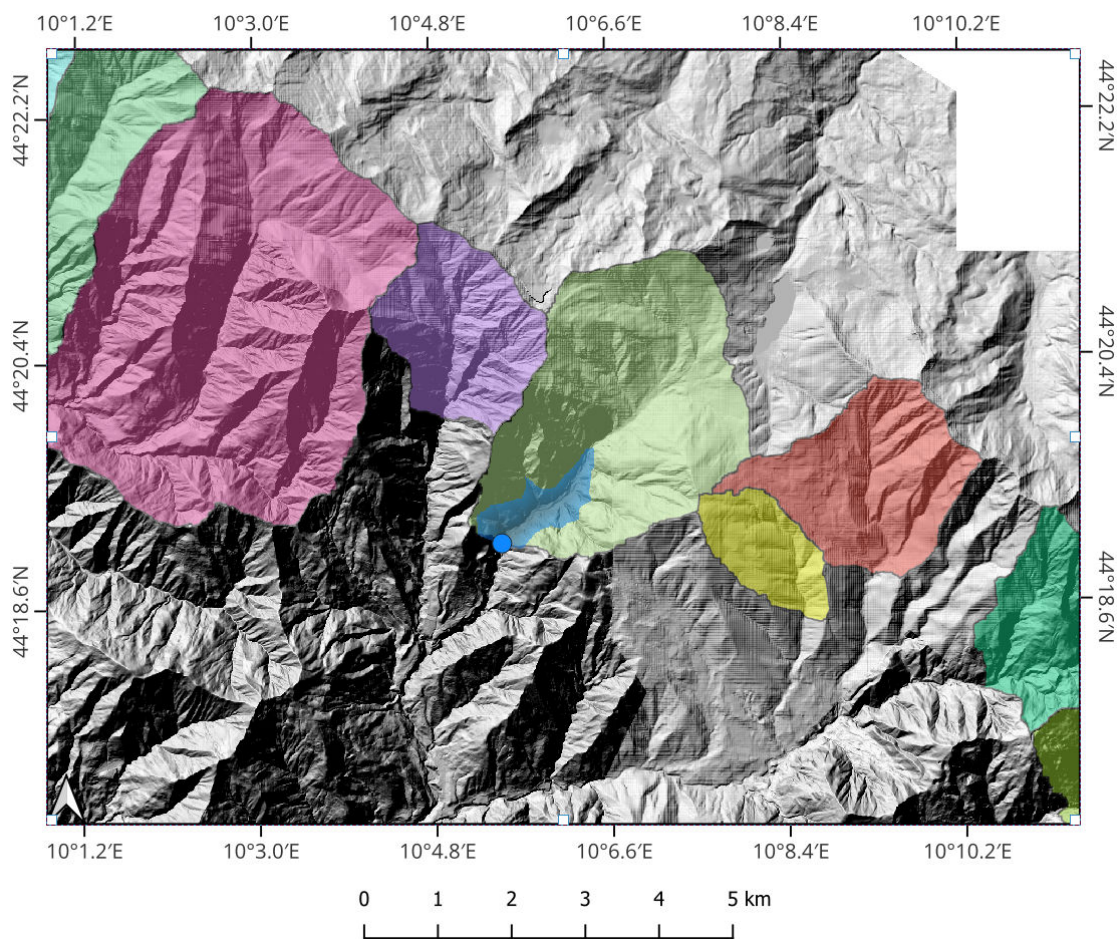


Figura 2.10. Il serbatoio sul torrente Taverone. Il cerchio blu indica la posizione dell'opera di sbarramento. In verde il bacino direttamente sotteso ad essa. In azzurro l'area potenzialmente interessata dal serbatoio.

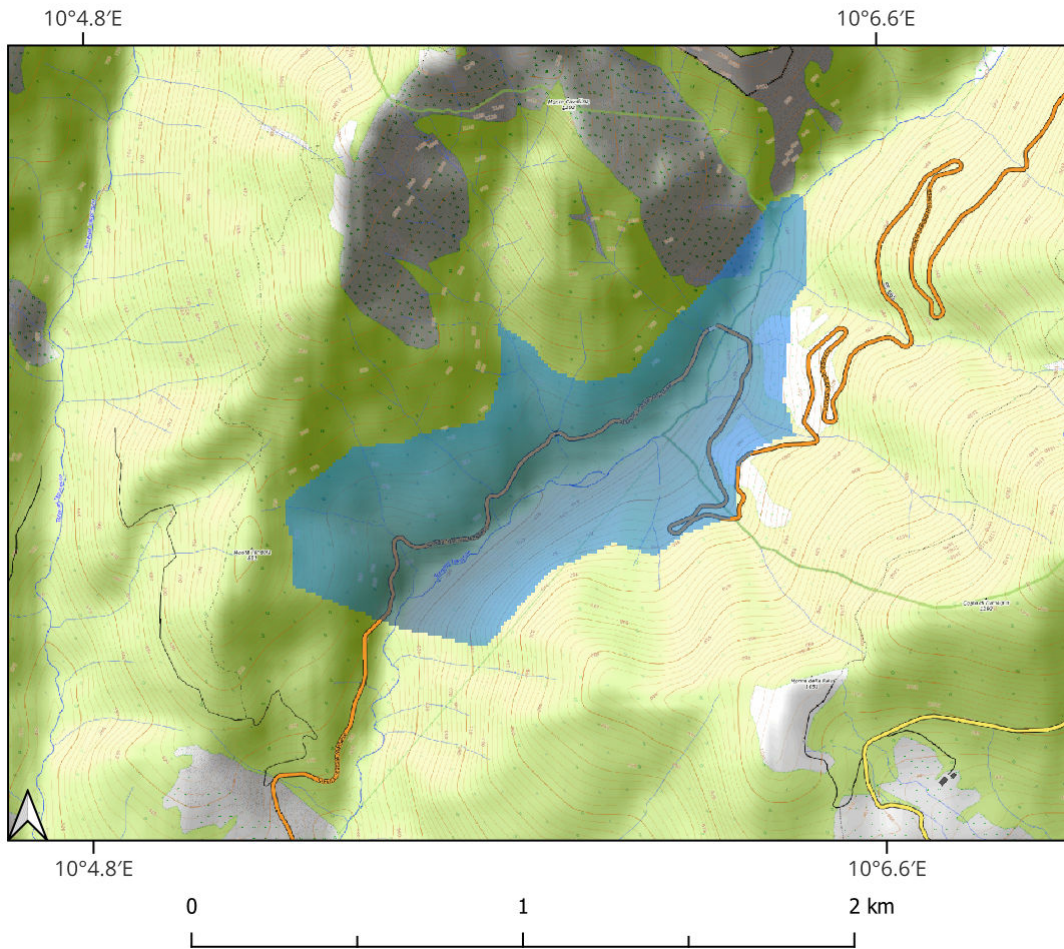


Figura 2.11. Area allagata dal serbatoio sul torrente Taverone nel caso l'opera di sbarramento abbia un'altezza di ritenuta pari a 80 m.

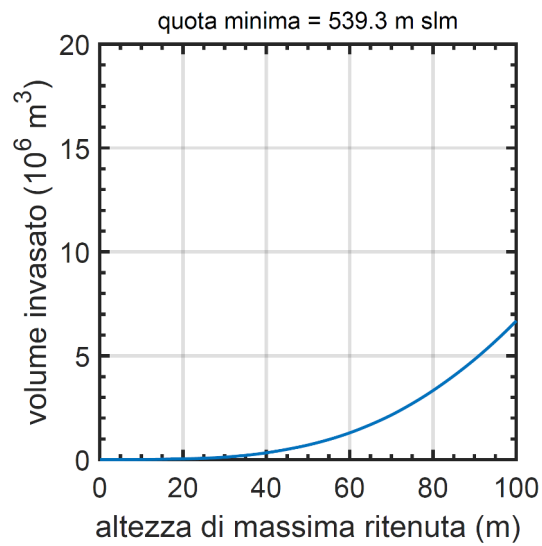


Figura 2.12. Curva di invaso del serbatoio sul torrente Taverone.

2.2.4 Serbatoio Torrente Pescicola

Il potenziale serbatoio sul torrente Pescicola è posto nel fondovalle in corrispondenza dell'abitato di Pulica come riportato in Figura 2.13. Il bacino imbrifero direttamente sotteso è pari a 10 km². Ad esso attraverso opere di derivazione e adduzione potrebbero essere connessi anche i bacini limitrofi nel caso in cui si volesse aumentare l'area contribuyente. Ipotizzando uno sbarramento alto 80 m, come riportato nelle Figure 2.14 e 2.15, il serbatoio risultante andrebbe ad interessare la viabilità esistente ma non andrebbe ad interessare centri abitati o aree antropizzate. La morfologia del tratto di valle su cui insisterebbe il serbatoio è tale che, per una altezza dello sbarramento paria 60 m si ottiene un volume pari a 11 milioni di m³ e per una altezza dello sbarramento paria 80 m si ottiene un volume superiore a 24 milioni di m³ (Figura 2.15). La quota di imposta dello sbarramento è pari a 215 m slm. Tale quota permetterebbe, nel caso si prevedesse un uso plurimo dell'invaso, di coniugare le esigenze di produzione idroelettrica con quelle idropotabili.

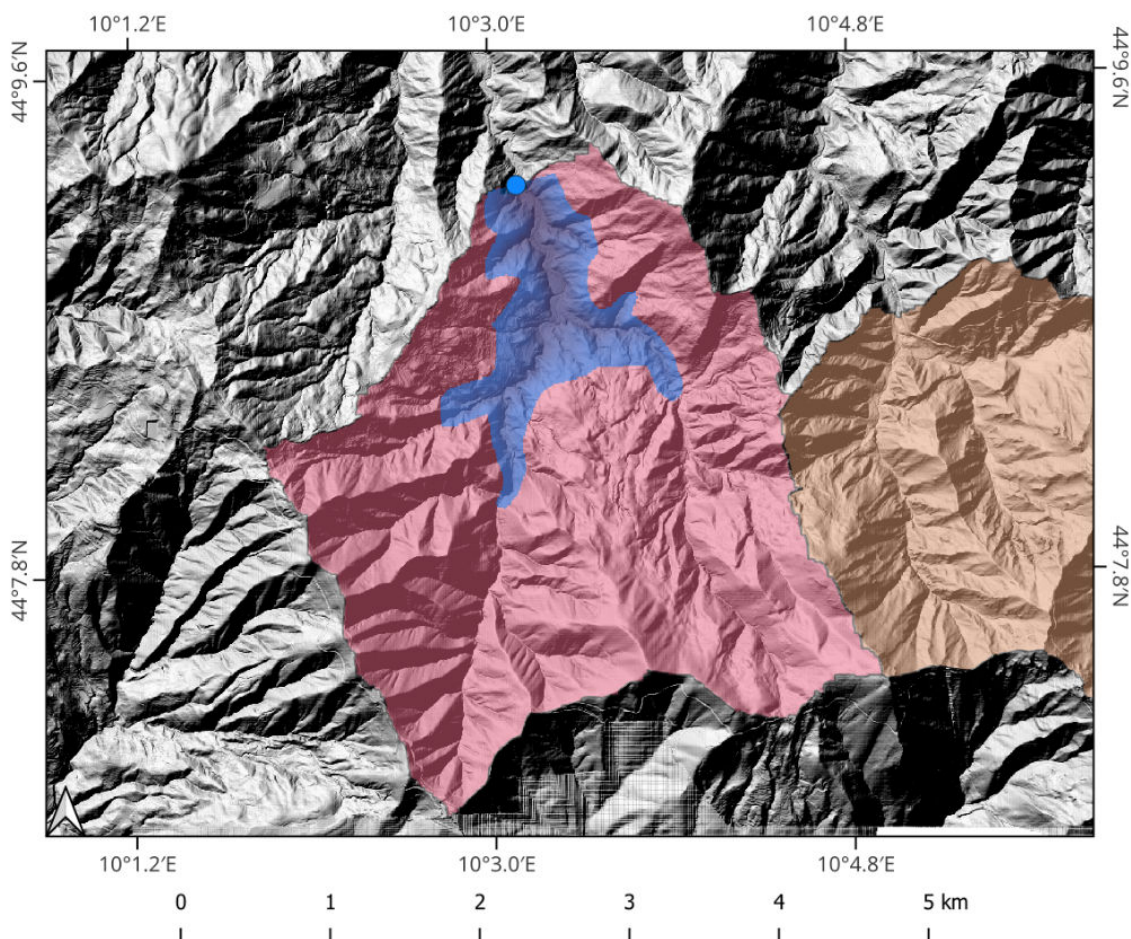


Figura 2.13. Il serbatoio sul torrente Pescicola. Il cerchio blu indica la posizione dell'opera di sbarramento. In rosa il bacino direttamente sotteso ad essa. In azzurro l'area potenzialmente interessata dal serbatoio.

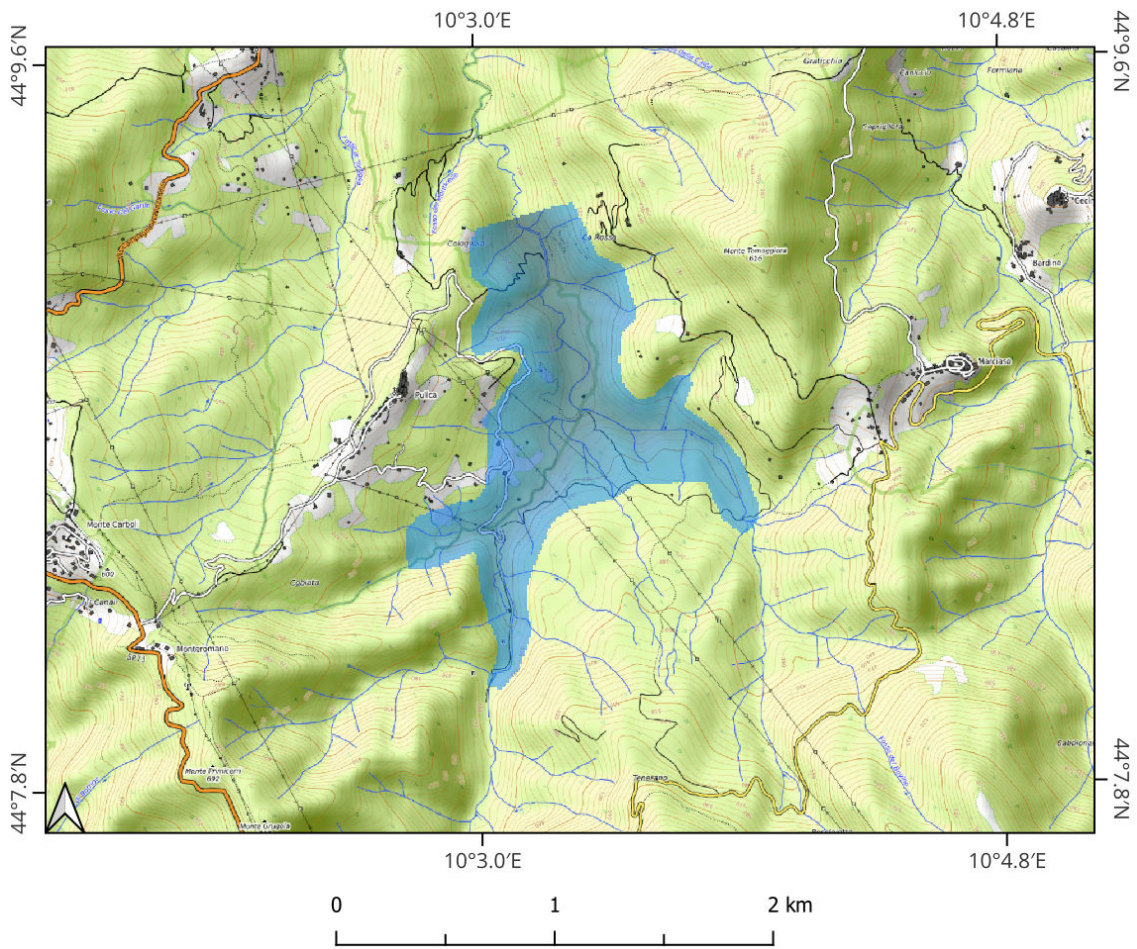


Figura 2.14. Area allagata dal serbatoio sul torrente Pescicola nel caso l'opera di sbarramento abbia un'altezza di ritenuta pari a 80 m.

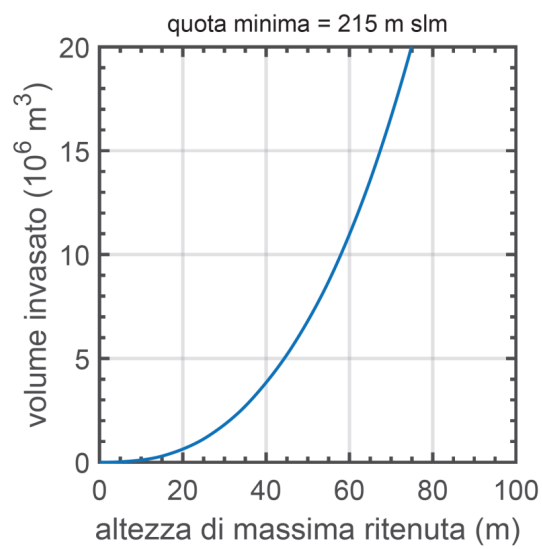


Figura 2.15. Curva di invaso del serbatoio sul torrente Pescicola.

2.2.5 Serbatoio Torrente Bardinello

Il potenziale serbatoio sul torrente Bardinello è posto nel fondovalle in prossimità dell'abitato di Marciasio come riportato in Figura 2.16. Il bacino imbrifero direttamente sotteso è pari a 9.4 km². Ad esso attraverso opere di derivazione e adduzione potrebbero essere connessi anche i bacini limitrofi nel caso in cui si volesse aumentare l'area contribuyente. Ipotizzando uno sbarramento alto 80 m, come riportato nelle Figure 2.17 e 2.18, il serbatoio risultante andrebbe ad interessare la viabilità esistente ma non andrebbe ad interessare centri abitati o aree antropizzate. La morfologia del tratto di valle su cui insisterebbe il serbatoio è tale che, come riportato in Figura 2.18, per una altezza dello sbarramento paria 60 m si ottiene un volume pari a 12 milioni di m³, per una altezza dello sbarramento paria 80 m si ottiene un volume superiore a 23.5 milioni di m³. La quota di imposta dello sbarramento è pari a 265.8 m slm. Tale quota permetterebbe, nel caso si prevedesse un uso plurimo dell'invaso, di coniugare le esigenze di produzione idroelettrica con quelle idropotabili.

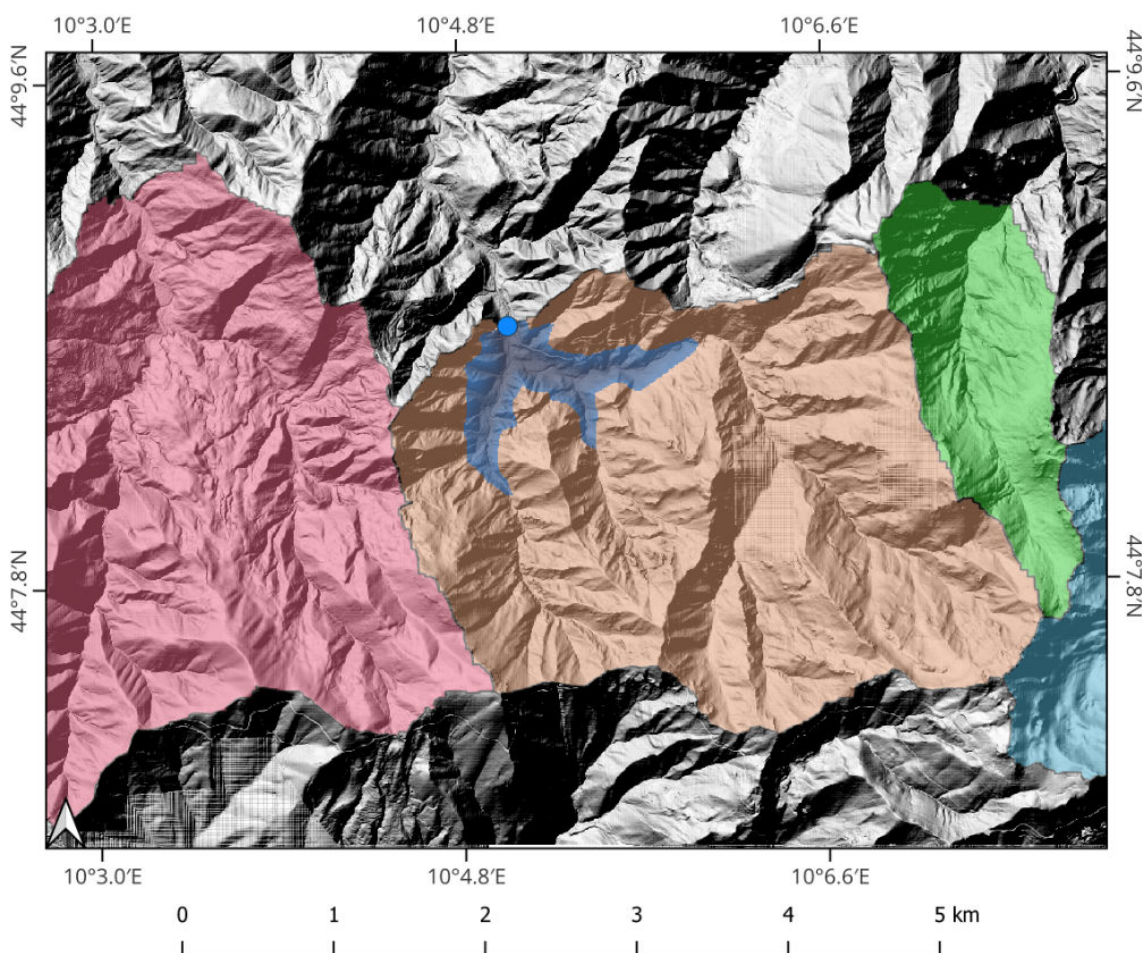


Figura 2.16. Il serbatoio sul torrente Bardinello. Il cerchio blu indica la posizione dell'opera di sbarramento. In arancione il bacino direttamente sotteso ad essa. In azzurro l'area potenzialmente interessata dal serbatoio.

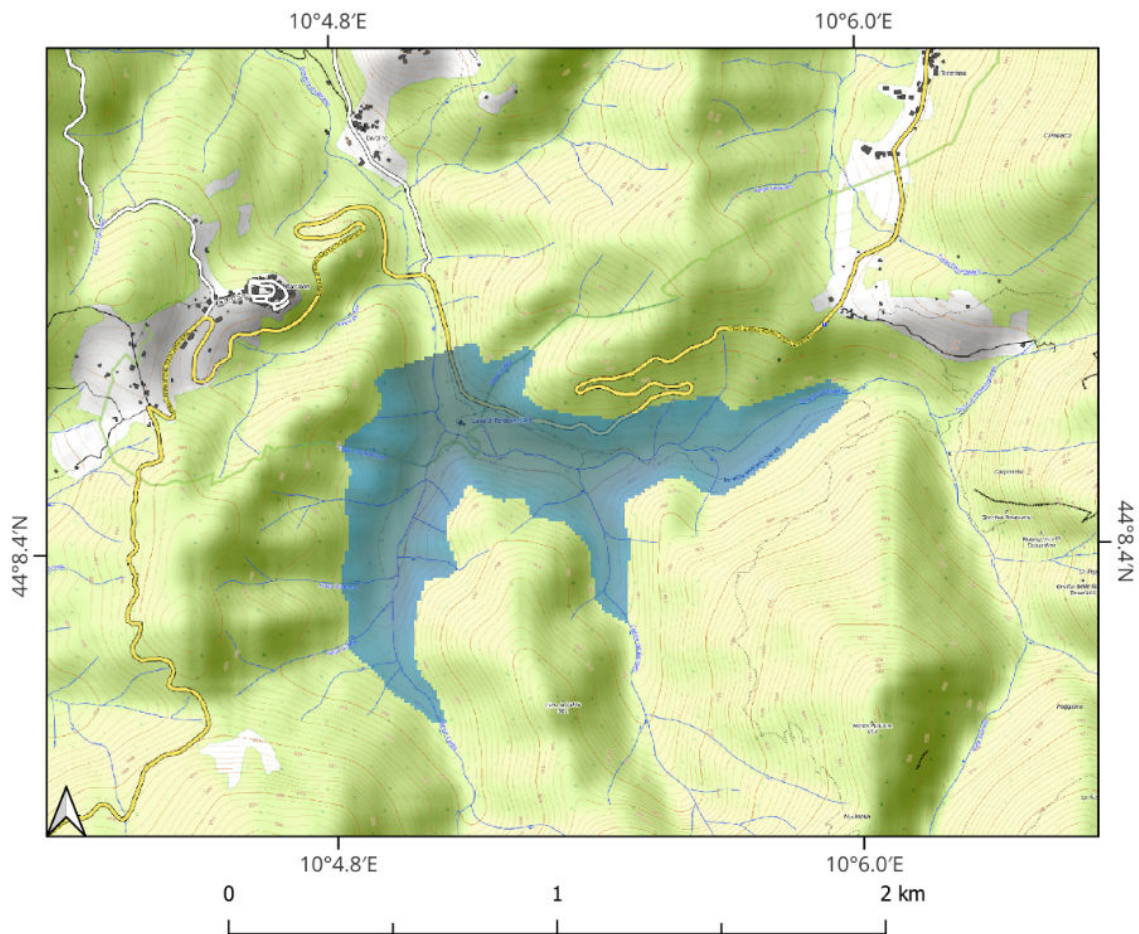


Figura 2.17. Area allagata dal serbatoio sul torrente Bardinello nel caso l'opera di sbarramento abbia un'altezza di ritenuta pari a 80 m.

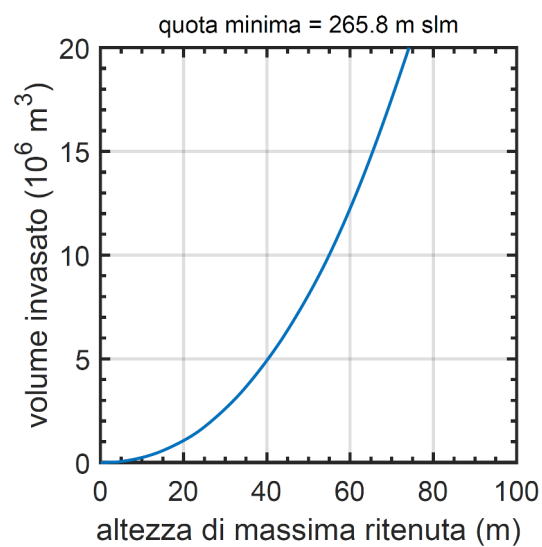


Figura 2.18. Curva di invaso del serbatoio sul torrente Bardinello.

Sono stati individuati 5 luoghi potenzialmente adatti sotto l'aspetto morfologico per accogliere un'opera di sbarramento ed il relativo serbatoio. Alcuni si distinguono per la migliore curva di invaso, altri per la maggiore quota, altri per la possibilità di connetterli ai sistemi già esistenti. Tutti i serbatoi non andrebbero ad interessare centri abitati ma solamente infrastrutture viarie. Per individuare la soluzione migliore sono necessarie dettagliate analisi geologiche delle rocce di imposta di ciascun sbarramento ipotizzato, e dettagliate analisi geologiche dei versanti su cui insistono i serbatoi. Infine deve essere eseguita un'attenta analisi della risorsa idrica. A tal proposito, di seguito viene proposta l'analisi idrologica effettuata per il serbatoio proposto sul Fiume Magra (paragrafo 2.2.1).

2.3 Analisi idrologica

2.3.1 Analisi dei dati

I dati di precipitazione e temperatura sono stati raccolti per l'area di interesse. I dati sono stati riportati all'interno di annali idrologici. Dal 1916 al 1931 le località del bacino del Magra fanno riferimento al compartimento di Pisa, per poi passare dal 1932 fino ad oggi al compartimento di Genova.

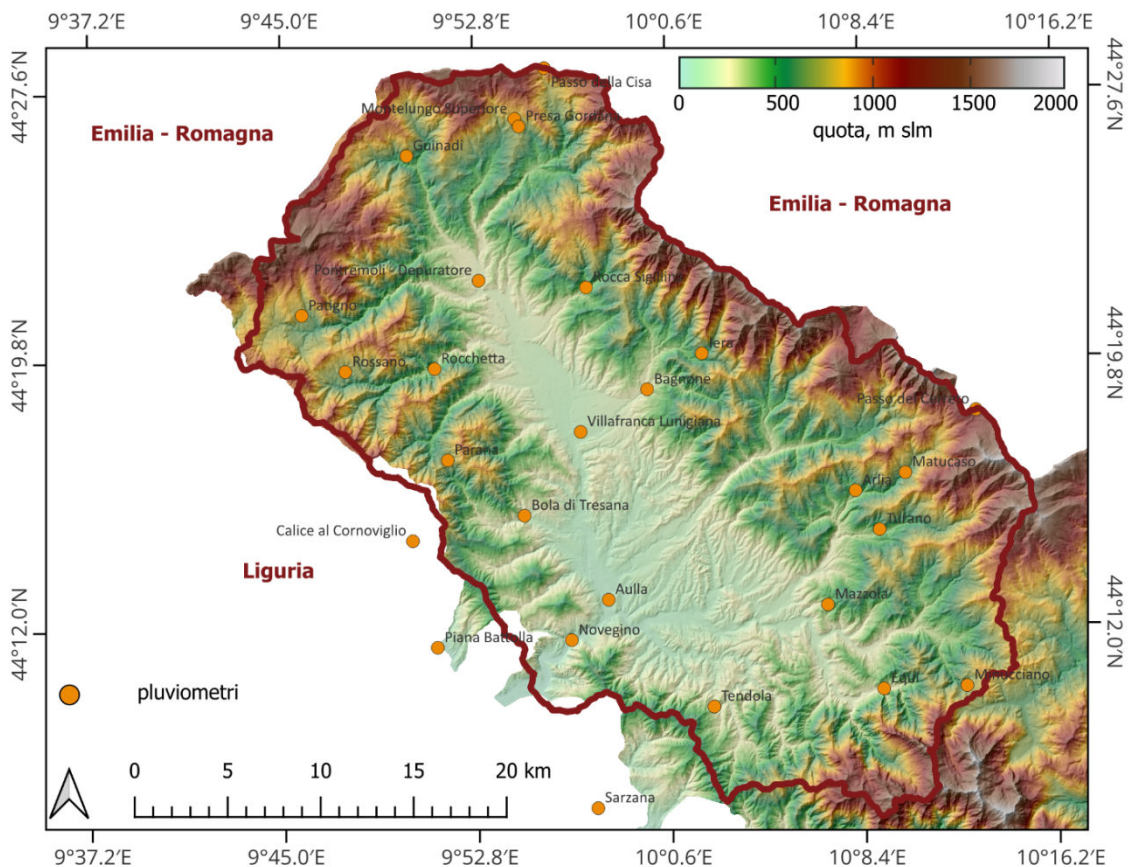


Figura 2.19. Identificazione dei pluviometri all'interno del bacino.

La Figura 2.19 riporta i pluviometri dai quali sono stati raccolti dati di precipitazione a scala mensile. Il numero di pluviometri che presenta dati all'interno della finestra temporale che va dal 1916 al 2023 è ben più ampio rispetto al numero di pluviometri

presenti in figura, tuttavia la scarsità di dati ha fatto sì che molte stazioni non venissero prese in considerazione. Nessuna stazione restituisce un quadro dati completo. Numerose sono le lacune di valori in particolari mensilità o annualità.

È stata fatta – pertanto – una distinzione tra le stazioni in base al quantitativo di dati assenti. Nei pluviometri in cui la mancanza di precipitazione è sporadica, ovvero in mensilità sparse o per piccoli periodi, si è potuto ricostruire il dato mancante attraverso il metodo del National Weather Service, secondo il quale la precipitazione è ottenuta pesando le precipitazioni delle stazioni adiacenti alla stazione d’interesse col quadrato delle distanze dalla stazione col dato mancante. Questo risultato è stato diviso per la somma dei pesi. In questo modo si è ottenuto un quadro completo di precipitazioni per le 27 stazioni riportate in figura. La formula permette di riempire i vuoti lasciati dalla mancanza di misurazioni e garantisce continuità nei dati. Per i pluviometri per i quali l’assenza di valori è eccessiva e ripetuta negli anni, la ricostruzione dei valori mancanti porterebbe esclusivamente ad un aumento dell’errore nei bilanci successivi, andando a sporcare i risultati finali. Si è scelto – perciò – di non prendere in considerazione questi dati. Sono 27 le stazioni analizzate, numero soddisfacente per la rappresentatività del territorio.

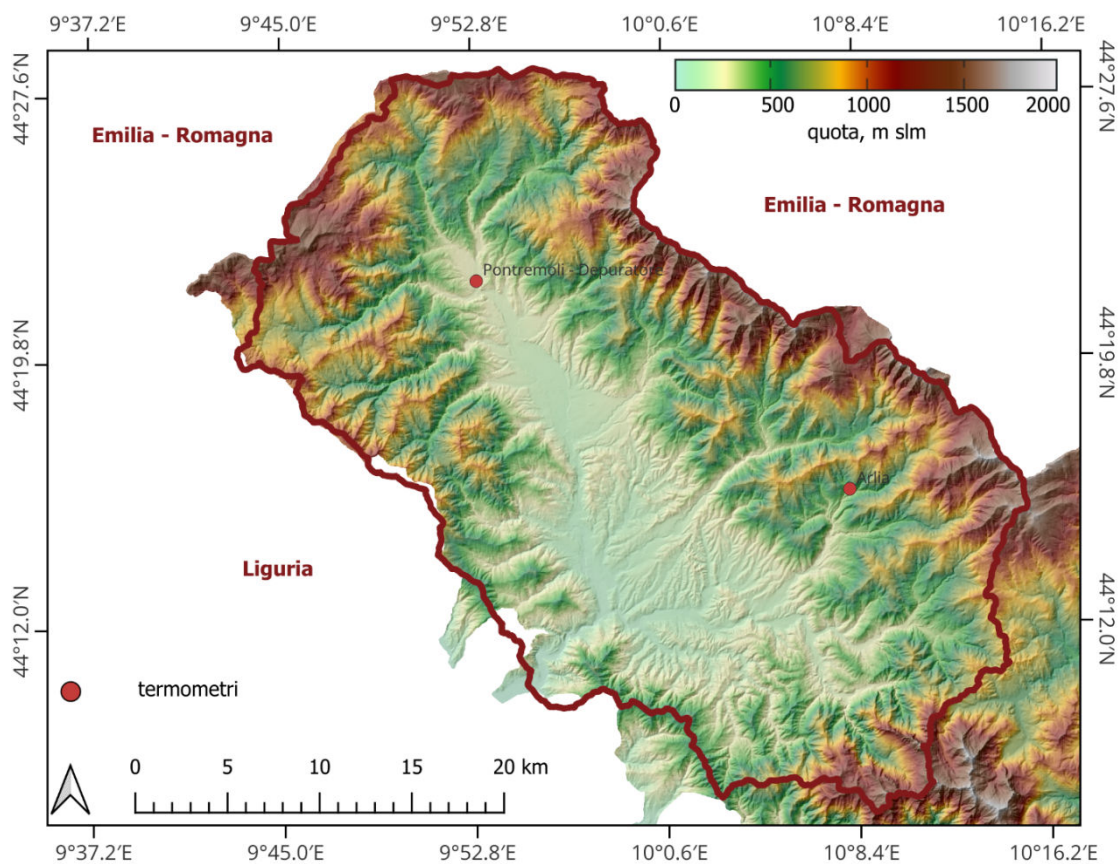


Figura 2.20. Identificazione dei termometri all’interno del bacino.

Nella Figura 2.20 sono riportati i termometri dai quali sono stati raccolti dati di temperatura media mensile, temperatura massima media mensile e temperatura minima media mensile. Una prima osservazione riguarda la finestra temporale all’interno della

quale sono presenti valori di precipitazione: mentre per i pluviometri i dati sono stati raccolti dal 1916 fino al 2023, per i termometri la registrazione di dati inizia dal 1924, perdendo quindi 8 anni di dati; questa lacuna influenza la raccolta dei dati di precipitazione, in quanto nei modelli di bilancio idrologico è fondamentale la sovrapposibilità dei dati, dunque avere dati riferiti alla stessa mensilità. La seconda osservazione riguarda il basso numero di termometri e di termometri effettivamente attivi che forniscano dati: essi sono sia in numero inferiore rispetto ai pluviometri, sia più spogli di dati, impedendo di andare a ricostruire il valore mancante qualora fosse stato necessario. Una terza considerazione ha come oggetto la stazione di Sarzana: nonostante sia una delle poche a raccogliere dati con continuità, è situata in prossimità della costa ligure; ciò non la rende rappresentativa del territorio della Lunigiana, in particolar modo delle località montane; per questo è stato deciso di non prenderla in esame.

Alla luce di quanto detto, i termometri di Pontremoli e di Arlia sono le uniche due stazioni che riportano dati con continuità e rappresentative del bacino idrografico. Tuttavia, anche in questo caso si sono dovuti ricostruire dei dati con il metodo del National Weather Service. Entrambe le stazioni iniziano a raccogliere dati dal 1932, restringendo ulteriormente la finestra temporale all'interno della quale si hanno valori di temperatura. La fascia temporale è dunque di 92 anni, dal 1932 al 2023; per garantire la congruenza tra i valori di temperatura ed i valori di precipitazione si è scelto di restringere la finestra all'interno della quale si hanno i dati ricavati dai pluviometri, rinunciando ai primi 16 anni di dati.

Successivamente sono state determinate le aree di pertinenza di ogni pluviometro

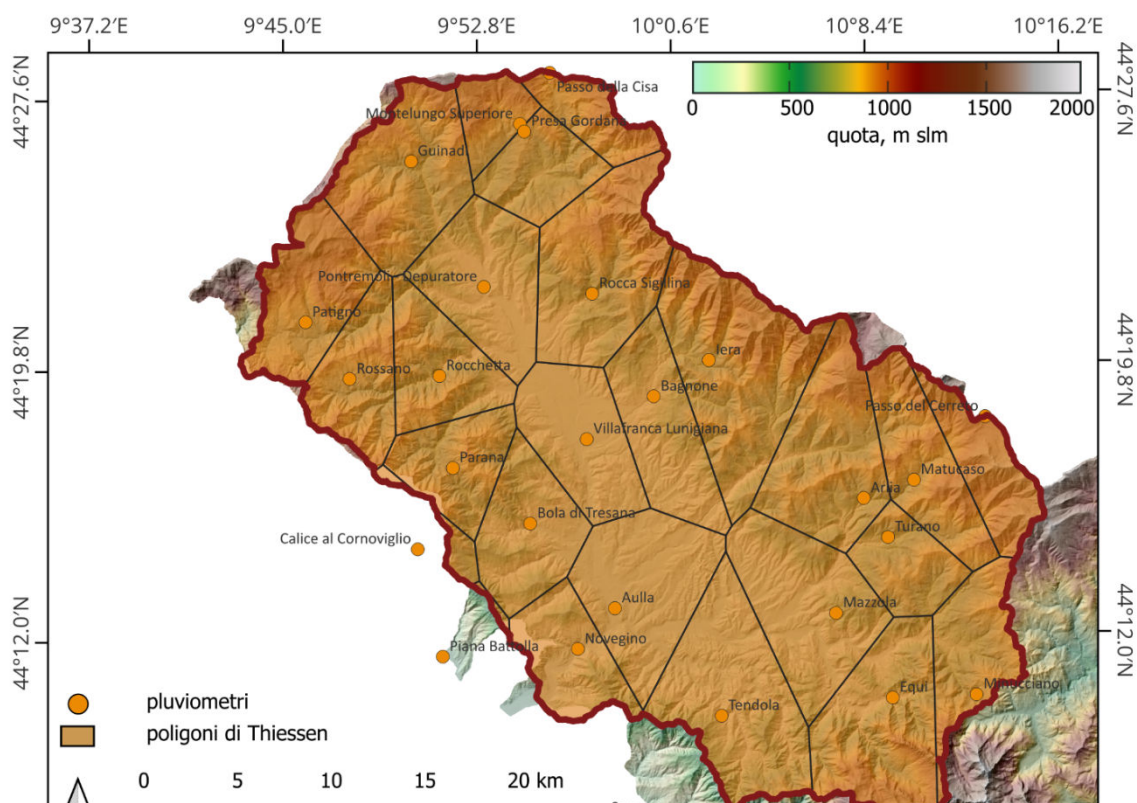


Figura 2.21. Generazione dei Poligoni di Thiessen e identificazione dei 27 pluviometri presi in esame.

attraverso la generazione dei poligoni di Voronoi (Figura 2.21). Attraverso questi ultimi si è ottenuta una media pesata a scala mensile. Nonostante la ricchezza di dati forniti dagli

annali idrologici, le stazioni di Minucciano e di Piana Battolla presentano delle lacune in alcune mensilità, per le quali però non è stato possibile ricostruire il valore di precipitazione mancante. Il problema si è verificato a causa della vicinanza a poche stazioni pluviometriche. Ne sarebbe conseguita – pertanto – una scarsa disponibilità di dati nel caso in cui si fosse deciso di ricostruire il valore della mensilità mancante.

Si è deciso di costruire i poligoni di Thiessen senza le due località, dunque si è ripetuta la procedura descritta. In particolare modo i poligoni illustrati in Figura 2.22 sono stati utilizzati per gli anni 1988, 1993 e 1996, mentre i poligoni in Figura 2.23 sono stati utilizzati per gli anni dal 2013 al 2015 e dal 2018 al 2023.

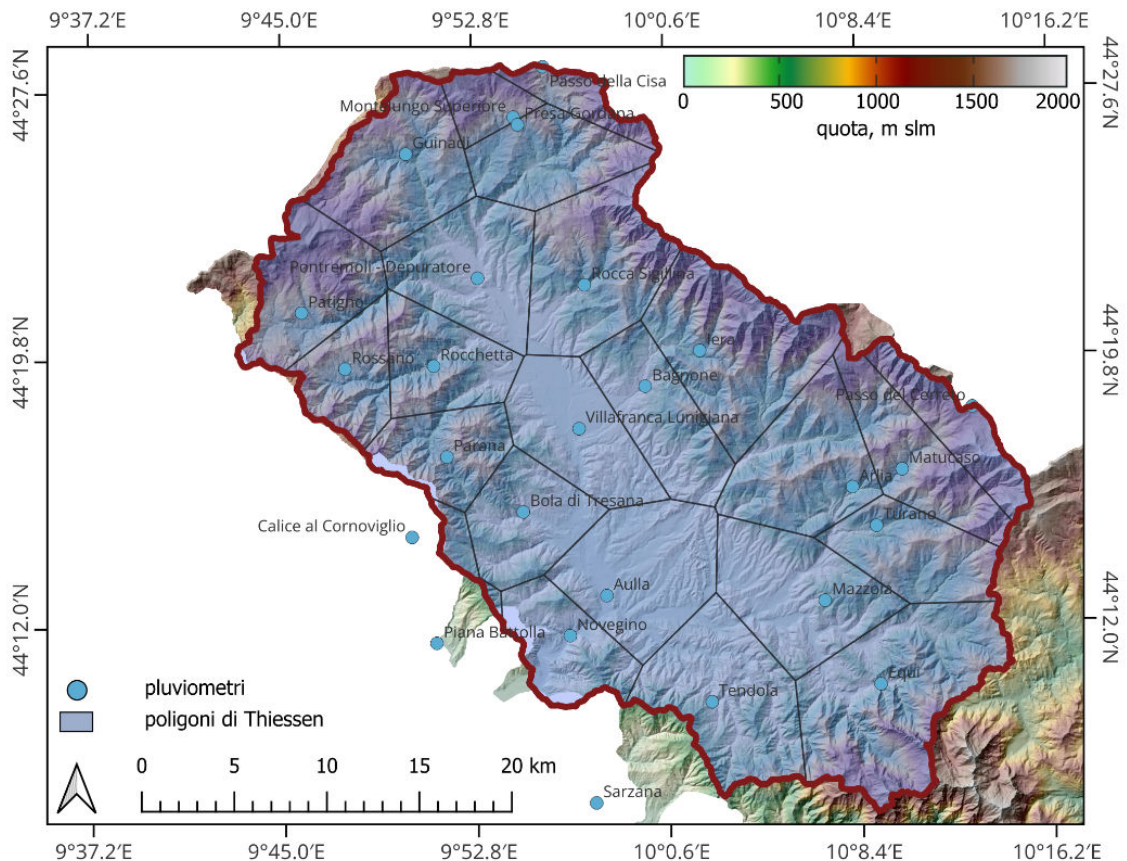


Figura 2.22. Poligoni di Thiessen senza il pluviometro di Minucciano.

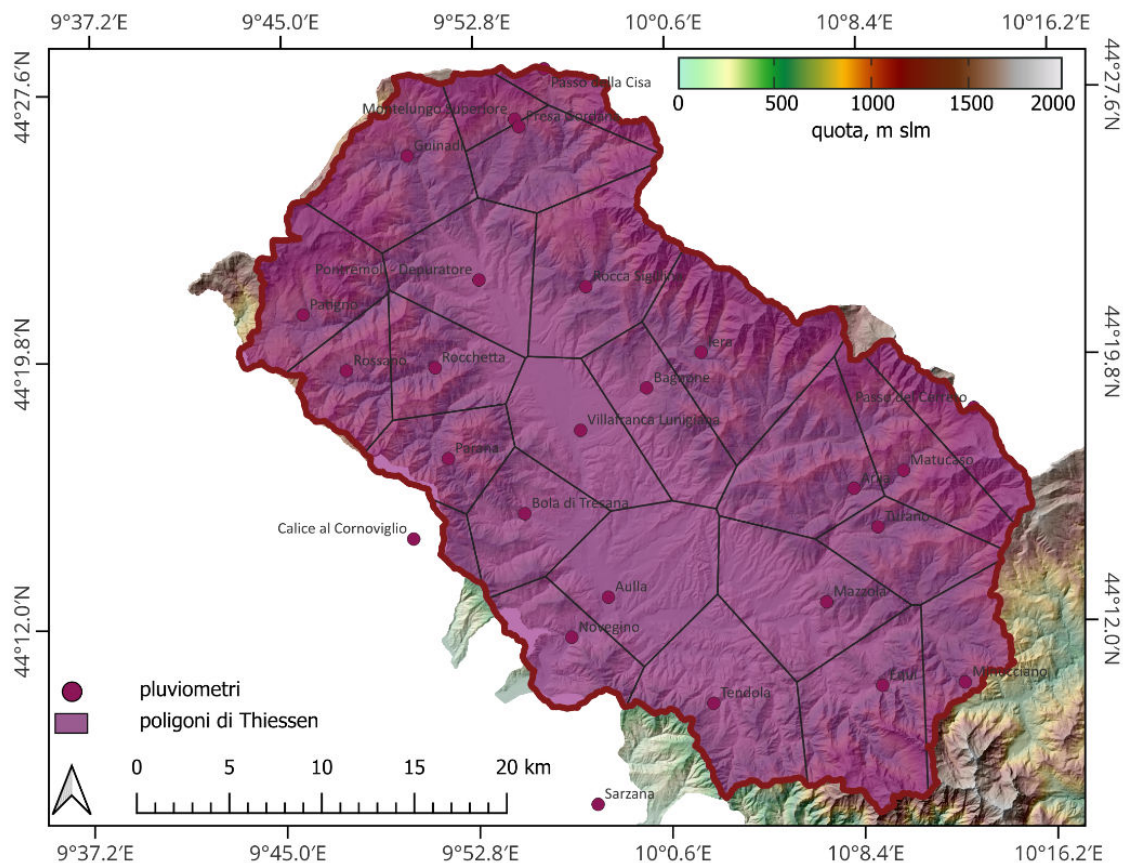


Figura 2.23. Poligoni di Thiessen senza il pluviometro di Piana Battolla.

2.3.2 Bacino idrologico di Mignegno

In seguito all'analisi territoriale e della posizione di ipotetici sbarramenti individuati in studio e descritti in precedenza, si focalizza l'attenzione sul bacino del fiume Magra chiuso a monte dell'abitato di Mignegno come riportato in Figura 2.24.

Il bacino appartiene all'area di pertinenza del termometro di Pontremoli. Sono stati – pertanto – considerati i valori di temperature massime medie mensili, minime medie mensili e medie mensili registrati nella stazione sopracitata, in quanto rappresentativi dell'area oggetto di studio. Per i pluviometri è stato utilizzato il metodo dei poligoni di Thiessen (Figura 2.24). Sono stati selezionati esclusivamente i pluviometri all'interno o nelle immediate vicinanze del sottobacino e calcolati i pesi di ogni singola località. Sulla base dei pesi si sono ricavate le precipitazioni a scala mensile sull'area.

Ottenuti i valori cercati, si è proceduto al calcolo dell'evapotraspirazione potenziale attraverso il metodo di Hargreaves, sfruttando i valori raccolti di temperature massime medie mensili, minime medie mensili e medie mensili.

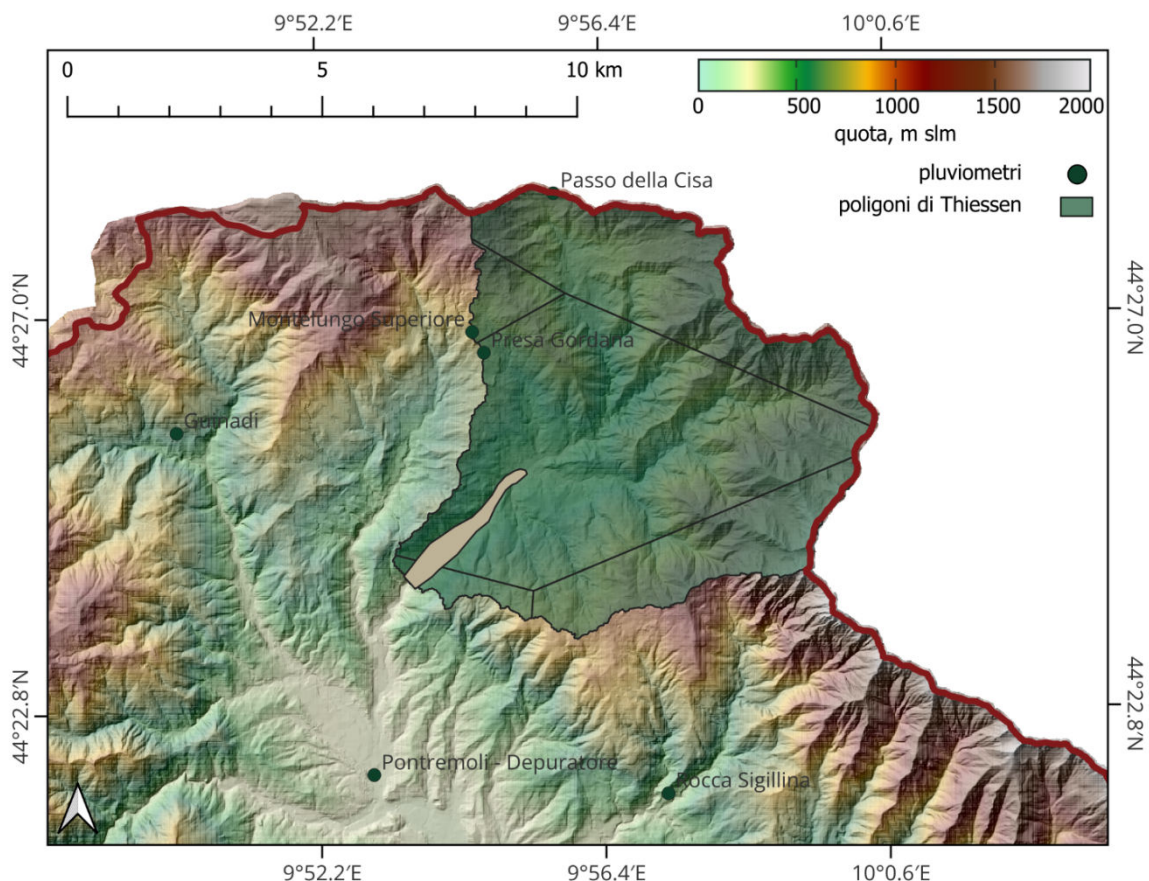


Figura 2.24. Poligoni di Thiessen per il sottobacino di Mignegno.

La formula di Hargreaves (1) utilizzata per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale PET è qui riportata:

$$PET(R_s, T_c) = 0.0135 \cdot R_s \cdot (T_c + 17.8) \quad (1)$$

dove R_s rappresenta la radiazione solare globale giornaliera e misura l'energia solare ricevuta dalla superficie terrestre in MJ/m^2 ; T_c indica la temperatura media dell'aria, espressa in gradi Celsius; 0.0135 riproduce un coefficiente empirico utilizzato per scalare l'equazione in modo appropriato, dipendente dall'unità di misura utilizzata e dalle condizioni specifiche della località studiata. L'espressione $(T_c + 17.8)$ corregge la temperatura per evitare valori negativi e migliorare l'adattamento del modello.

In Figura 2.25 ogni curva rappresenta i valori mensili di evapotraspirazione potenziale annuali secondo il modello di Hargreaves (1). Si nota come il grafico presenta un picco nei mesi estivi, fenomeno dovuto prevalentemente all'aumento significativo di radiazione solare. Il grafico 2.26 – invece – descrive i valori di evapotraspirazione potenziale mensili. In concordanza con quanto descritto per la figura 2.25, si nota come i grafici dei mesi estivi riportino i valori maggiori di evapotraspirazione; al contrario, i valori più bassi di evapotraspirazione potenziale sono associati alle mensilità invernali.

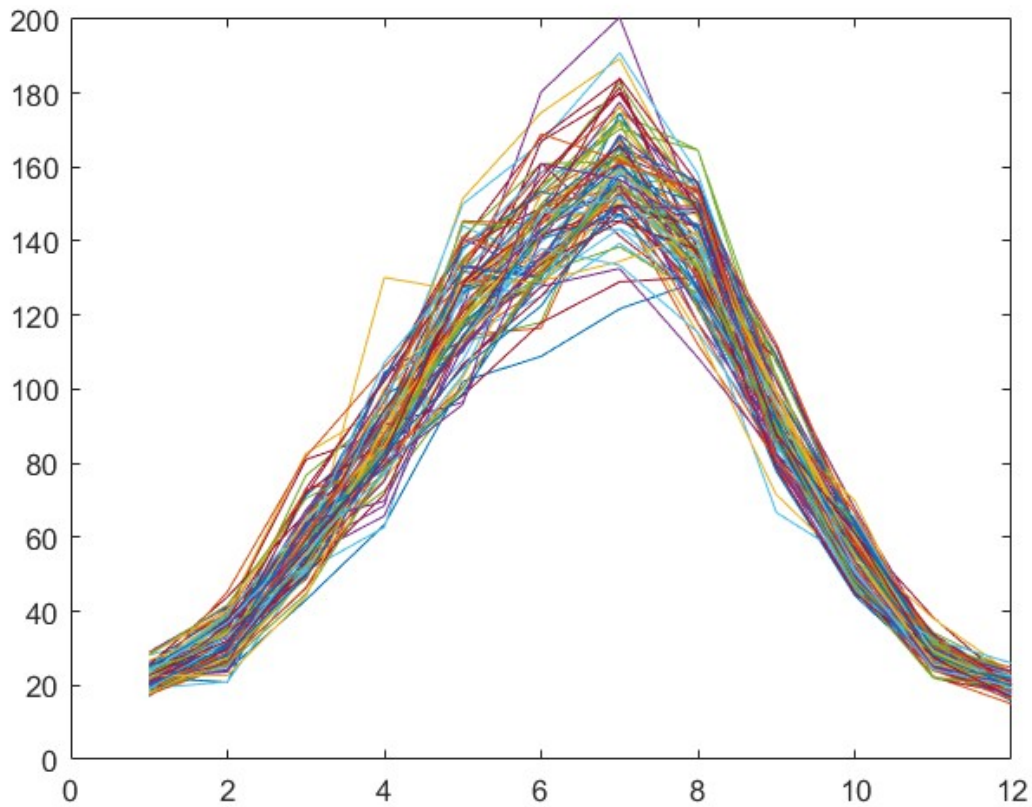


Figura 2.25. Evapotraspirazione Potenziale per ogni annualità dal 1932 al 2023.

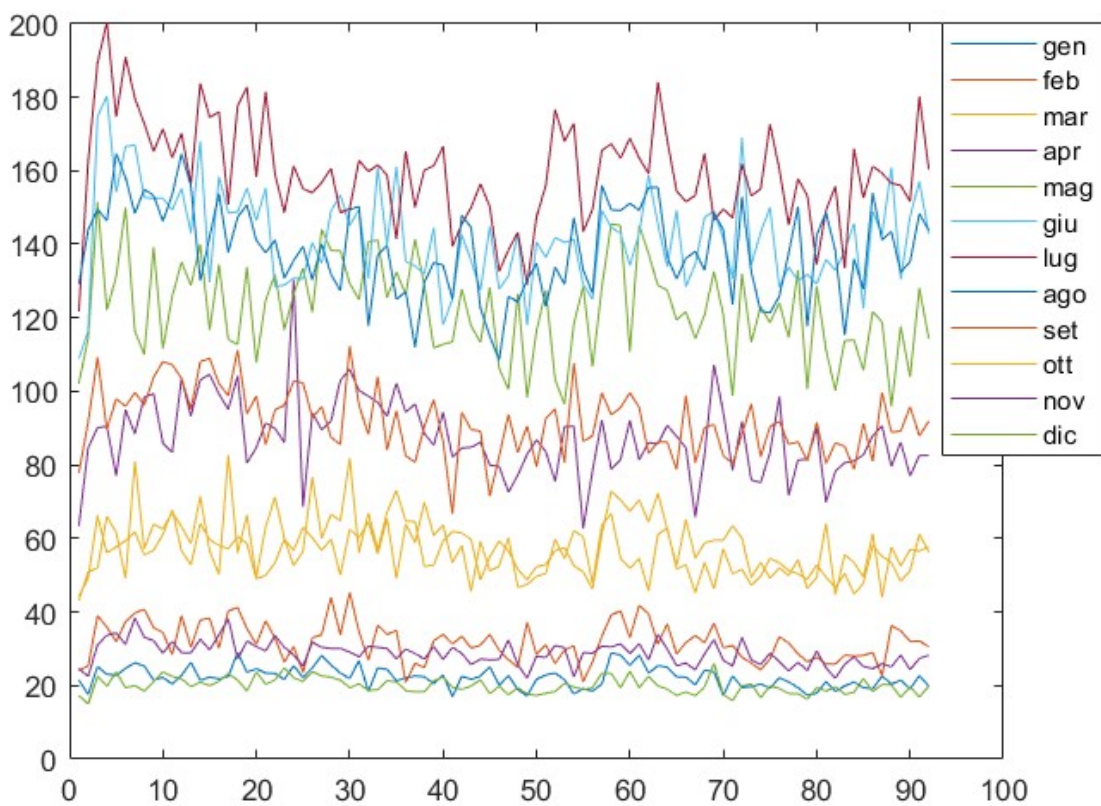


Figura 2.26. Evapotraspirazione Potenziale a scala mensile.

Sulla base dei valori di evapotraspirazione potenziale ottenuti secondo il modello di Hargreaves (1) e utilizzando i dati di precipitazione e temperatura ottenuti dagli annali idrologici, si è potuto implementare il modelli di bilancio idrologico di Thornthwaite (Thornthwaite, 1948; Thornthwaite e Matter, 1955). In particolar modo si è fatto riferimento al T model ed al Water Balance Model, sviluppato dallo stesso Thornthwaite. Entrambi i metodi si basano sull'assunzione secondo la quale il suolo ha una capacità di immagazzinamento del suolo Φ per la quale il valore consigliato è pari a 150 mm. I metodi permettono di stimare il quantitativo di acqua che mensilmente viene immagazzinata nel suolo, ed il runoff, ovvero il deflusso. Conseguentemente al calcolo del runoff è possibile ottenere il coefficiente di runoff rapportando il runoff in una data mensilità con la precipitazione del mese corrispondente. L'evapotraspirazione effettiva AET è altresì stimata attraverso l'utilizzo del modello sopracitato. La Figura 2.27 riporta in grigio le curve rappresentanti il runoff per ogni anno appartenente alla finestra temporale presa in considerazione e in rosso la curva di runoff medio, calcolata conformemente ad una media mensile dei deflussi. Si nota come il deflusso assuma valori prossimi allo zero nelle mensilità estive. Questo trend è conseguenza del calo di precipitazioni e dell'aumento dell'evapotraspirazione nei mesi estivi; il discorso inverso è applicabile alle mensilità autunnali ed invernali, facendo notare come dalla stagione autunnale la curva aumenti la propria pendenza.

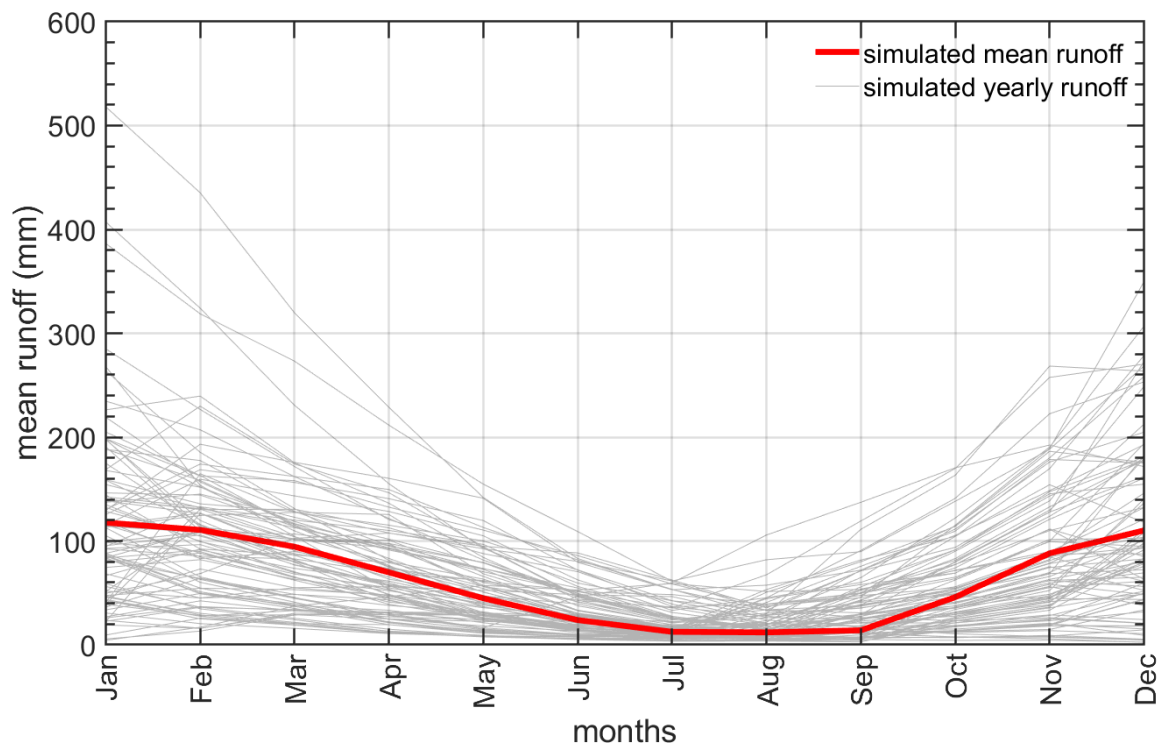


Figura 2.27. Runoff stimato con il modello di bilancio idrologico di Thornthwaite.

Parte III
Alluvioni

3 Alluvioni

3.1 Introduzione

La Parte III dello studio tratterà metodi e modelli con cui è possibile caratterizzare il territorio della Lunigiana dal punto di vista idrologico ed idraulico, in particolare per quanto riguarda il Fiume Magra e i suoi principali affluenti, con lo scopo di valutarne la sicurezza idraulica. Lo studio è inerente al bacino del Fiume Magra chiuso in località Calamazza, Aulla (MS) (Figura 3.1). La scelta di considerare tale area è dovuta al fatto che la maggior parte del territorio della Lunigiana è racchiusa all'interno di tale bacino, inoltre, in località Calamazza è presente un idrometro sul Fiume Magra che fornisce i dati per un confronto dei risultati ottenuti dai modelli.

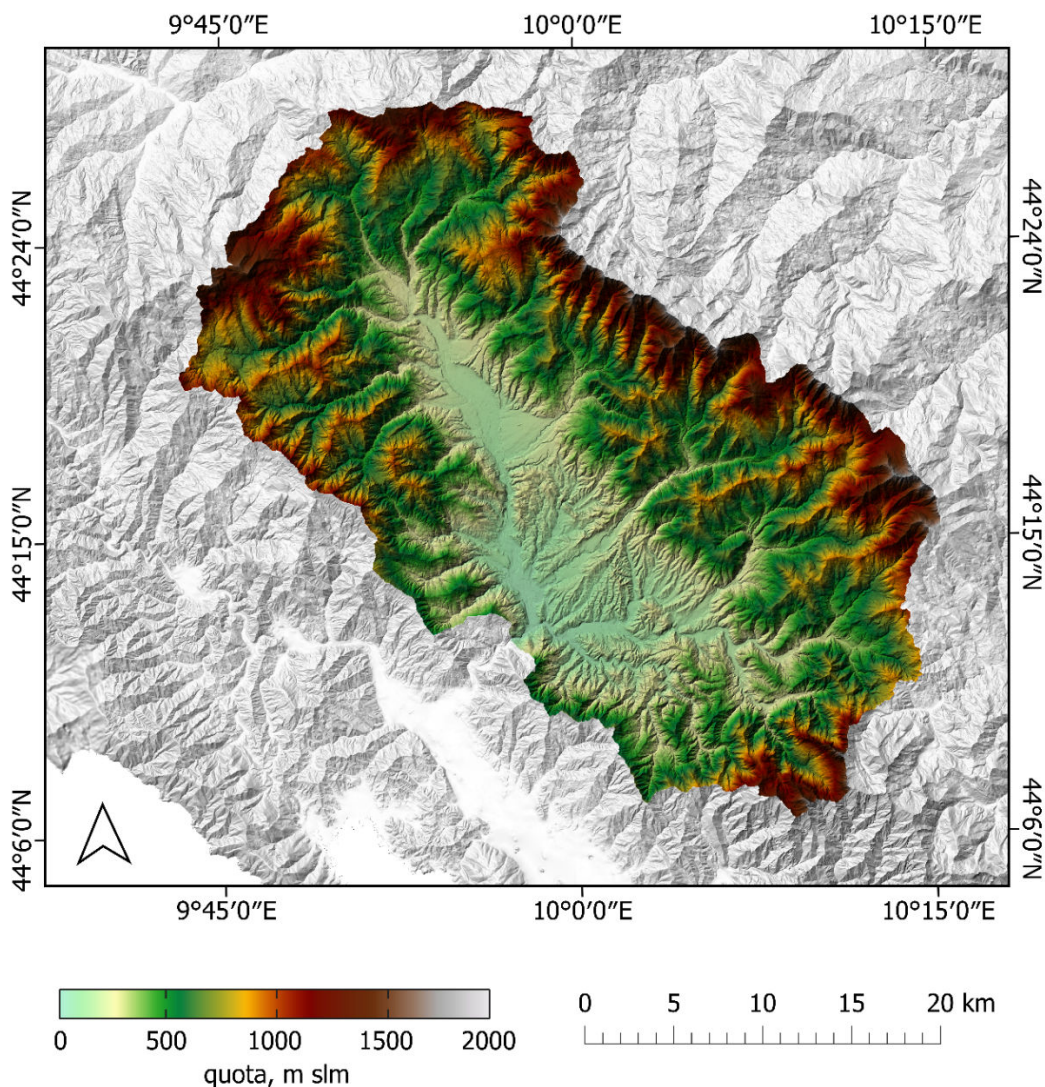


Figura 3.1. Modello digitale del terreno con risoluzione 5 m chiuso in località Calamazza.

Il presente studio si articola in tre fasi:

- modello afflussi-deflussi: viene caratterizzata la porzione di territorio a monte dell'area valliva della Lunigiana dal punto di vista idrologico. In particolare, si individuano i principali affluenti del Fiume Magra e si valuta la risposta alle precipitazioni nei termini di portate uscenti dai bacini di monte per un dato evento. Il modello viene calibrato tramite il confronto con eventi reali;
- modello idraulico: viene modellata l'area valliva tramite il software di modellazione idraulica bidimensionale HEC-RAS 2D in modo da studiare la propagazione delle portate ottenute dal modello afflussi-deflussi per un dato evento. Anche in questo caso il modello viene calibrato tramite il confronto con eventi reali;
- valutazione della sicurezza: tramite i due modelli calibrati, si valutano eventuali criticità dal punto di vista idraulico e si analizza il comportamento delle onde di piena nell'area valliva per eventi rari.

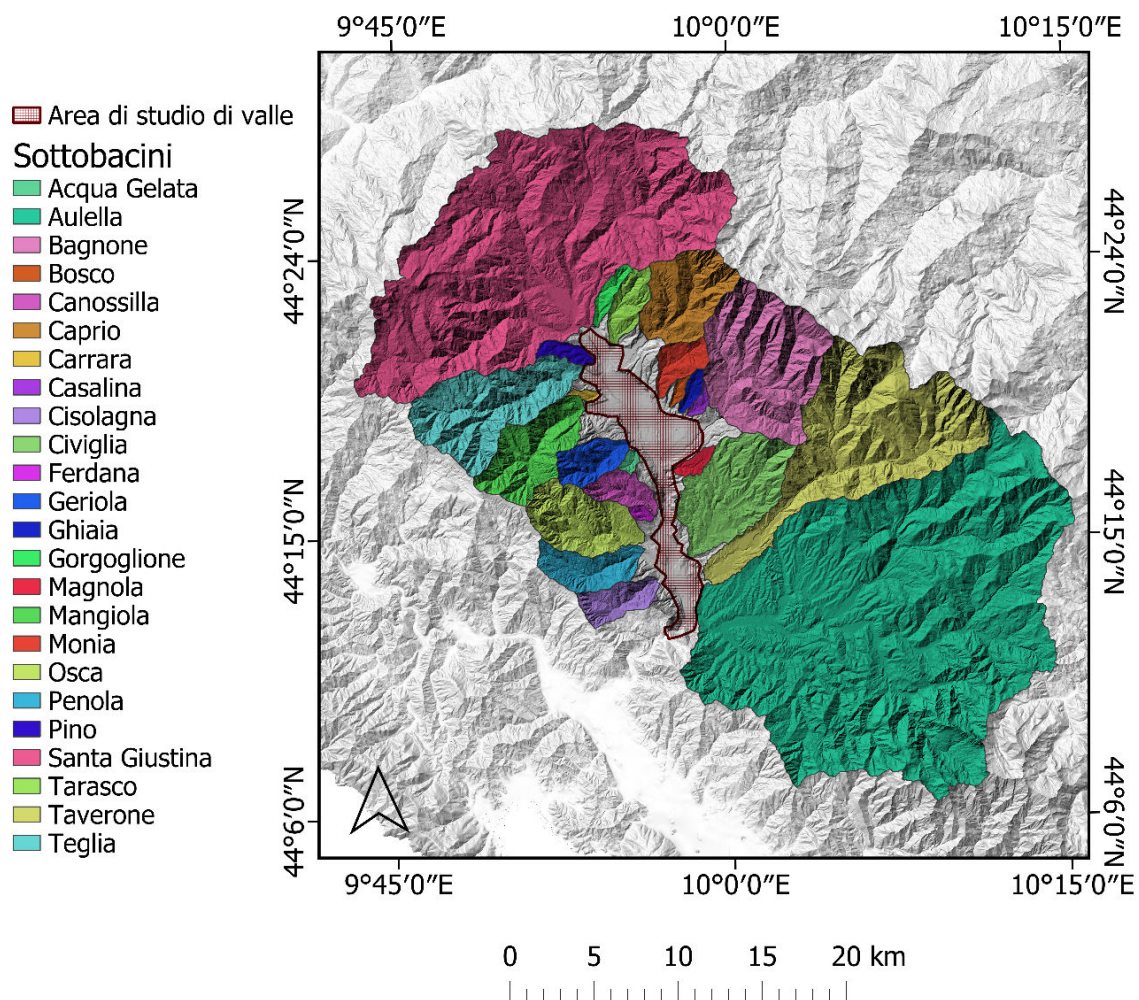


Figura 3.2. Suddivisione del bacino chiuso in località Calamazza in 24 sottobacini di monte e area di studio di valle.

Il bacino del Fiume Magra delineato in Figura 3.1 viene suddiviso in un'area di studio di valle e nei 24 principali sottobacini di monte (Figura 3.2). Ai 24 sottobacini di monte viene applicato il modello afflussi-deflussi che permette di ottenere le portate in uscita da ciascun sottobacino per un determinato evento. Tali portate vengono poi propagate tramite il modello idraulico all'interno dell'area di valle in cui sono presenti i principali centri abitati della zona (Villafranca in Lunigiana, Filattiera, Aulla) che sono considerate le aree più esposte al rischio alluvionale derivante dall'esondazione del Fiume Magra.

L'adozione dei metodi e dei modelli presentati in questo studio permette di:

- valutare le condizioni di rischio idraulico lungo il sistema fluviale del Fiume Magra, in particolare nell'area valliva del territorio della Lunigiana. Grazie al modello calibrato è possibile effettuare simulazioni in cui il bacino è sollecitato con eventi rari per avere una valutazione sullo stato attuale della sicurezza del territorio;
- predisporre dei sistemi di simulazione delle inondazioni come supporto decisionale nelle emergenze e nella pianificazione territoriale. Il modello può essere impiegato per fornire simulazioni sull'andamento delle onde di piena o delle eventuali esondazioni in tempo reale, individuando aree a rischio maggiore o facendo valutazioni sui tempi di arrivo o sulle velocità dei flussi (Pizzileo et al., 2024). Nel modello idraulico è inoltre possibile implementare le geometrie di ponti, argini, muri di sostegno o altre infrastrutture e opere di protezione idraulica per valutare il loro impatto nei confronti di eventi con determinate probabilità di accadimento;
- fornire uno strumento di supporto nella valutazione della compatibilità dei processi di rinaturalizzazione dei versanti e dei corsi d'acqua con la sicurezza idraulica del territorio.

3.2 Modellazione afflussi-deflussi

Il modello afflussi-deflussi presentato in questo studio è un modello concentrato che, a partire dai dati di precipitazione in ingresso nel bacino e dalla capacità di produrre deflusso superficiale, individua la precipitazione efficace o pioggia netta, ovvero l'aliquota della precipitazione che non viene trattenuta dal bacino e che genera deflusso superficiale. In base alle caratteristiche morfometriche, la precipitazione efficace viene convertita in portata uscente dal bacino, ovvero l'idrogramma di piena. Uno schema concettuale del modello è presentato in Figura 3.3. Tale modello, una volta calibrato in funzione delle caratteristiche dei sottobacini in cui è presente un idrometro alla sezione di chiusura per il confronto dei risultati, viene applicato ai 24 sottobacini di monte illustrati in Figura 3.2. In questa sede vengono presentati i processi e i risultati per il sottobacino denominato Santa Giustina (Figura 3.4), ovvero il bacino del Fiume Magra chiuso in località S. Giustina, Pontremoli (MS).

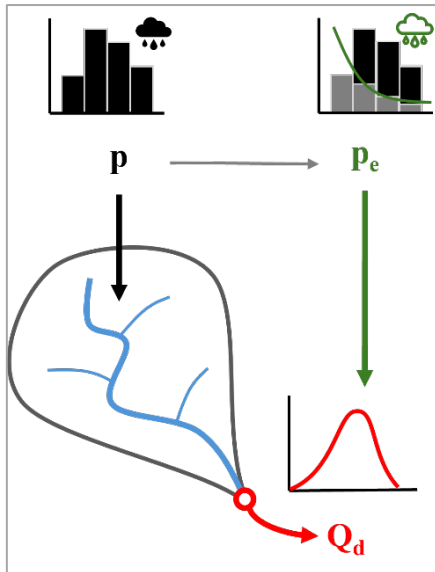


Figura 3.3. Schema concettuale del modello afflussi-deflussi e identificazione della precipitazione in ingresso nel bacino (p), della precipitazione efficace (p_e) e della portata in uscita dal bacino (direct runoff, Q_d).



Figura 3.4. Bacino del Fiume Magra chiuso in località Calamazza, Aulla (MS) in grigio. Sottobacino del Fiume Magra chiuso in località Santa Giustina a Pontremoli (MS) in rosso.

Le principali ipotesi del modello sono:

- modello spazialmente concentrato;
- precipitazione uniforme sul bacino;
- linearità e stazionarietà della trasformazione degli afflussi (p) in deflussi (Q_d).

3.2.1 Analisi dei dati

Di seguito viene mostrato come sono stati raccolti e analizzati i dati impiegati nel modello afflussi-deflussi, in particolare:

- precipitazione in ingresso nel bacino;
- tipi idrologici, ovvero la suddivisione dell'area del bacino secondo la classificazione del SCS (Soil Conservation Service) in base alla capacità del suolo di produrre deflusso superficiale, necessaria per individuare la precipitazione efficace;
- DTM, ovvero il modello digitale del terreno per caratterizzare il bacino dal punto di vista morfometrico, ai fini di stabilire la risposta alla precipitazione e alla conseguente valutazione dell'idrogramma di piena.
- dati idrometrici e scale di deflusso per il confronto dei risultati ottenuti.

3.2.1.1 Analisi dei dati

Viene analizzata la finestra temporale che va dal 1° gennaio 2017 al 31 dicembre 2021. In tale finestra risultano attivi i pluviometri elencati in Tabella 3-1.

Tabella 3-1. Pluviometri attivi sul portale SIR (Servizio Idrologico Regionale, Toscana) per il bacino del Fiume Magra chiuso in località Calamazza, Aulla (MS).

id_stazion	nome	comune	provincia	quota m s.l.m.
TOS09001061	Patigno	Zeri	MS	744
TOS02000047	Vergheto	Massa	MS	845
TOS02000155	Passo Pradarena	Sillano Giuncugnano	LU	1580
TOS02000161	Capanne di Sillano	Sillano Giuncugnano	LU	1035
TOS02000177	Orto di Donna	Minucciano	LU	1070
TOS03000109	Soliera	Fivizzano	MS	120
TOS09000015	Bagnone	Bagnone	MS	195
TOS09000021	Licciana Nardi	Licciana Nardi	MS	121
TOS09000022	Pietra Piccata	Pontremoli	MS	955
TOS09000023	Bosco di Rossano	Zeri	MS	670
TOS09000024	Passo del Brattello	Pontremoli	MS	955
TOS09001053	Passo della Cisa	Pontremoli	MS	1014
TOS09001088	Rocca Sigillina	Filattiera	MS	484
TOS09001110	Parana	Mulazzo	MS	695
TOS09001120	Villafranca120	Villafranca Lunigiana	MS	121
TOS09001130	Iera	Bagnone	MS	538
TOS09001143	Comano	Comano	MS	734
TOS09001160	Passo del Cerreto	Fivizzano	MS	1250
TOS09001180	Turano	Fivizzano	MS	500
TOS09001200	Mazzola	Fivizzano	MS	460
TOS09001210	Minucciano	Minucciano	LU	666
TOS09001220	Equi Terme	Fivizzano	MS	250
TOS09001230	Tendola	Fosdinovo	MS	410
TOS11000029	Campocecina	Carrara	MS	960
TOS11000034	Piazza al Serchio	Piazza Al Serchio	LU	660
TOS11000099	Novegigola	Tresana	MS	420
TOS11000100	Villafranca100	Villafranca in Lunigiana	MS	156
TOS11000101	Pontremoli	Pontremoli	MS	340

I dati sono pubblicati sul Portale della Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile del Servizio Idrologico Regionale (SIR) della Regione Toscana. Si sceglie il dato di precipitazione cumulata di durata 15 minuti poiché è il dato con l'intervallo di tempo minore tra quelli disponibili. Essendo il modello concentrato e la precipitazione uniforme sul bacino, è necessario ottenere il maggior numero di dati dalle stazioni pluviometriche in modo da pesare il contributo di ciascun pluviometro in funzione dell'area di influenza. In Figura 3.5 è mostrata la suddivisione del bacino del Fiume Magra chiuso in località Calamazza in base alle aree di influenza di ciascun pluviometro attivo, secondo il metodo dei poligoni di Thiessen.

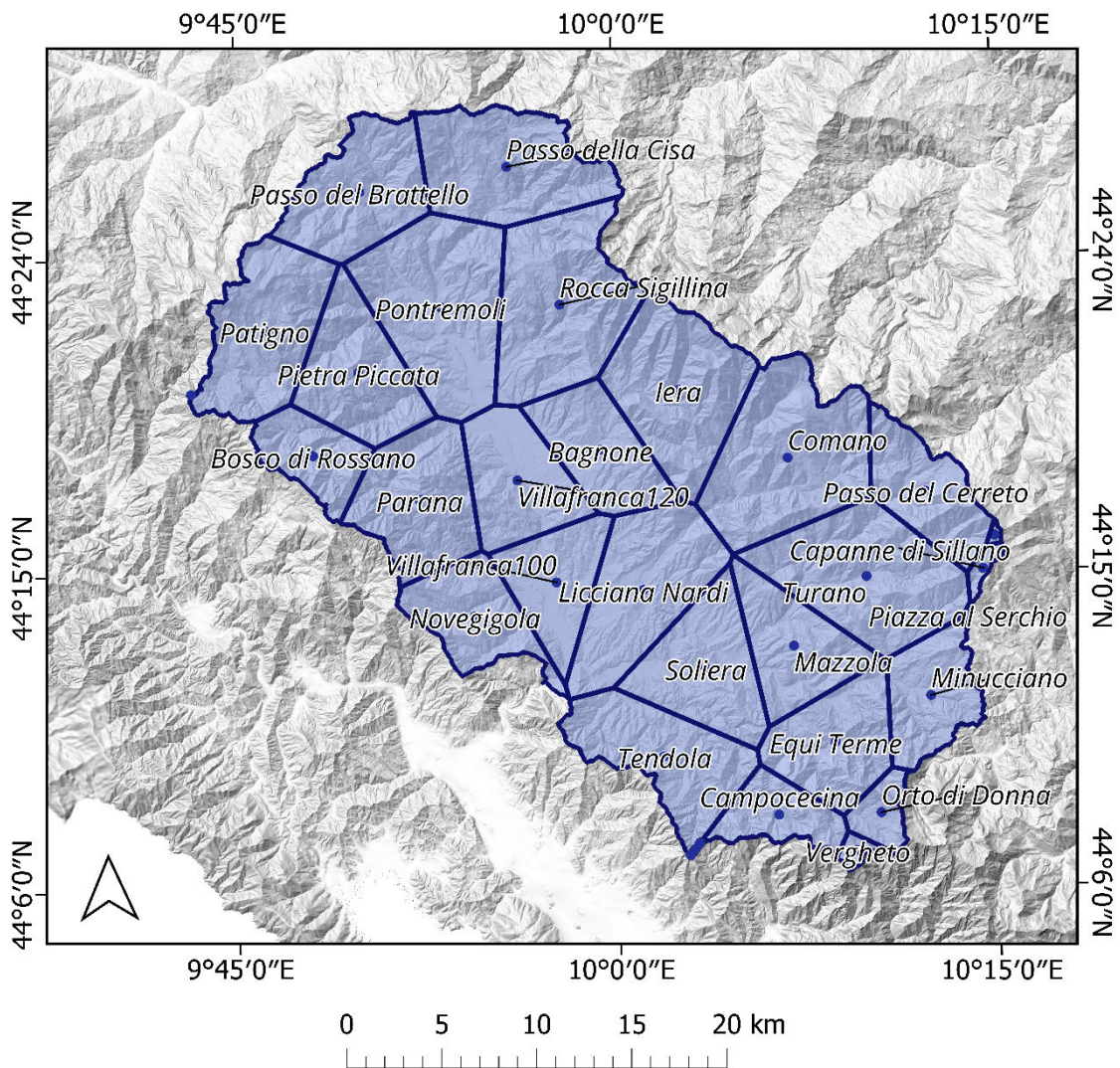


Figura 3.3. Pluviometri attivi nel bacino del Fiume Magra chiuso in località Calamazza, Aulla (MS). Suddivisione del bacino in aree di influenza relative a ciascun pluviometro secondo i poligoni di Thiessen.

La suddivisione del bacino in aree d'influenza di ciascun pluviometro viene fatta per ciascuno dei 24 sottobacini considerati. A titolo esemplificativo viene mostrata la suddivisione per il sottobacino di Santa Giustina in Figura 3.6

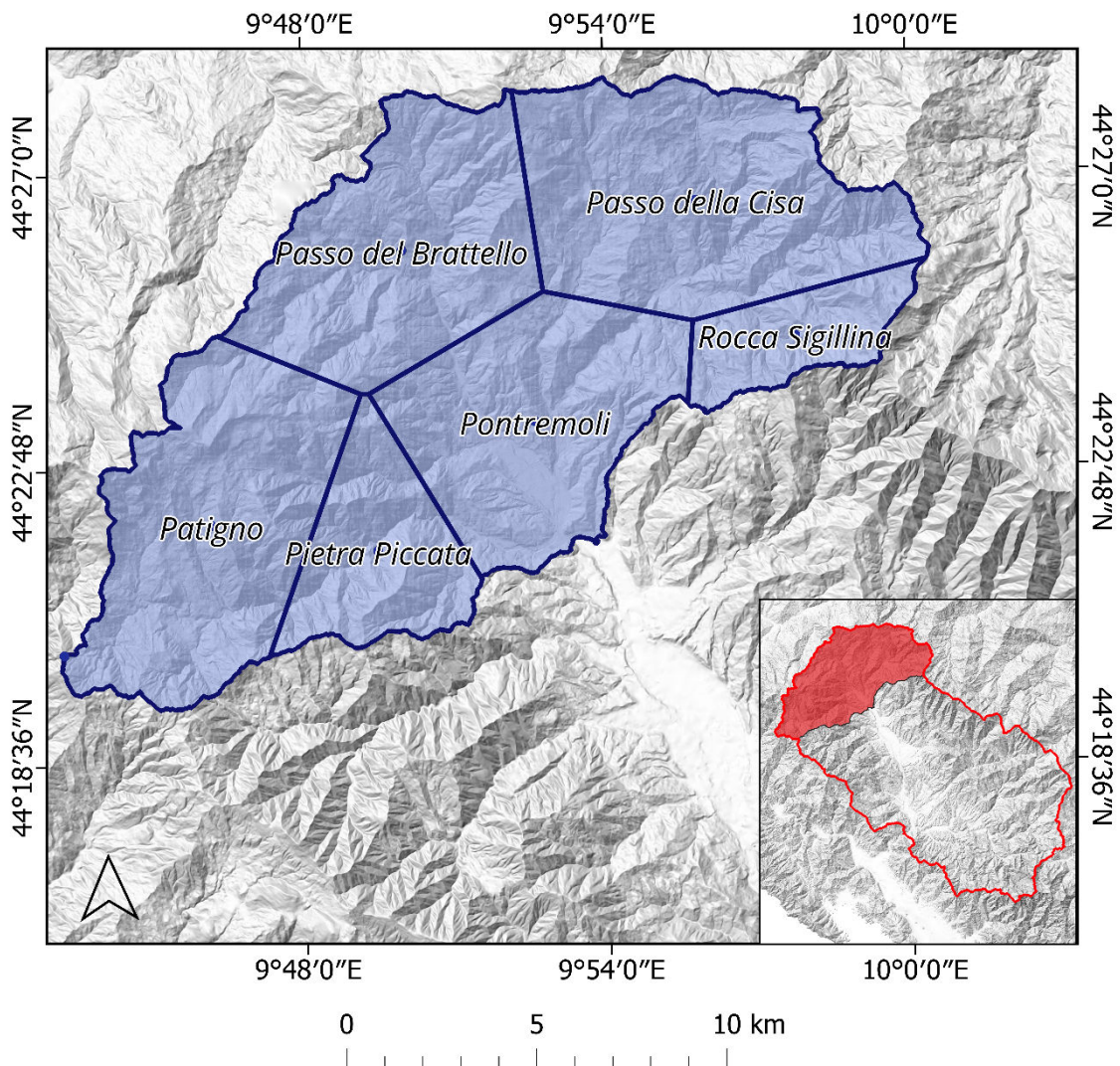


Figura 3.4. Pluviometri attivi nel sottobacino di Santa Giustina e suddivisione in poligoni di Thiessen.

Tabella 3-2. Pluviometri attivi sul Portale SIR – Regione Toscana per il sottobacino Santa Giustina.

id_stazion	nome	comune	provincia	quota m s.l.m.	area km ²	peso -
TOS09001061	Patigno	Zeri	MS	744	45.714	0.221
TOS09000022	Pietra Piccata	Pontremoli	MS	955	20.042	0.097
TOS09000024	Passo del Brattello	Pontremoli	MS	955	40.427	0.196
TOS09001053	Passo della Cisa	Pontremoli	MS	1014	49.237	0.239
TOS09001088	Rocca Sigillina	Filattiera	MS	484	12.599	0.061
TOS11000101	Pontremoli	Pontremoli	MS	340	38.373	0.186
				Tot.	206.391	1.000

Per un generico sottobacino con M pluviometri che afferiscono all'area di drenaggio vale:

$$p_i = \sum_{j=1}^M p_{i,j} \cdot w_j \quad (2)$$

dove:

$p_{i,j}$ è il valore di intensità di precipitazione nell'intervallo i-esimo registrato dal pluviometro j-esimo;

$w_j = \frac{A_j}{\sum_{j=1}^M A_j}$, è il peso associato al dato di ciascun pluviometro in base alla sua area di influenza (indicato con "peso" in Tabella 3-2);

A_j è l'area d'influenza del pluviometro j-esimo;

p_i è il valore di intensità di precipitazione uniforme per l'intervallo di tempo i-esimo.

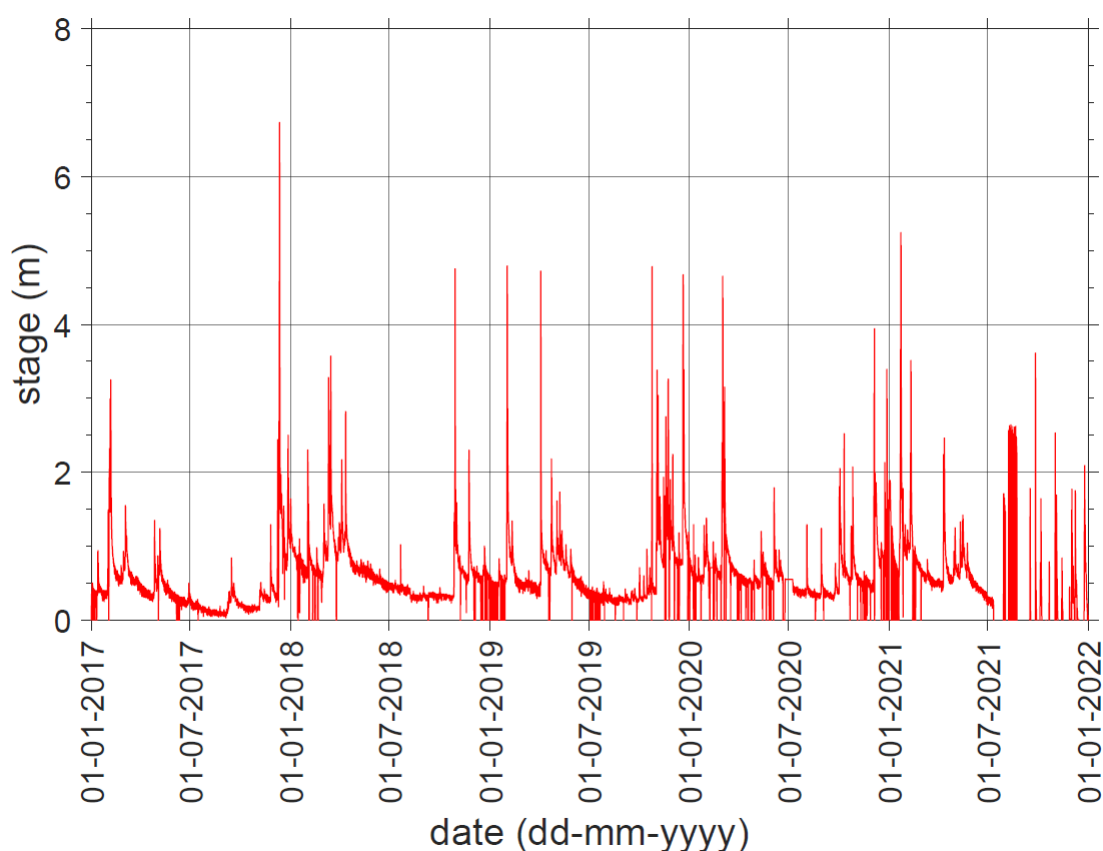


Figura 3.5. Fiume Magra, livello idrometrico a Calamazza, Aulla (MS) nel periodo dal 1/1/2017 al 31/12/2021.

È stato scelto l'evento del 12 dicembre 2017: analizzando i dati idrometrici rilevati dall'idrometro sul Fiume Magra posto in località Calamazza, Aulla (MS) si evince come in tale data occorra l'evento più intenso all'interno della finestra temporale analizzata (Figura 3.7 e Figura 3.8).

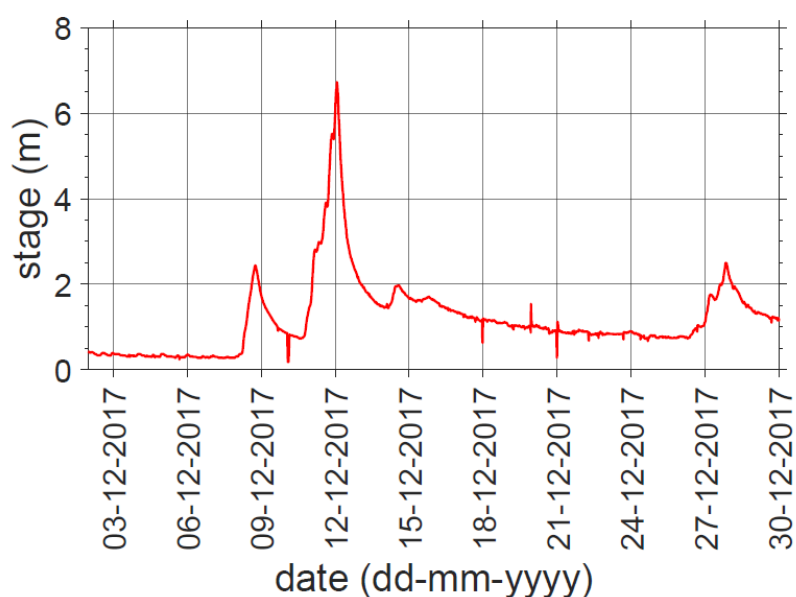


Figura 3.6. Fiume Magra, livello idrometrico a Calamazza, Aulla (MS), dicembre 2017.

3.2.1.2 Tipi idrologici

Per la valutazione della precipitazione efficace viene suddivisa l'area del bacino in tipi idrologici. In considerazione della classificazione del Soil Conservation Service (SCS), vengono individuate le porzioni di territorio che corrispondono a suoli con diversa capacità di produrre deflusso superficiale (Tabella 3-3). I dati sono pubblicati da Regione Toscana tramite il Sistema Informativo Territoriale ed Ambientale e sono ottenuti tramite il sistema WebGIS Geoscopio. L'informazione relativa ai tipi idrologici è contenuta all'interno del Database Pedologico (DB Pedologico).

Tabella 3-3. Descrizione dei tipi idrologici di suolo secondo Soil Conservation Service (SCS).

Tipo idrologico di suolo	Descrizione
A	Scarsa potenzialità di deflusso.
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa.
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta.
D	Potenzialità di deflusso molto alta.

In Figura 3.9 è rappresentata la suddivisione del sottobacino di Santa Giustina in tipi idrologici secondo l'SCS.

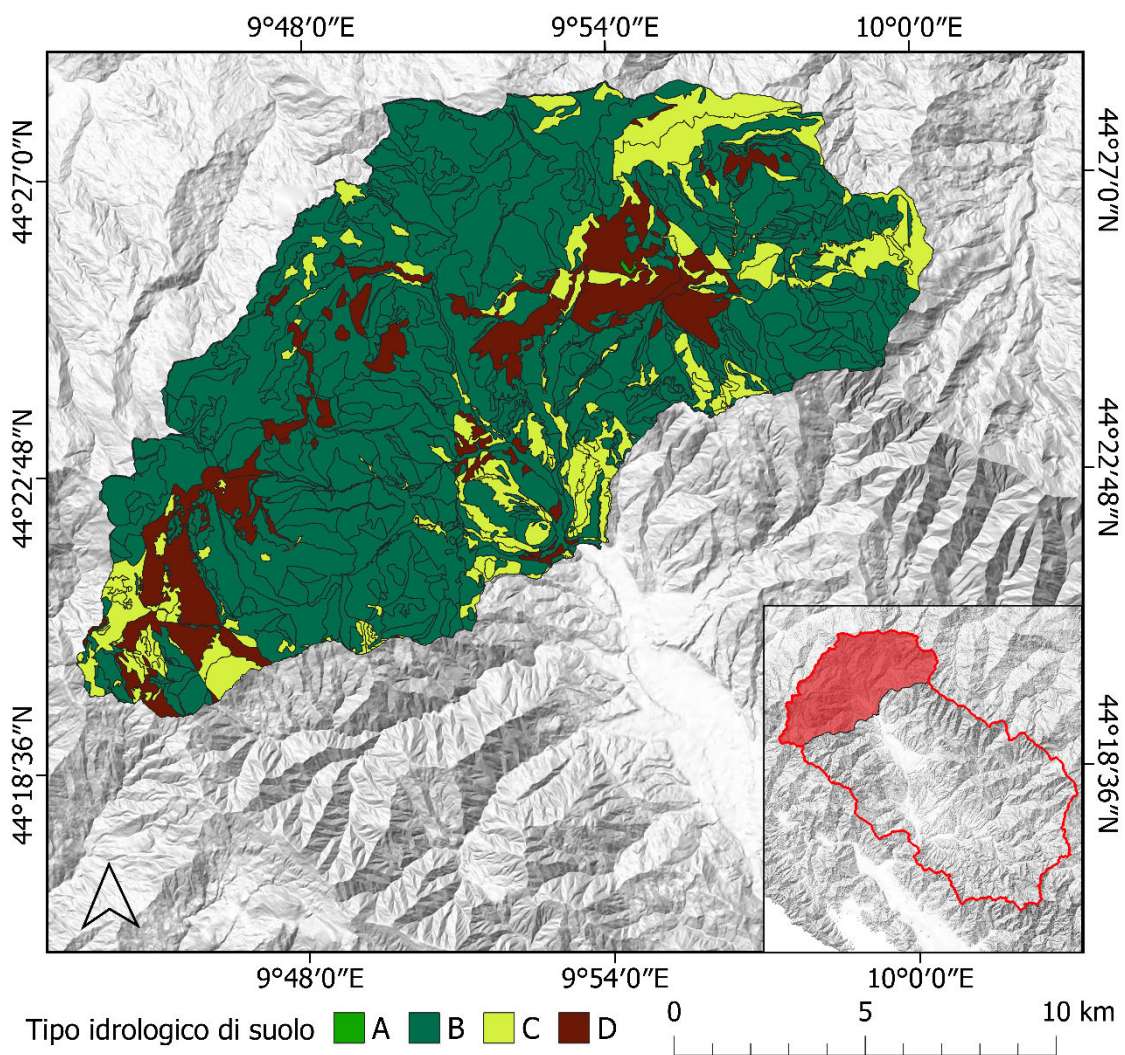


Figura 3.7. Suddivisione del sottobacino di Santa Giustina in tipi idrologici secondo il Soil Conservation Service (SCS). Dato ricavato dal DB Pedologico – SIPT Regione Toscana.

Tabella 3-4. Aree di tipo idrologico di suolo (SCS) per il sottobacino di Santa Giustina.

Tipo idrologico di suolo	Descrizione	Area km ²
A	Scarsa potenzialità di deflusso.	0.069
B	Potenzialità di deflusso moderatamente bassa.	149.5
C	Potenzialità di deflusso moderatamente alta.	32.1
D	Potenzialità di deflusso molto alta.	23.9
		Tot. 206.3

Per ciascun tipo di suolo verrà eseguito un bilancio verticale (monodimensionale) tramite il modello basato sull'equazione di Philip per valutare l'intensità di precipitazione efficace. Tale intensità verrà poi moltiplicata per l'area di ciascun tipo di suolo relativo al sottobacino per ottenere il flusso di precipitazione efficace in ingresso al sottobacino.

3.2.1.3 DTM

Il modello digitale del terreno (DTM) è lo strumento che permette di ottenere la descrizione morfometrica di un bacino per caratterizzarlo dal punto di vista idrologico attraverso algoritmi di terrain analysis. Il DTM è un dato tipo raster in cui al centro di ogni cella di determinate dimensioni è associato il valore della quota del terreno ottenuta tramite rilievo lidar. La dimensione della cella varia in base alla risoluzione: maggiore è la risoluzione, maggiore è il livello di dettaglio che si raggiunge nella descrizione della superficie reale. Nelle sezioni successive verrà mostrato come si ricavano i reticoli di drenaggio e altri dati di tipo raster (maximum flow path length, upslope area) tramite software GIS, a partire dal dato DTM. Queste elaborazioni vengono impiegate nel calcolo della risposta del bacino alla precipitazione in ingresso. Per l'ottenimento di tali strumenti è necessario che il DTM abbia una risoluzione omogenea. Non è disponibile un'unica fonte del dato DTM a risoluzione omogenea che copra interamente il bacino del Fiume Magra considerato. Vengono – quindi – combinati quattro diversi modelli digitali del terreno, in modo da avere la copertura totale dell'area di studio:

- DTM 5 m x 5 m Regione Emilia-Romagna (Geoportale Regione Emilia-Romagna);
- DTM 10 m x 10 m Regione Toscana (SIPT Cartoteca Regione Toscana);
- DTM 1 m x 1 m Regione Toscana (SIPT Cartoteca Regione Toscana);
- DTM 5 m x 5 m Regione Liguria (Geoportale Regione Liguria).

Sebbene il DTM fornito dalla Regione Toscana (1 m) risulti particolarmente dettagliato, tuttavia, il dato non copre interamente l'area di studio del bacino del Fiume Magra (Figura 3.10). Viene quindi ricampionato a risoluzione 5 m × 5 m e combinato con i DTM della Regione Emilia-Romagna (Figura 3.11) e della Regione Liguria (Figura 3.12). Per colmare la mancanza del dato in alcune porzioni interne non coperte da nessuno dei DTM precedenti, è stato ricampionato il DTM a risoluzione 10 m x 10 m della Regione Toscana (Figura 3.13) a 5 m × 5 m e combinato con i DTM precedenti, in modo da avere il dato completo con risoluzione omogenea (Figura 3.14). Questo dato viene utilizzato per produrre le elaborazioni necessarie per il calcolo della risposta del bacino all'interno del modello afflussi-deflussi.

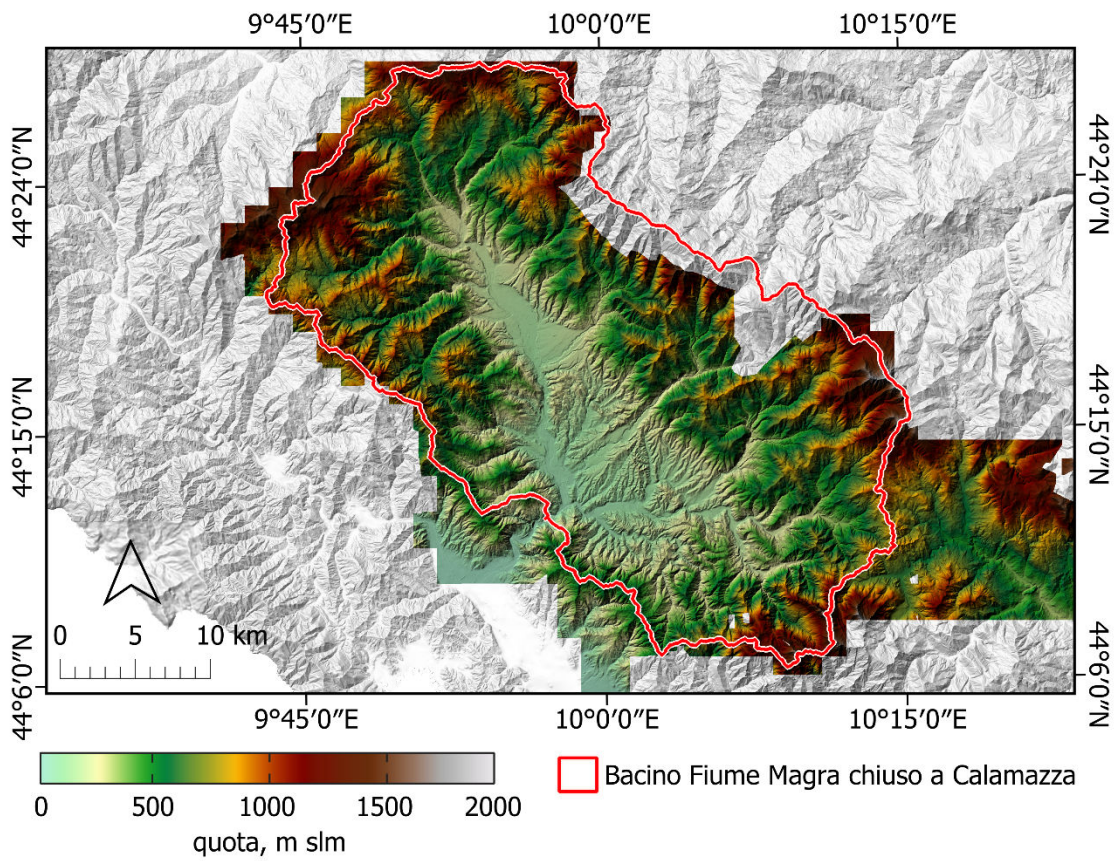


Figura 3.8. DTM 1 m × 1 m Regione Toscana.

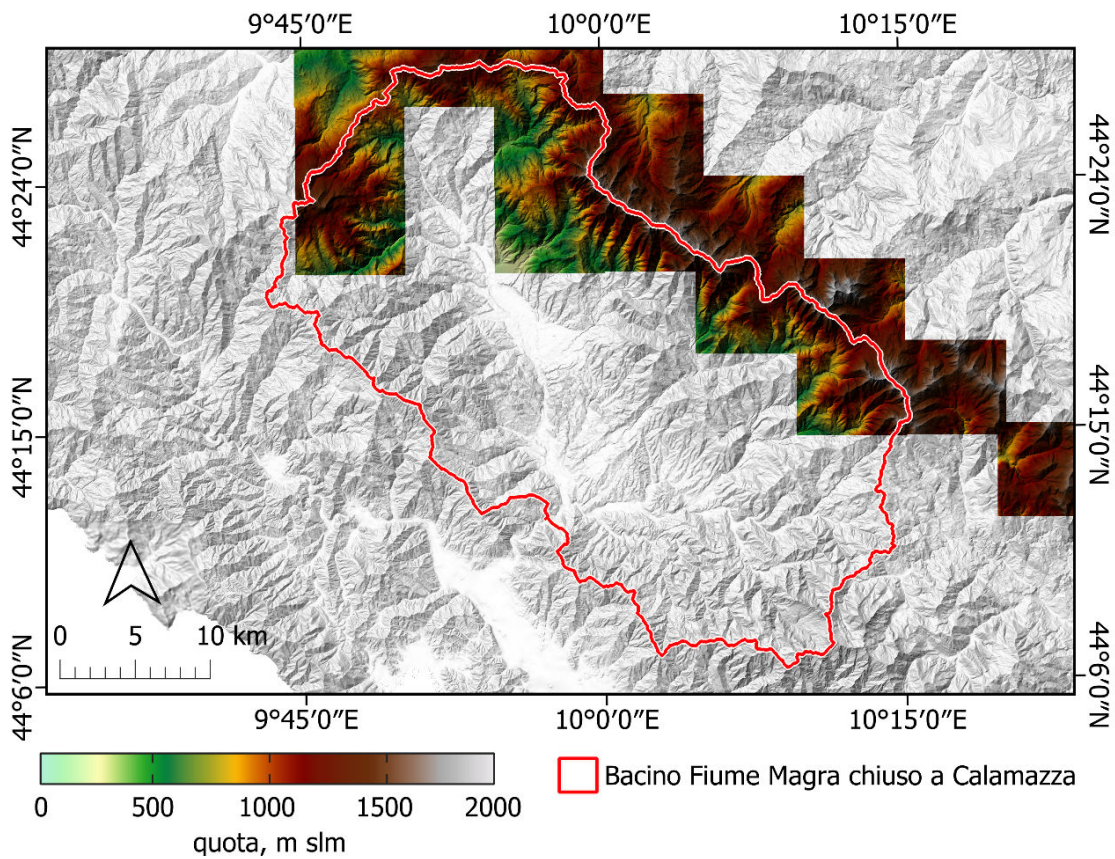


Figura 3.9. DTM 5 m × 5m Regione Emilia-Romagna.

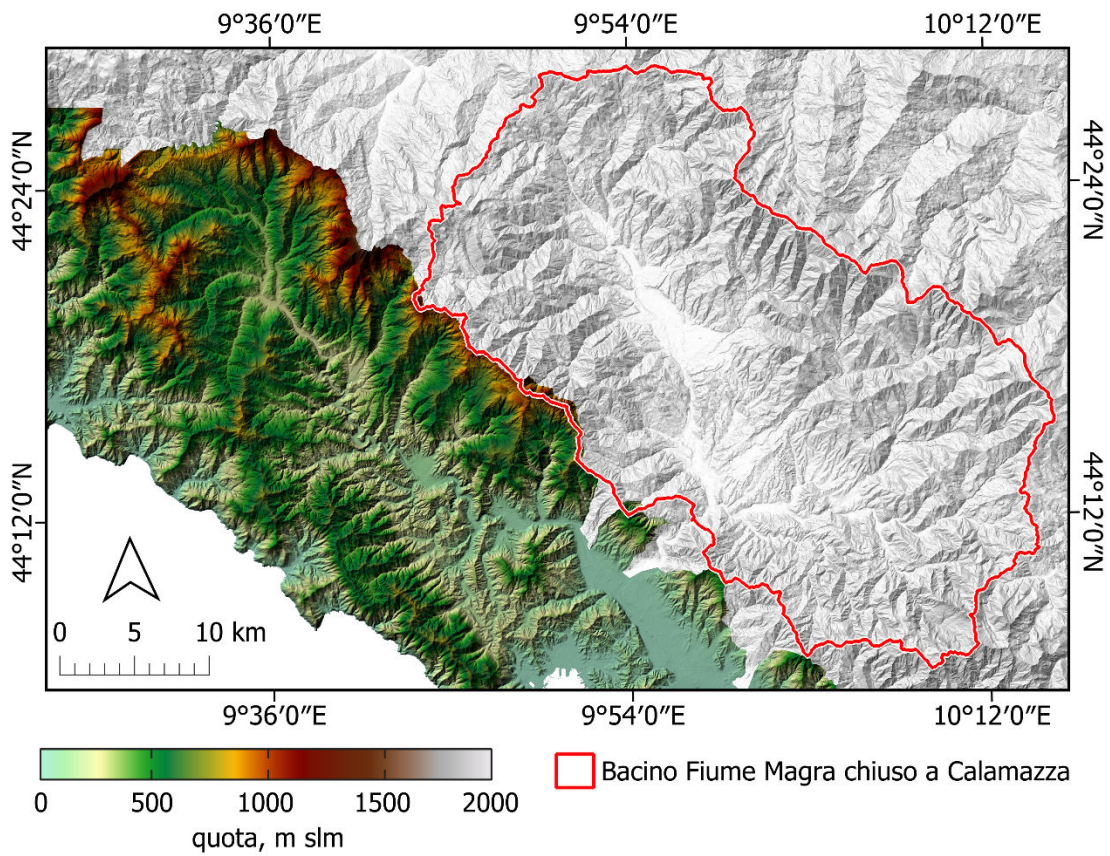


Figura 3.10. DTM 5 m × 5 m Regione Liguria.

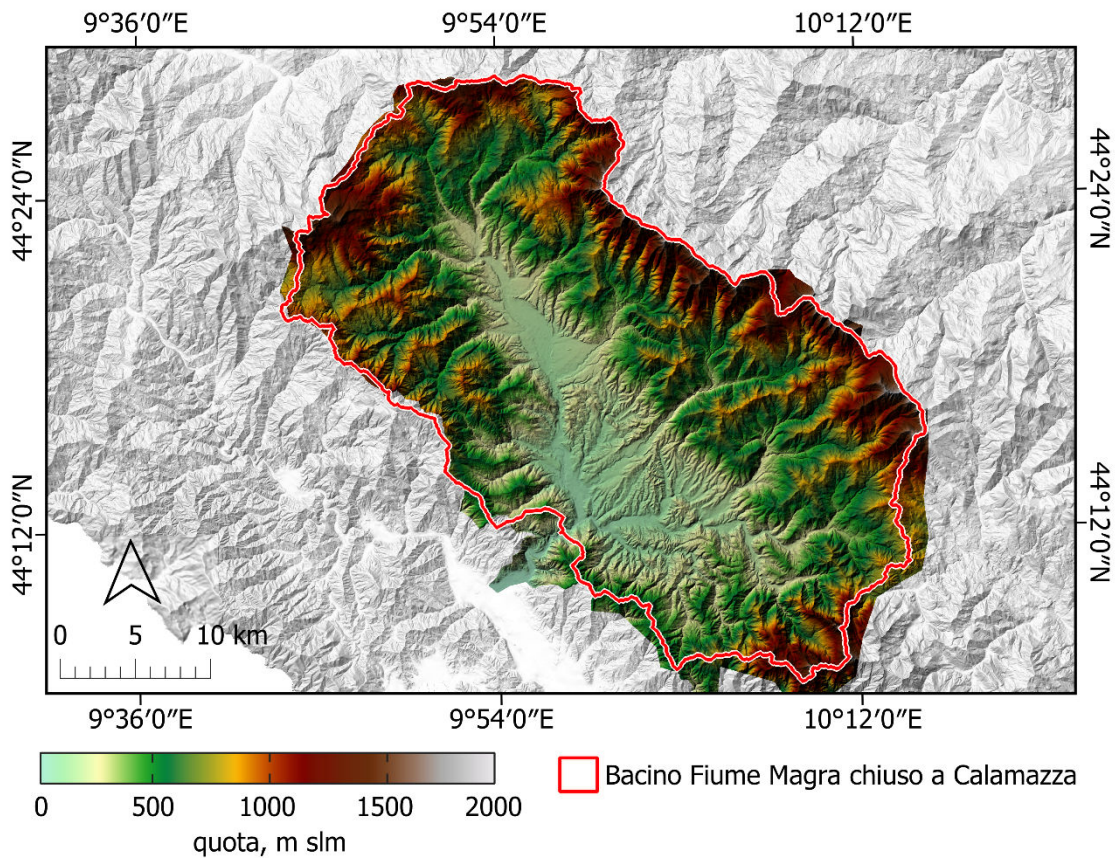


Figura 3.11. DTM 10 m × 10 m Regione Toscana.

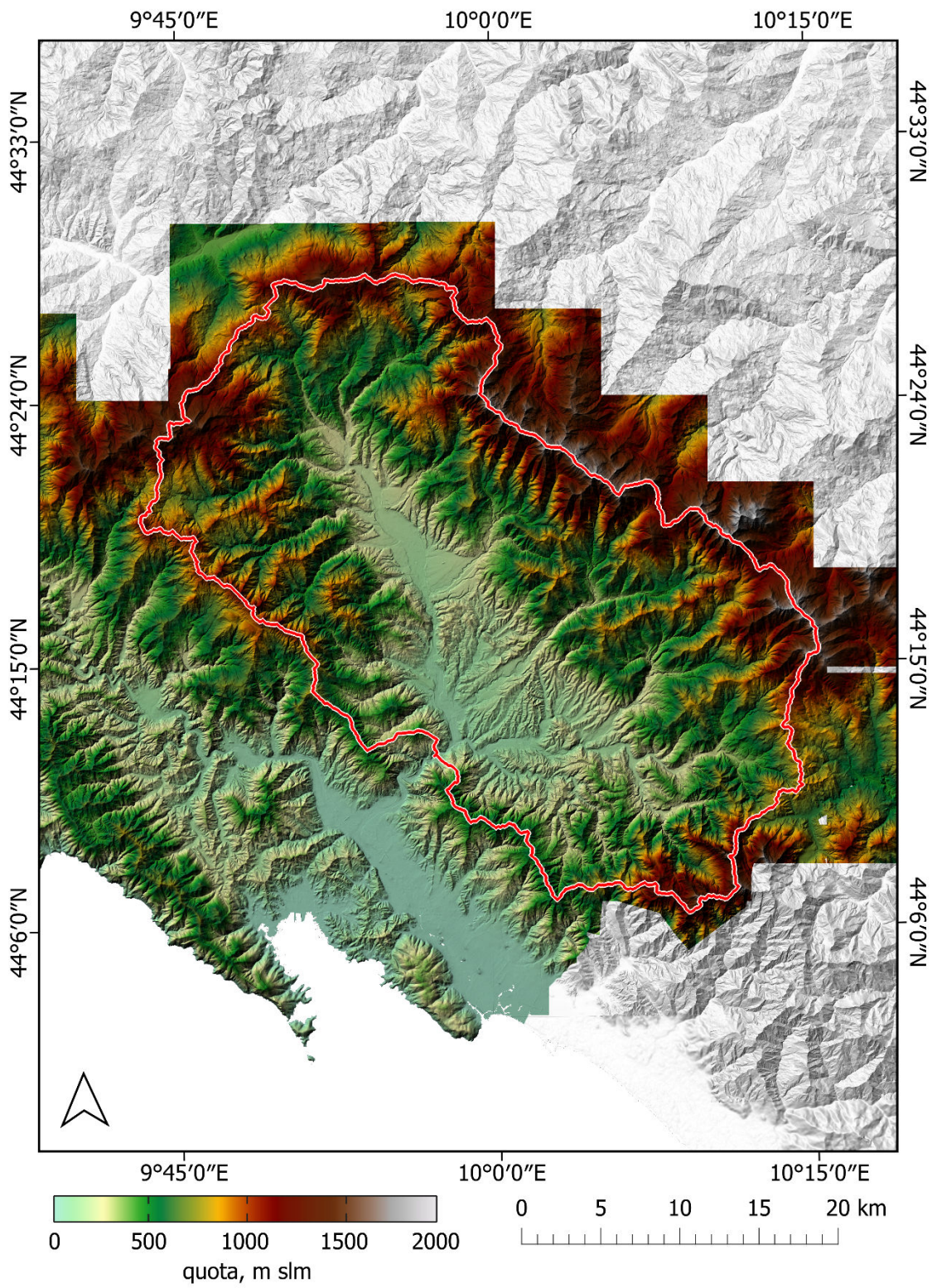


Figura 3.12. DTM 5 m × 5 m dell'area oggetto di studio.

3.2.1.4 Dati idrometrici e scale di deflusso

Per il confronto dei risultati ottenuti e per effettuare le calibrazioni sia del modello afflussi-deflussi sia del modello idraulico vengono impiegati i dati relativi ai livelli idrometrici e alle scale di deflusso forniti dai seguenti idrometri (Figura 3.15):

- Calamazza, Fiume Magra;
- Licciana Nardi, Torrente Taverone.
- Santa Giustina, Fiume Magra;
- Soliera, Torrente Aulella;

La finestra temporale è la medesima considerata per i dati di precipitazione (paragrafo 3.2.1.1), ovvero dal 1° gennaio 2017 al 31 dicembre 2021. Analogamente ai dati di precipitazione, i dati idrometrici sono pubblicati sul Portale della Direzione Difesa del Suolo e Protezione Civile del Servizio Idrologico Regionale (SIR) della Regione Toscana, così come le scale di deflusso. Sul portale sono presenti altri idrometri, oltre a quelli elencati; tuttavia, per essi non sono al momento disponibili le relative scale di deflusso e – pertanto – non è possibile convertire tali dati in portate.

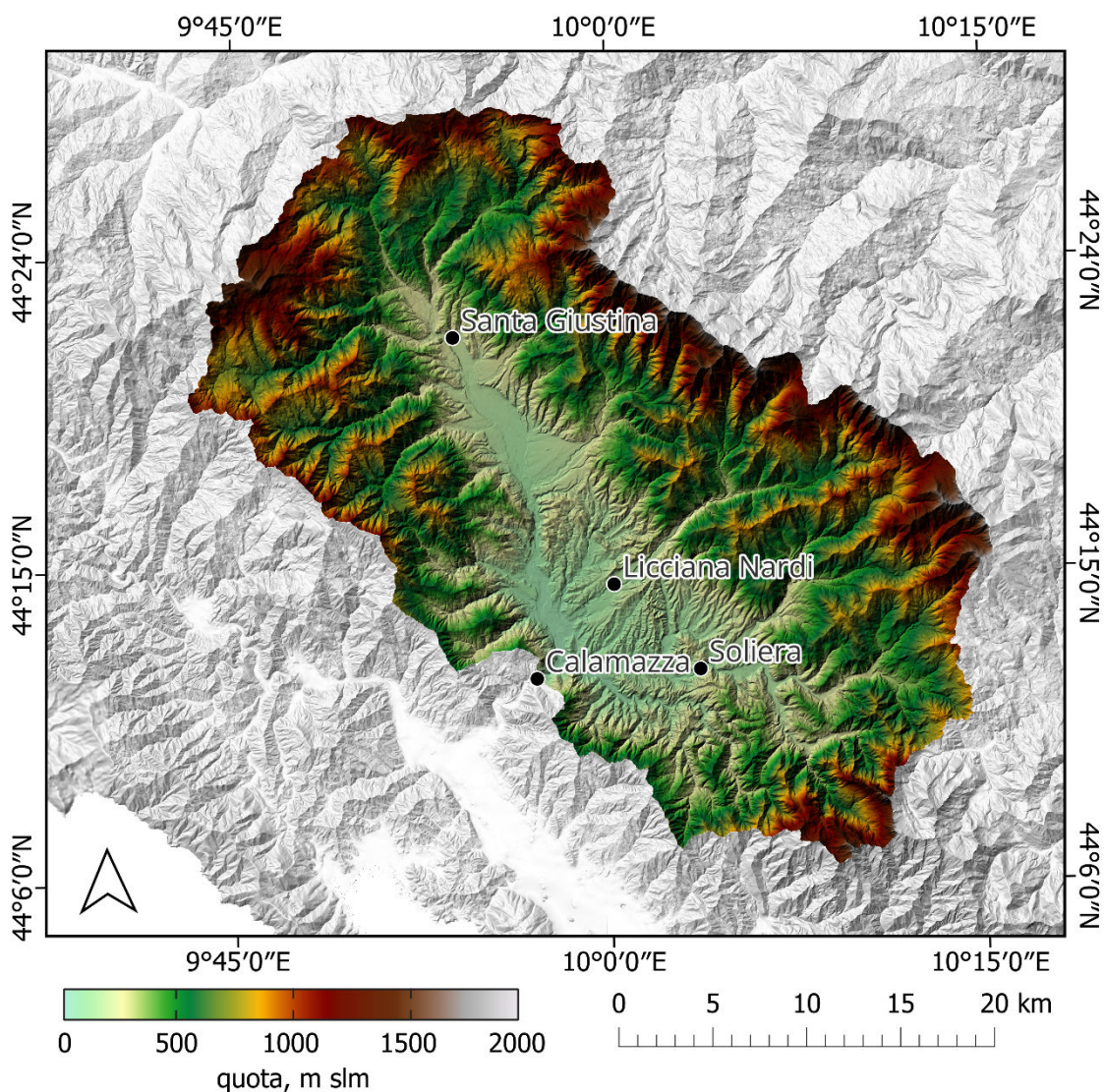


Figura 3.13. Localizzazione delle stazioni di Santa Giustina, Licciana Nardi, Soliera e Calamazza.

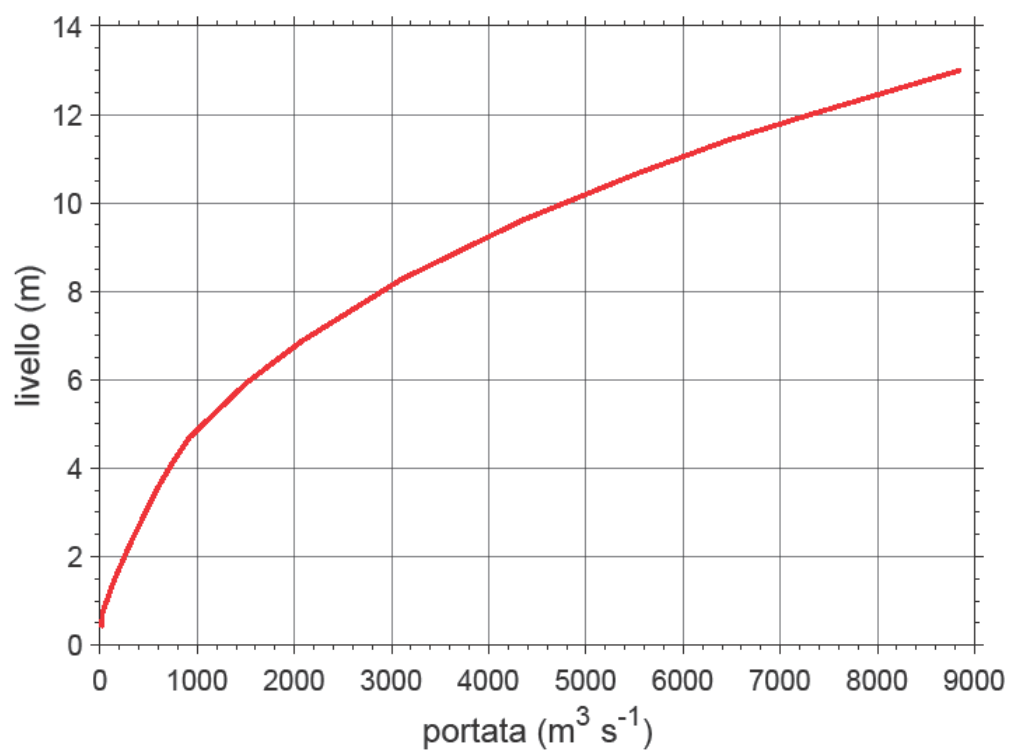


Figura 3.14. Scala di deflusso idrometro Calamazza (Fiume Magra).

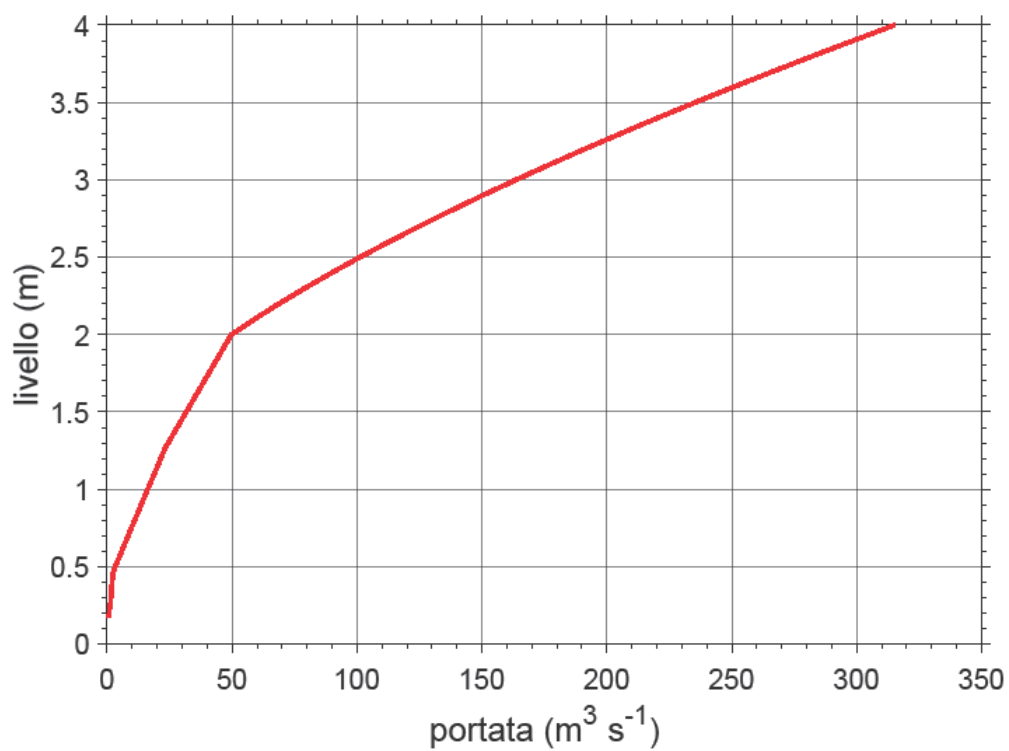


Figura 3.15. Scala di deflusso idrometro Licciana Nardi (Torrente Taverone).

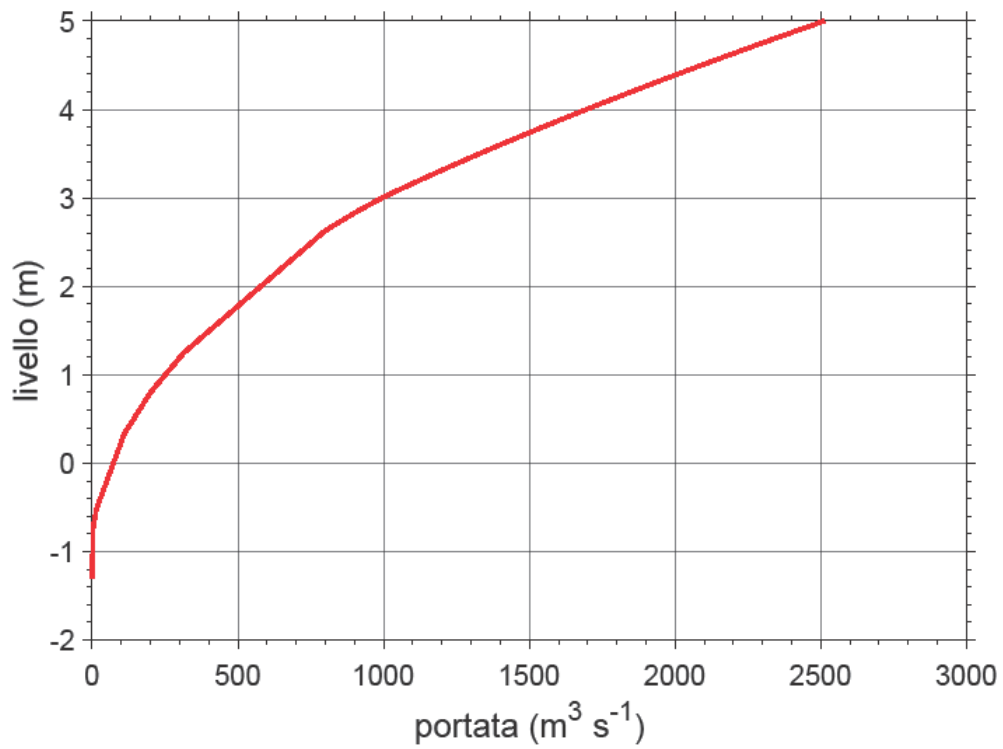


Figura 3.16. Scala di deflusso idrometro Santa Giustina (Fiume Magra).

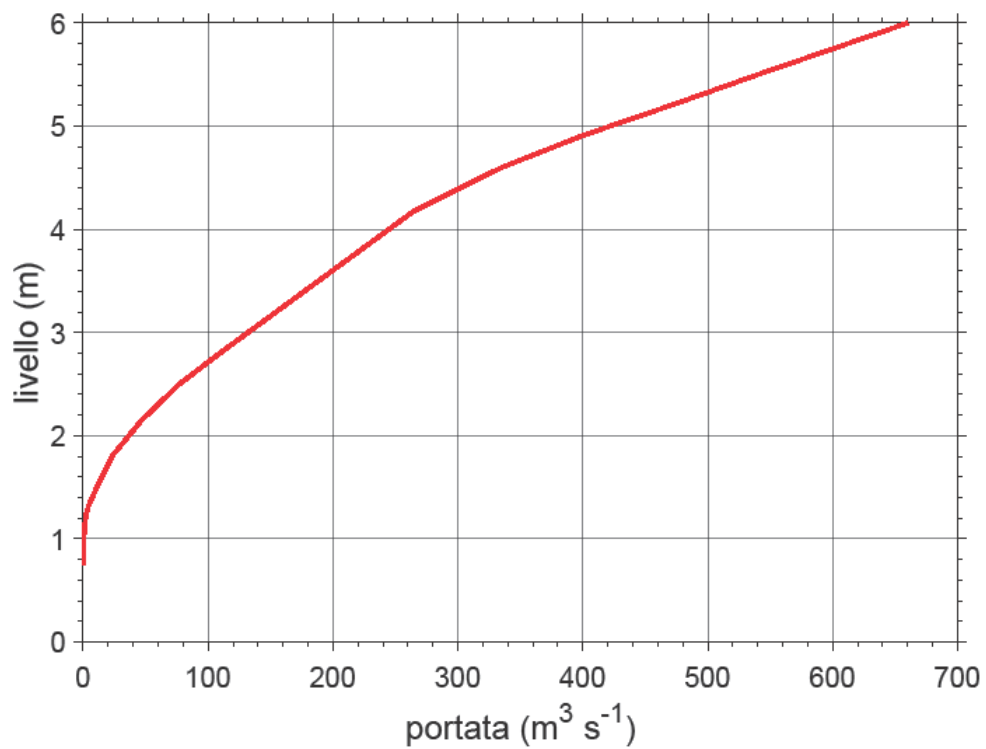


Figura 3.17. Scala di deflusso idrometro Soliera (Torrente Aulella).

3.2.2 Precipitazione efficace

Per il calcolo della precipitazione efficace è stato eseguito un bilancio idrologico monodimensionale sul continuum suolo-vegetazione-atmosfera (SVA) che viene schematizzato come mostrato in Figura 3.20 suddividendo il suolo in superficiale e profondo (Orlandin et al., 1996; Orlandini, 1999).

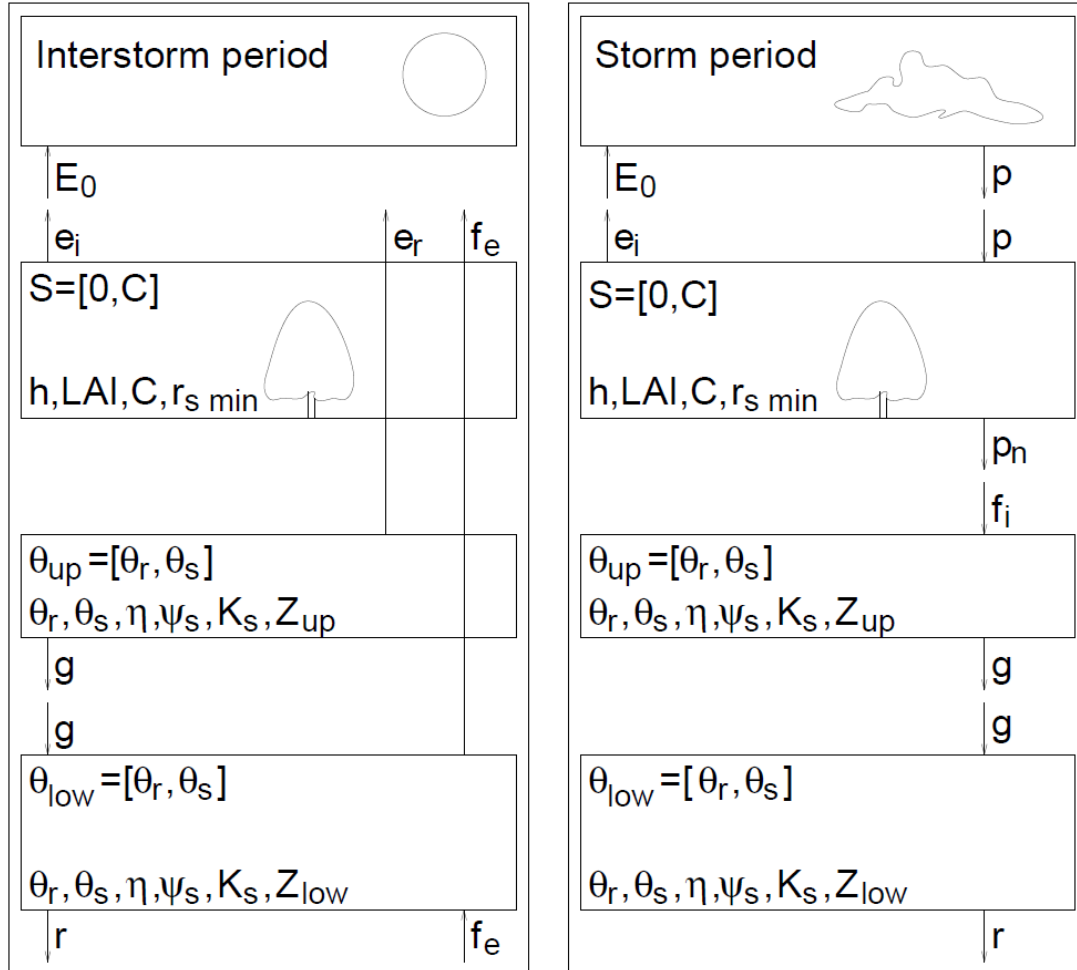


Figura 3.18. Schema concettuale del continuum suolo-vegetazione-atmosfera. S, immagazzinamento della chioma degli alberi; C, capacità di immagazzinamento della chioma degli alberi; h, altezza media della chioma degli alberi; $r_s \min$, resistenza minima al trasporto di vapore; LAI, leaf area index; θ_{up} e θ_{low} , contenuto idrico volumetrico medio dello stato superiore e profondo del suolo; θ_s e θ_r , contenuto idrico volumetrico alla saturazione e residuo del suolo; η , indice della distribuzione granulometrica; ψ_s , potenziale del suolo alla saturazione; K_s , conducibilità idraulica alla saturazione; Z_{up} e Z_{low} , spessori dello strato superficiale e profondo del suolo; E_0 , evaporazione potenziale; e_r , evaporazione dalla zona radicale; p, precipitazione; p_n , precipitazione al livello del suolo; e_i , evaporazione dalla copertura vegetale; f_i e f_e , infiltrazione ed esfiltrazione; g, percolazione dallo strato superficiale a quello profondo; r, contributo locale al deflusso.

Di seguito i risultati ottenuti. Si distingue tra periodo piovoso (storm period) e periodo asciutto (interstorm period). L'algoritmo impiegato è basato sul concetto di time compression approximation, la curva di capacità di infiltrazione (storm) o esfiltrazione (interstorm) basata sull'equazione di Philip abbinata alle equazioni costitutive di Brooks e Corey e l'equazione di Penman-Monteith per caratterizzare la domanda evaporativa atmosferica. L'algoritmo, in base allo stato di sollecitazione atmosferica (precipitazione o evaporazione potenziale), distingue il periodo piovoso da quello asciutto ed esegue una simulazione in cui ad ogni istante del dominio temporale considerato aggiorna i valori di contenuto idrico volumetrico del suolo in funzione delle dinamiche che intercorrono tra gli strati SVA, a partire dalle condizioni iniziali, dalle condizioni al contorno e dalle caratteristiche degli strati del suolo e della copertura vegetale (Figura 3.21). Quindi è possibile tracciare l'andamento del deflusso superficiale, ovvero l'aliquota della precipitazione che non viene trattenuta dal suolo e che contribuisce alla formazione di runoff (Figura 3.22). Il bilancio viene eseguito per ognuno dei quattro tipi di suolo (SCS).

Per un generico sottobacino la precipitazione efficace viene stimata moltiplicando il deflusso superficiale ottenuto per ogni tipo di suolo per il corrispettivo valore dell'area calcolato (paragrafo 3.2.1.2) e sommando i quattro contributi, ottenendo così la portata di precipitazione efficace in ingresso al bacino.

La calibrazione del modello avviene facendo variare i valori di conducibilità idraulica alla saturazione dei quattro diversi tipi di suolo; vengono eseguite simulazioni sui sottobacini in cui è presente un idrometro alla sezione di chiusura per il confronto dei risultati ottenuti:

- Santa Giustina, Fiume Magra;
- Licciana Nardi, Torrente Taverone;
- Soliera, Torrente Aulella;
- Calamazza; Fiume Magra;

I valori riportati in Tabella 3-5 rappresentano il miglior compromesso ottenuto per l'intero bacino del Fiume Magra.

Tabella 3-5. Parametri del suolo per i diversi tipi idrologici (SCS). θ_s e θ_r , contenuto idrico volumetrico alla saturazione e residuo del suolo; η , indice della distribuzione granulometrica; ψ_s , potenziale del suolo alla saturazione; K_s , conducibilità idraulica alla saturazione.

TIPO	θ_r	θ_s	K_s m/s	η	ψ_s m
A	0.04	0.20	7×10^{-2}	5.40	0.15
B	0.04	0.25	3×10^{-7}	3.30	0.25
C	0.04	0.35	2×10^{-9}	1.20	0.45
D	0.04	0.45	2×10^{-12}	0.44	0.90

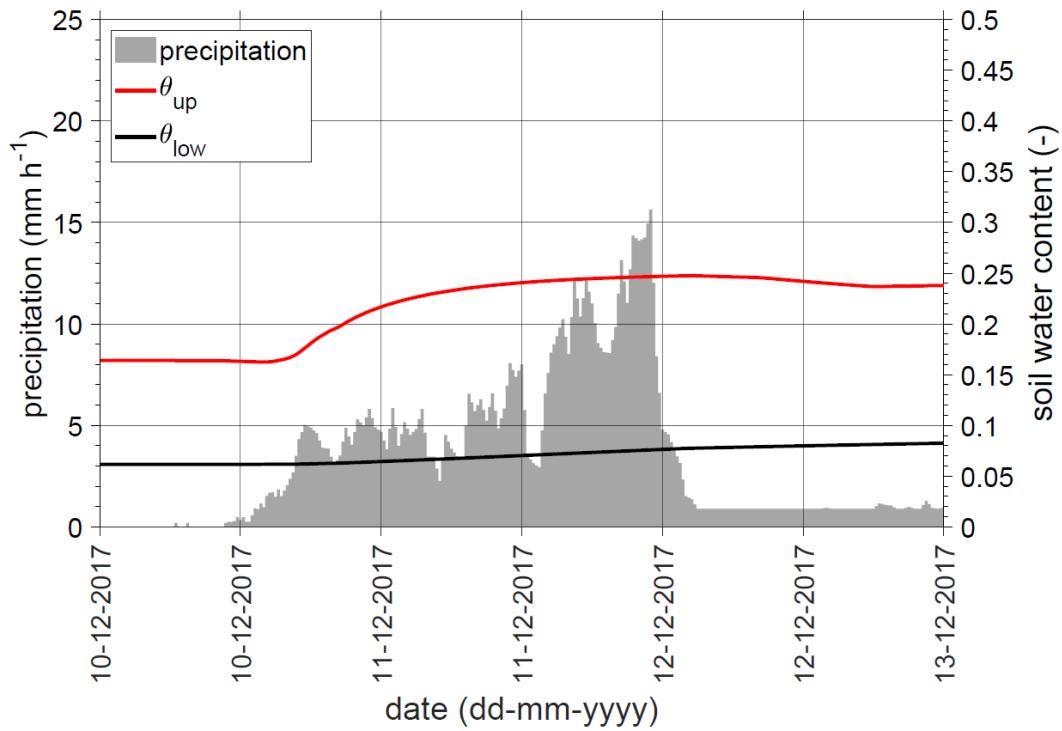


Figura 3.19. Contenuto idrico volumetrico del suolo superficiale (θ_{up}) e profondo (θ_{low}). Simulazione dicembre 2017; suolo di tipo B (SCS), sottobacino Santa Giustina.

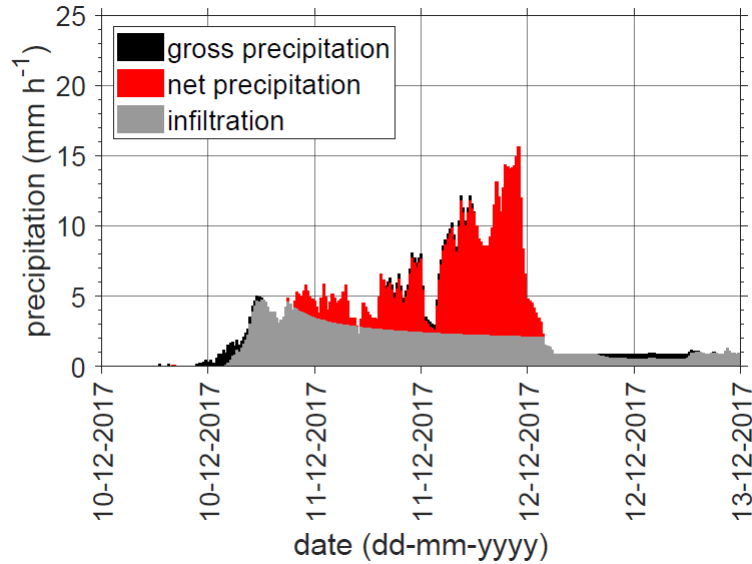


Figura 3.20. Ripartizione della precipitazione lorda (gross precipitation) in infiltrazione e pioggia netta (net precipitation), suolo di tipo B (SCS), simulazione dicembre 2017, sottobacino Santa Giustina.

3.2.3 Idrogrammi di piena

Nonostante la trasformazione della precipitazione netta, distribuita sulla superficie del bacino, in deflusso superficiale alla sezione di chiusura, potrebbe essere ottenuta tramite modelli concettuali stazionari e lineari, in questo studio si è deciso di adottare il modello cinematico, o della corrivazione (Moisello, 1999) a parametri concentrati.

3.2.3.1 Metodo della corrivazione

Per poter applicare il modello è necessario caratterizzare dal punto di vista morfometrico il bacino. Tramite software GIS vengono impiegati gli algoritmi forniti da SAGA - Terrain Analysis - Hydrology per l'estrazione automatica dei reticoli di drenaggio tramite il metodo D8, a partire dal dato DTM (paragrafo 3.2.1.3). In particolare, viene impiegato l'algoritmo "Upslope Area" per l'individuazione dell'area del bacino a monte della sezione di chiusura e "Maximum Flow Path Length" per l'estrazione di un raster a cui ad ogni cella è associata la distanza dalla sezione di chiusura (Figura 3.23).

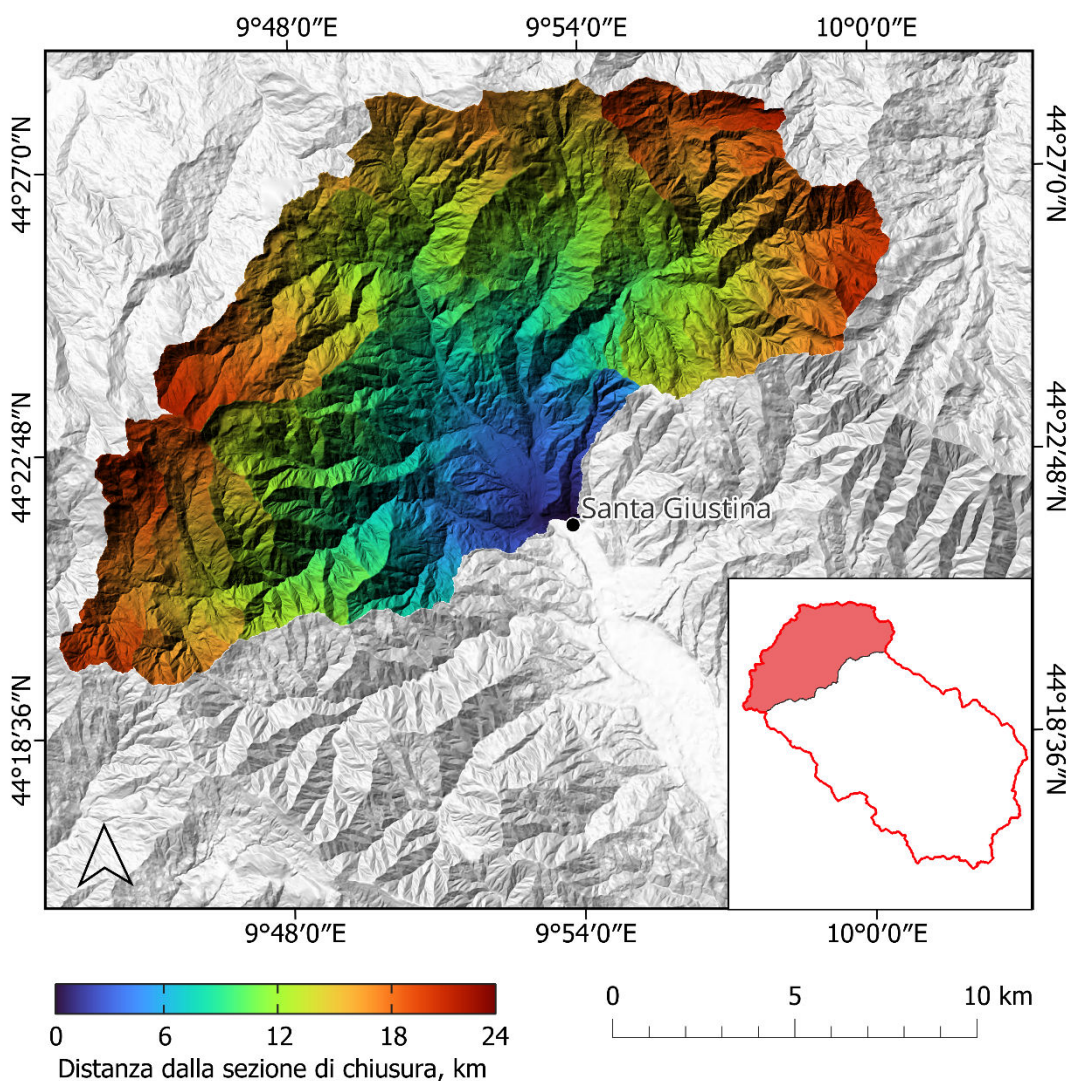


Figura 3.21. Distanza dalla sezione di chiusura per il bacino chiuso a Santa Giustina.

Di seguito vengono presentati i passaggi eseguiti per ricavare l'idrogramma di piena per il sottobacino di Santa Giustina. Elaborando il dato è possibile ottenere la curva area-distanze, che esprime per una data distanza dalla sezione di chiusura la porzione di area

contribuente posta a distanza al più pari alla distanza stessa. Tale distanza è calcolata seguendo le linee di drenaggio (Figura 3.24).

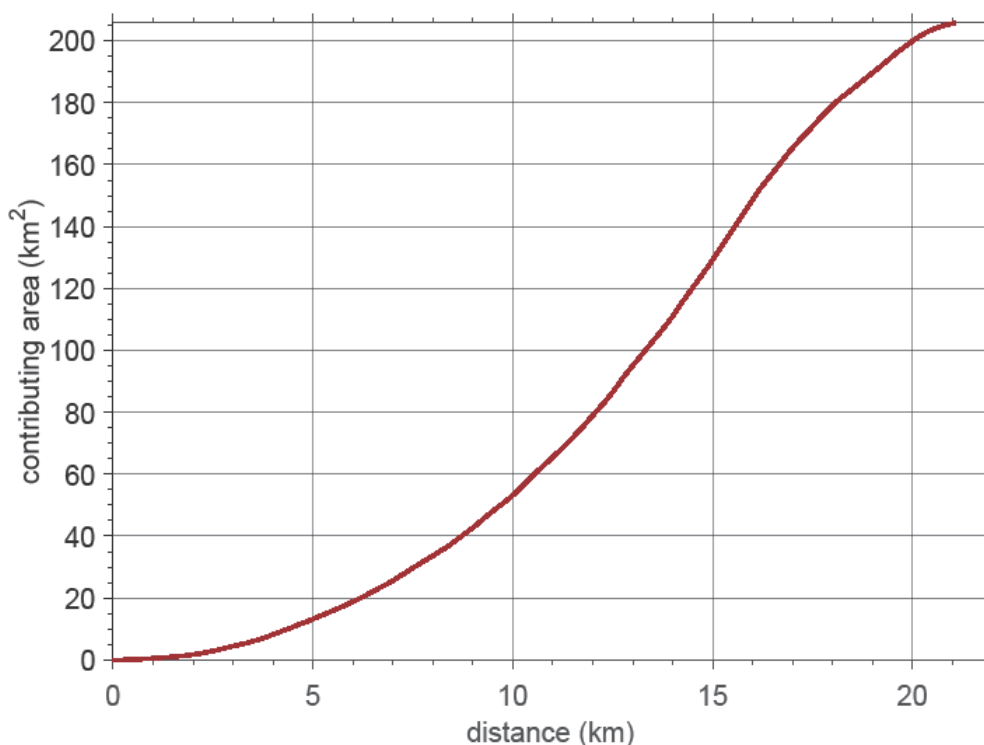


Figura 3.22. Curva area-distanze per il sottobacino di Santa Giustina.

Tale curva può essere trasformata in curva tempo-area, la quale esprime l'area che contribuisce alla formazione della portata rilasciata dal bacino in funzione del tempo impiegato dalla pioggia netta a raggiungere la sezione di chiusura dal punto in cui essa è generata (Figura 3.25). Per fare questo, è necessario assumere un'ideale velocità di scorrimento delle portate di piena negli alvei. Il tempo di corrivazione del bacino t_c , ovvero il tempo necessario affinché l'intero bacino contribuisca alla formazione della portata alla sezione di chiusura, è dato dal rapporto tra la distanza massima dalla sezione di chiusura L e la velocità di canale v . Il tempo di corrivazione è un parametro di calibrazione del modello e influisce sulla forma dell'idrogramma di piena. In particolare definisce la posizione del picco dell'idrogramma nel tempo che, nell'ambito della valutazione delle piene per eventi alluvionali, risulta un aspetto fondamentale.

In questo studio, considerando che la maggior parte dei sottobacini non ha un idrometro alla sezione di chiusura per il confronto dei risultati, si è deciso di stimare una velocità di canale omogenea per tutti i sottobacini. Tale velocità è ricavata, come per i valori di conducibilità idraulica per la stima della pioggia netta, dalla calibrazione effettuata sui quattro sottobacini provvisti di idrometro (Calamazza, Licciana Nardi, Santa Giustina, Aulella). Il valore ricavato è 1.80 m s^{-1} .

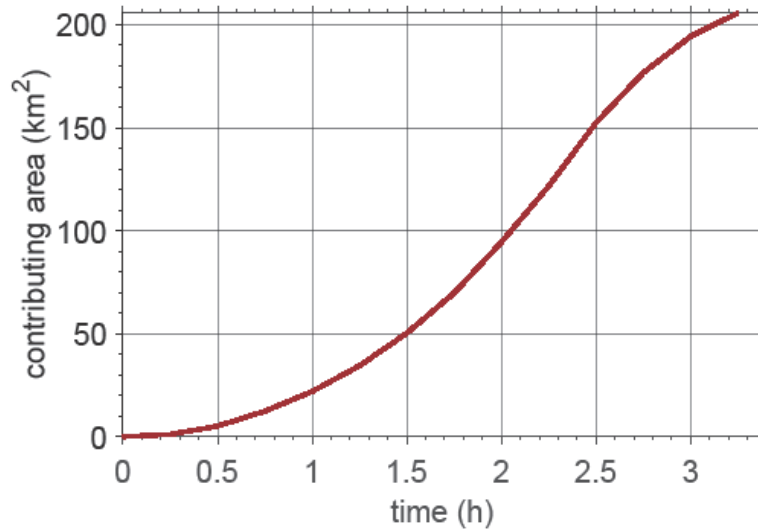


Figura 3.23. Curva tempo-area per il sottobacino di Santa Giustina.

La curva tempo-area sintetizza la risposta del bacino alla sollecitazione della pioggia efficace in termini di deflusso superficiale. Essa è legata all'idrogramma unitario istantaneo (instantaneous unit hydrograph) IUH dalla relazione (3) (Moisello, 1999):

$$IUH(t) = \frac{1}{A} \frac{d}{dt} S(t) \quad (3)$$

nella quale la funzione $S = S(t)$ è la curva tempo-area mentre A indica sempre l'area totale contribuente alla sezione di chiusura. Tale curva non è nota in forma analitica ma per punti, per cui la derivata (3) deve essere approssimata secondo le differenze finite (4):

$$H(j) = \frac{1}{A} \frac{S(j) - S(j-1)}{\Delta t} \quad \text{per } j = 1, \dots, N \quad (4)$$

per un passo di calcolo Δt essendo N il numero massimo di intervalli nei quali è suddivisa la curva tempo-area. La funzione discreta $H = H(j)$ approssima quindi a blocchi la funzione teorica continua dell' IUH . Adottando un passo temporale di 15 minuti, è stato derivato l'idrogramma unitario rappresentato in Figura 3.26.

Tramite l'idrogramma unitario istantaneo è possibile ricavare l'integrale di convoluzione che permette di convertire i valori di precipitazione efficace all'istante m -esimo p_m in portate in uscita dal bacino all'istante n -esimo $Q(n)$ tramite la relazione (5).

$$Q(n) = \sum_{m=1}^n p_m H_{n-m+1} \quad (5)$$

3.2.3.2 Calibrazione e risultati

Come affermato nelle sezioni precedenti vengono impiegati come parametri di calibrazione del modello i valori di conducibilità idraulica alla saturazione (paragrafo 3.2.2) per la stima della pioggia netta e la velocità media di scorrimento delle portate di piena negli alvei per la stima della risposta del bacino alla sollecitazione atmosferica.

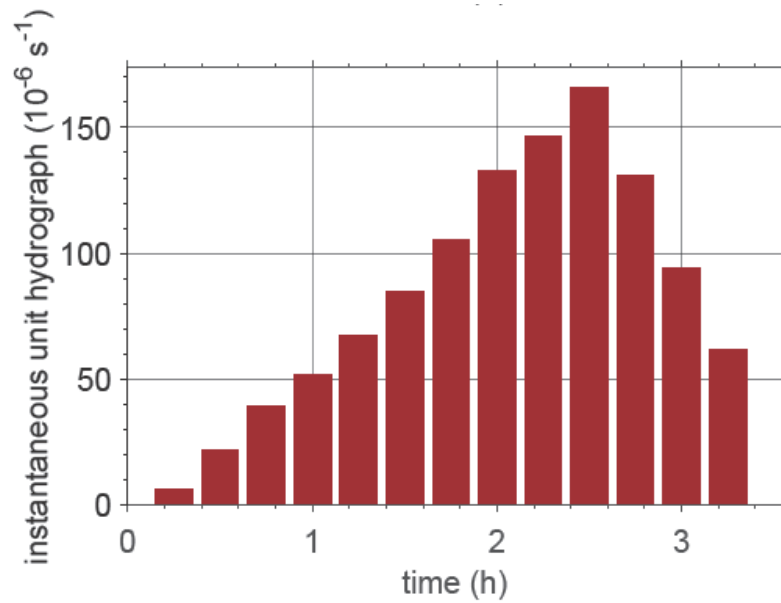


Figura 3.24. Idrogramma unitario istantaneo per il sottobacino di Santa Giustina.

Di seguito sono riportati – nelle Figure 3.27–3.30 – idrogrammi di piena dei quattro sottobacini selezionati per la calibrazione (Santa Giustina, Licciana Nardi, Soliera e Calamazza). Per i restanti sottobacini si ipotizzano le stesse caratteristiche e si applicano gli stessi parametri.

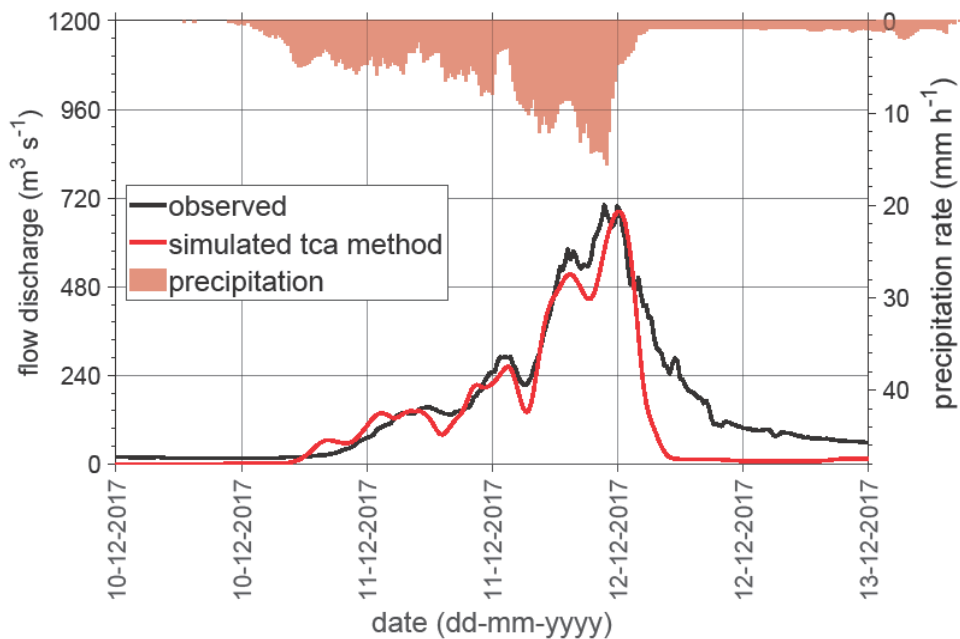


Figura 3.25. Idrogramma di piena, sottobacino di Santa Giustina (Fiume Magra), evento 12/12/17.

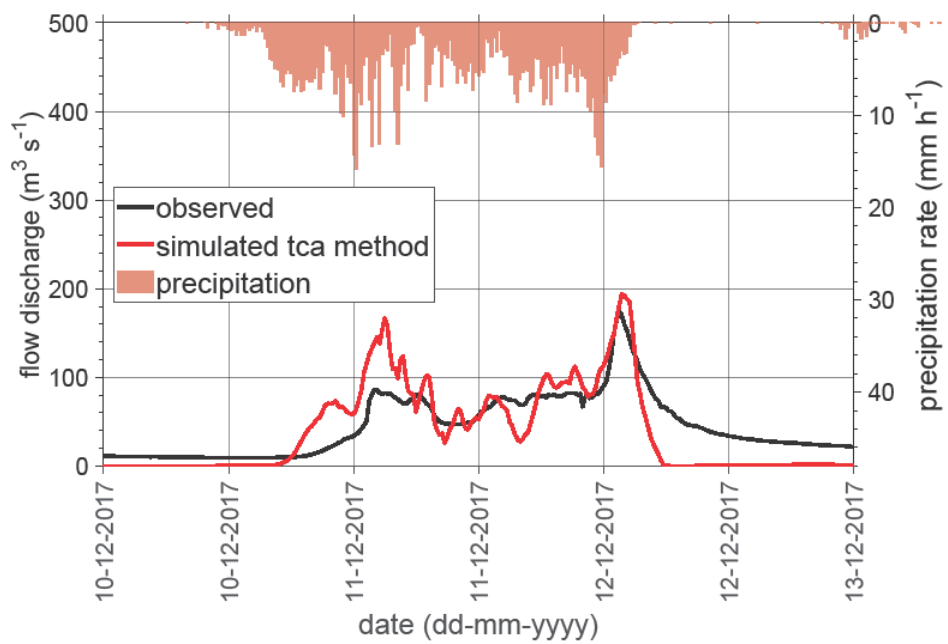


Figura 3.26. Idrogramma di piena, sottobacino di Licciana Nardi (Torrente Taverone), evento 12/12/17.

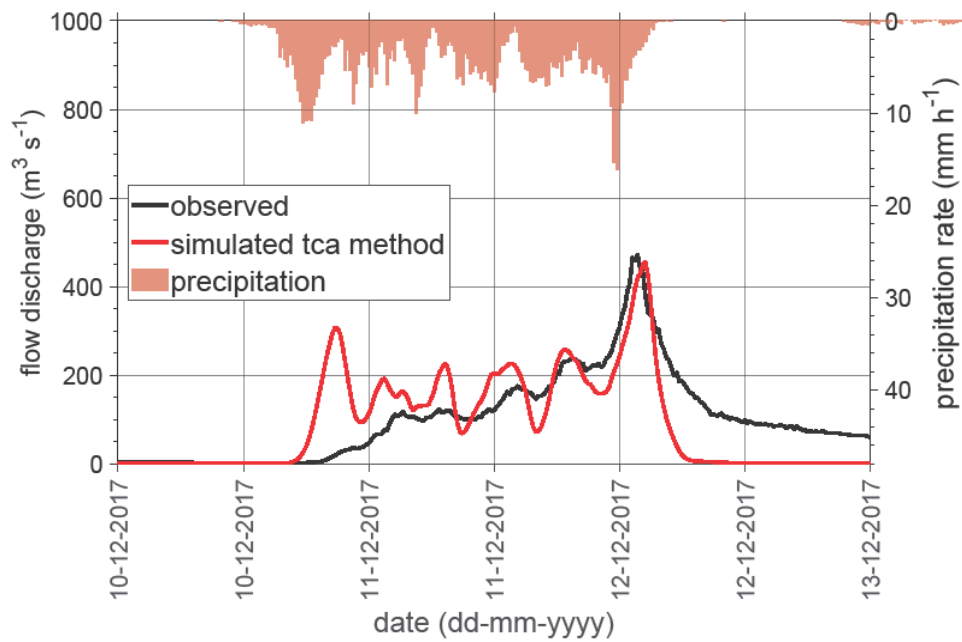


Figura 3.27. Idrogramma di piena, sottobacino di Soliera (Torrente Aulella), evento 12/12/17.

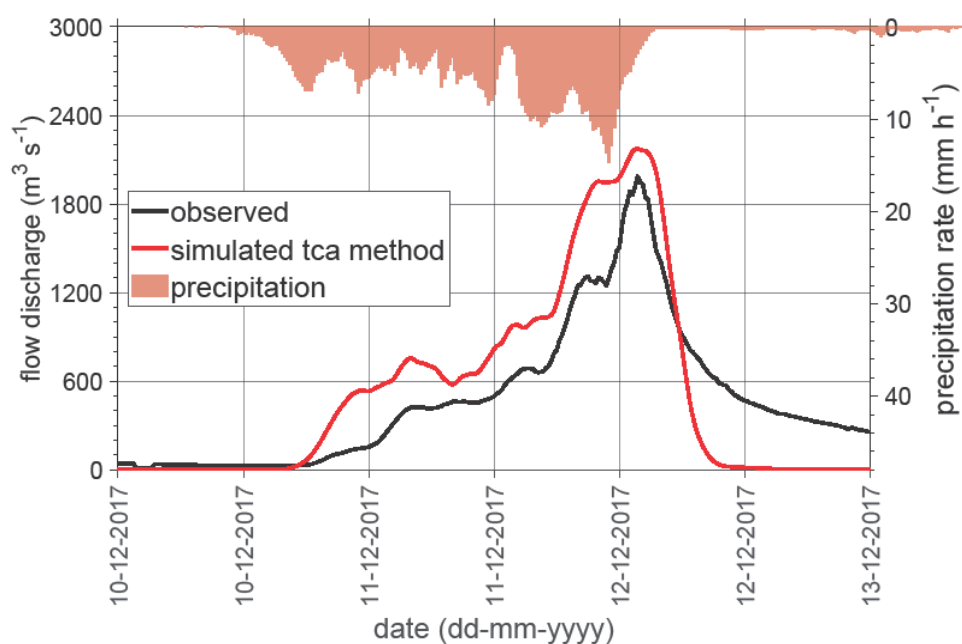


Figura 3.28. Idrogramma di piena, sottobacino di Calamazza (Fiume Magra), evento 12/12/17.

Per la valutazione della qualità delle simulazioni effettuate si utilizza il coefficiente di Nash-Sutcliffe (NSE) indicato dalla relazione (6). Vengono ritenuti molto buoni valori di $NSE > 0.80$ e accettabili valori di $NSE > 0.65$.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q'_o)^2} \quad (6)$$

Dove Q'_o è la media delle portate osservate, Q_m è la portata simulata e Q_o^t è la portata osservata al tempo t . La valutazione è stata fatta a scala di evento, ovvero considerando l'intervallo temporale che va dal 10 dicembre 2017 ore 10:00 al 12 dicembre 2017 ore 5:00, che corrisponde alla durata dell'evento piovoso.

Tabella 3-6. Risultati calibrazioni modello afflussi-deflussi. L, massima distanza dalla sezione di chiusura; A, area totale contribuyente; v, velocità media di scorrimento delle portate di piena; t_c , tempo di corrivazione; NSE, coefficiente di Nash-Sutcliffe.

Sottobacino	L km	A km ²	v m s ⁻¹	t_c h	NSE
Santa Giustina	21.88	206.25	1.80	3.38	0.93
Licciana Nardi	22.55	82.11	1.80	3.48	0.82
Soliera	25.63	203.55	1.80	3.96	0.74
Calamazza	49.50	934.41	1.80	7.64	0.83

Si sottolinea come gli idrogrammi in uscita dal sottobacino di Santa Giustina verranno effettivamente propagati nell'area di studio di valle, mentre i tre restanti idrogrammi (Licciana Nardi, Calamazza e Soliera) vengono impiegati solo per la calibrazione in quanto i sottobacini chiusi alle sezioni in cui è presente l'idrometro risultano troppo

piccoli e lasciano scoperta una porzione significativa dell'area di monte che contribuisce alla formazione delle piene.

Il modello presentato, una volta calibrato, permette l'ottenimento degli idrogrammi di piena per i restanti 23 sottobacini di monte del Fiume Magra per l'evento del 12 dicembre 2017. In Tabella 3-7 sono elencati i tempi di corrivazione ottenuti e le caratteristiche morfometriche.

Tabella 3-7. Risultati simulazioni applicate ai sottobacini montani del Fiume Magra. L, massima distanza dalla sezione di chiusura; A, area totale contribuyente; v, velocità media di scorrimento delle portate di piena; t_c , tempo di corrivazione.

Sottobacino	L km	A km ²	v m s ⁻¹	t_c h
Acqua Gelata	2.06	1.16	1.80	0.32
Aulella	35.94	318.82	1.80	5.55
Bagnone	12.58	52.23	1.80	1.94
Bosco	2.74	1.09	1.80	0.42
Canossilla	6.13	6.55	1.80	0.95
Caprio	9.00	22.66	1.80	1.39
Carrara	2.85	0.90	1.80	0.44
Casalina	3.12	1.22	1.80	0.48
Cisolagna	7.00	8.39	1.80	1.08
Civiglia	12.78	31.74	1.80	1.97
Ferdana	2.10	1.00	1.80	0.32
Geriola	6.73	8.67	1.80	1.04
Ghiaia	3.49	2.08	1.80	0.54
Gorgoglione	5.52	3.11	1.80	0.85
Magnola	3.74	2.22	1.80	0.58
Mangiola	10.92	22.28	1.80	1.69
Monia	6.05	6.63	1.80	0.93
Oscà	10.79	21.07	1.80	1.67
Penola	8.69	12.30	1.80	1.34
Pino	5.03	3.06	1.80	0.78
Tarasco	6.63	7.11	1.80	1.02
Taverone	26.26	86.44	1.80	4.05
Teglia	14.56	37.66	1.80	2.25
Calamazza	49.50	934.41	1.80	7.64

3.3 Modellazione idraulica

Sulla base dei risultati ottenuti dall'applicazione del modello afflussi-deflussi alle sezioni montane del bacino del Fiume Magra, è stato implementato il modello idraulico per effettuare le simulazioni di propagazione delle onde di piena per la stima dell'entità degli eventuali allagamenti che interesserebbero la sezione di valle oggetto di studio. Al fine di simulare i fenomeni di esondazione si è utilizzato un modello idraulico di propagazione delle correnti bidimensionali in moto vario basato sulla soluzione numerica delle equazioni complete di De Saint Venant. Tale soluzione è stata ottenuta attraverso l'utilizzo algoritmi di analisi della morfologia del terreno (Moretti e Orlandini, 2023) e del software HEC-RAS 2D.

Nelle sezioni successive è descritto il procedimento utilizzato per la modellazione dell'area di valle dal punto di vista geometrico, tramite l'implementazione del modello digitale del terreno ad alta risoluzione, il dominio di calcolo e la mesh di calcolo. La determinazione dei parametri principali della simulazione del dicembre 2017 impiegata per la calibrazione del modello idraulico è – altresì – descritta. Infine, verranno confrontati i dati ottenuti dalla simulazione con i dati osservati forniti dall'idrometro posto in località Calamazza.

3.3.1 Geometria

Per la definizione della geometria del problema è necessario implementare nel software HEC-RAS 2D il modello digitale del terreno per definire la superficie in cui vengono propagate le onde di piena. Si sceglie di utilizzare come dato principale il DTM a risoluzione $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ della Regione Toscana (paragrafo 3.2.1.3) mostrato in Figura 3.10, in quanto ha presenta un'ottima risoluzione e permette di cogliere gli elementi topografici più significativi come rilevati stradali e ferroviari, rilevati arginali e canali che possono influenzare in modo significativo la propagazione delle onde di piena in territorio di pianura. Il dato scelto non presenta lacune all'interno del dominio di calcolo definito in seguito.

Il dominio di calcolo viene definito in modo da considerare l'area di studio di valle da Pontremoli (MS) ad Aulla (MS), località Calamazza; all'interno del dominio sono presenti i maggiori centri abitati della Lunigiana come Filattiera (MS), Villafranca in Lunigiana (MS) e Aulla (MS), che sono considerate le aree maggiormente esposte al rischio alluvionale.

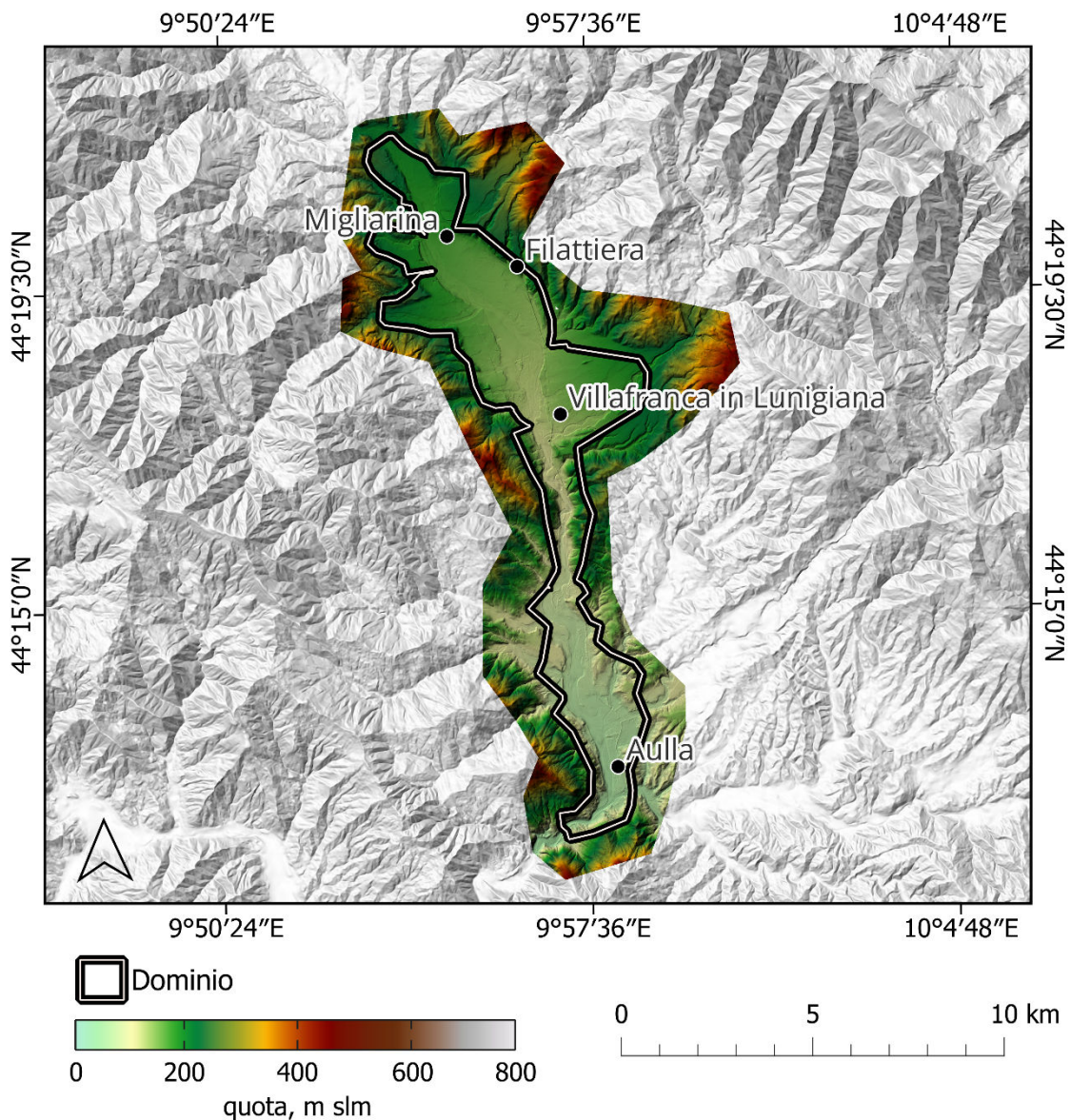


Figura 3.29. Dominio di calcolo e DTM a risoluzione $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ per l'area di studio di valle del Fiume Magra da Santa Giustina, Pontremoli (MS) a monte a Calamazza, Aulla (MS) a valle.

La mesh di calcolo viene realizzata a partire da una mesh a maglia regolare con celle quadrate di dimensioni $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ che viene opportunamente modificata adagiandola sulle breaklines, ovvero le linee spartiacque. Quest'ultime sono state estratte attraverso l'algoritmo di analisi del terreno LANDMARK (Orlandini e Moretti, 2023) che attraverso una procedura automatica e geomorfologicamente basata permette la costruzione delle reti dei canali e dei crinali a partire dal modello digitale del terreno. Le breaklines sono fondamentali in quanto permettono di cogliere gli elementi topografici essenziali del territorio e di realizzare una mesh di calcolo non strutturata che ha il duplice vantaggio di essere opportunamente raffittita in corrispondenza degli elementi che influiscono sulla propagazione delle onde di piena e rimane regolare e a maglie più larghe dove non è necessario aumentare il dettaglio, riducendo in modo significativo l'onere computazionale.

In Figura 3.32 è rappresentato il dettaglio della mesh in corrispondenza della confluenza del torrente Caprio con il Fiume Magra.

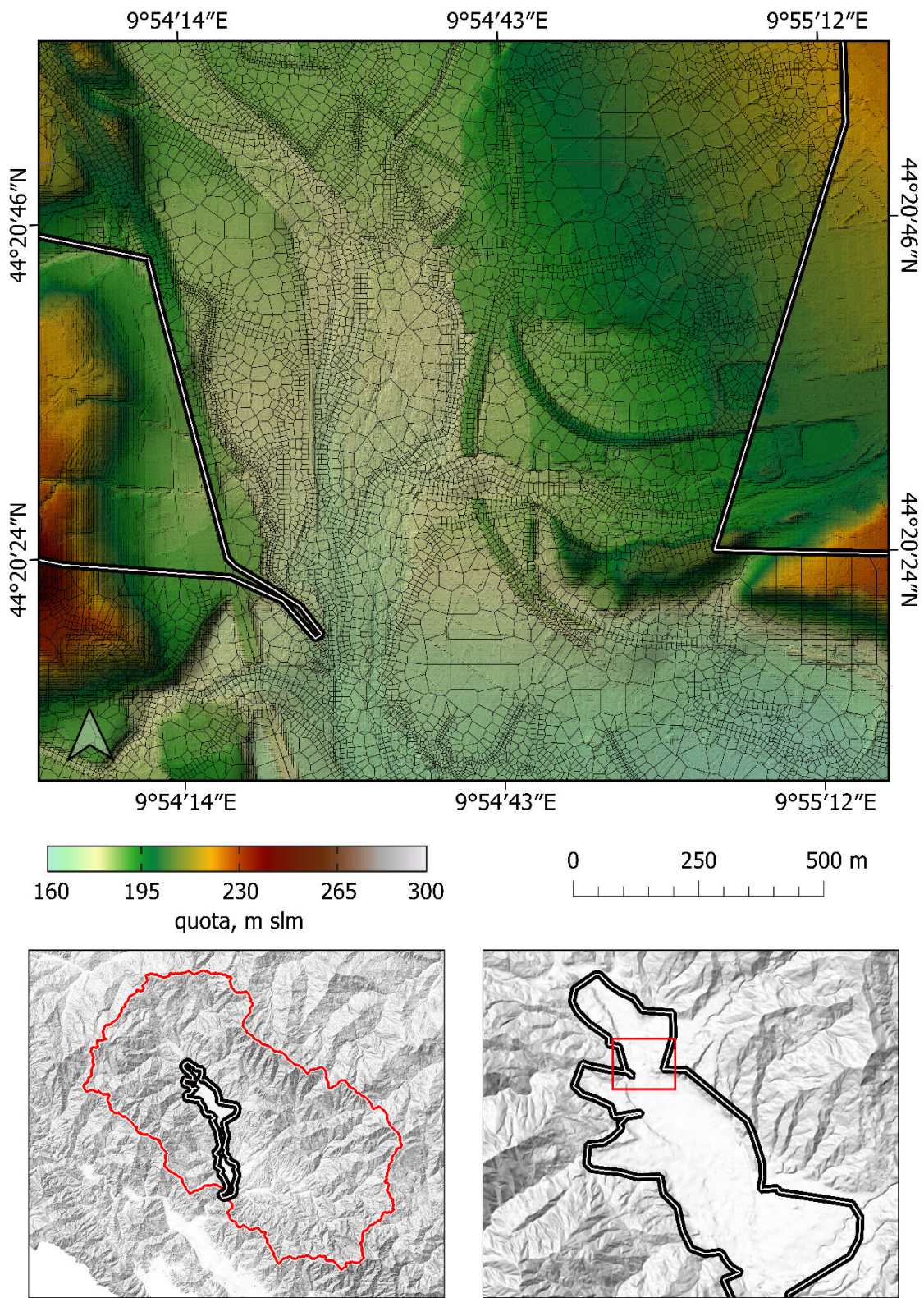


Figura 3.30. Dettaglio mesh di calcolo in corrispondenza della confluenza Torrente Caprio con Fiume Magra.

In alcune zone il DTM viene modificato per riprodurre correttamente alcuni elementi che non sono stati colti dal rilievo lidar a causa della loro dimensione ridotta. Un esempio è il muro di protezione della città di Aulla (MS), che ha uno spessore inferiore al metro.

3.3.2 Evento di piena Dicembre 2017

Per la calibrazione del modello i parametri della simulazione sono impostati. Tra gli altri, la finestra temporale della simulazione (dal 10 dicembre 2017 ore 10:00 al 13 dicembre 2017 ore 5:00) e lo step di calcolo pari a 30 s.

In figura sono elencate le condizioni al contorno applicate al modello idraulico. Ventiquattro condizioni al contorno sono rappresentate dagli idrogrammi ottenuti dal modello afflussi-deflussi, che vengono applicate nei punti del perimetro del dominio in corrispondenza delle sezioni di chiusura dei sottobacini montani, mentre la condizione su Calamazza è la pendenza media dell'alveo che rappresenta la condizione in uscita e viene impiegato come parametro per la calibrazione del modello.

Un valore omogeneo al coefficiente di scabrezza di Manning, esteso a tutto il dominio del modello è stato applicato. Tale valore viene utilizzato come parametro di calibrazione del modello.

3.3.3 Risultati

Sulla base del modello descritto in precedenza sono state effettuate diverse simulazioni al variare del coefficiente di Manning e la pendenza media del fondo in uscita a Calamazza.

Tabella 3.8. Parametri di calibrazione per le simulazioni effettuate sull'evento del dicembre 2017. n , coefficiente di scabrezza di Manning; i_f , pendenza media del fondo.

Simulazione	n $m^{-1/3} s$	i_f	NSE
1	0.060	0.00700	0.37
2	0.030	0.00700	0.57
3	0.040	0.00700	0.76
4	0.043	0.00700	0.81
5	0.048	0.00700	0.77
6	0.048	0.00750	0.75
7	0.046	0.00650	0.73
8	0.043	0.00400	0.22
9	0.035	0.00350	0.62
10	0.043	0.00477	0.78
11	0.043	0.00550	0.83
12	0.060	0.00350	0.80

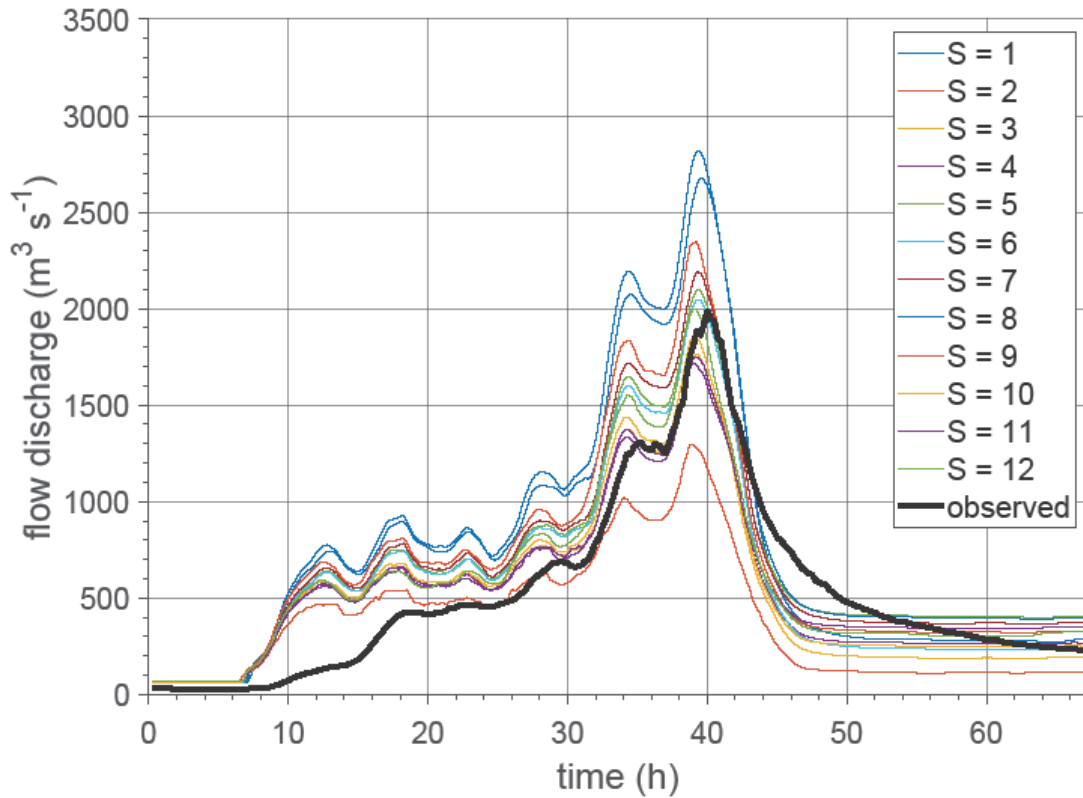


Figura 3.31. Simulazioni dicembre 2017, portate a Calamazza.

Come per il modello afflussi-deflussi la qualità della simulazione viene valutata tramite il coefficiente di Nash-Sutcliffe (paragrafo 3.2.3.2, Figura 3.34).

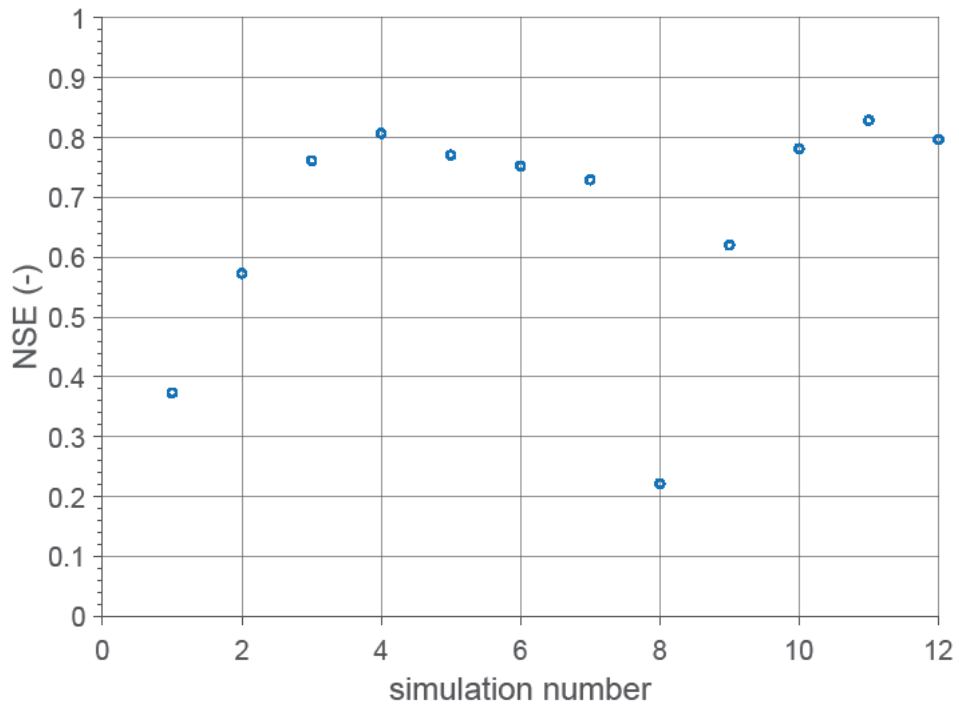


Figura 3.32. Coefficiente di Nash-Sutcliffe per le simulazioni dell'evento del dicembre 2017.

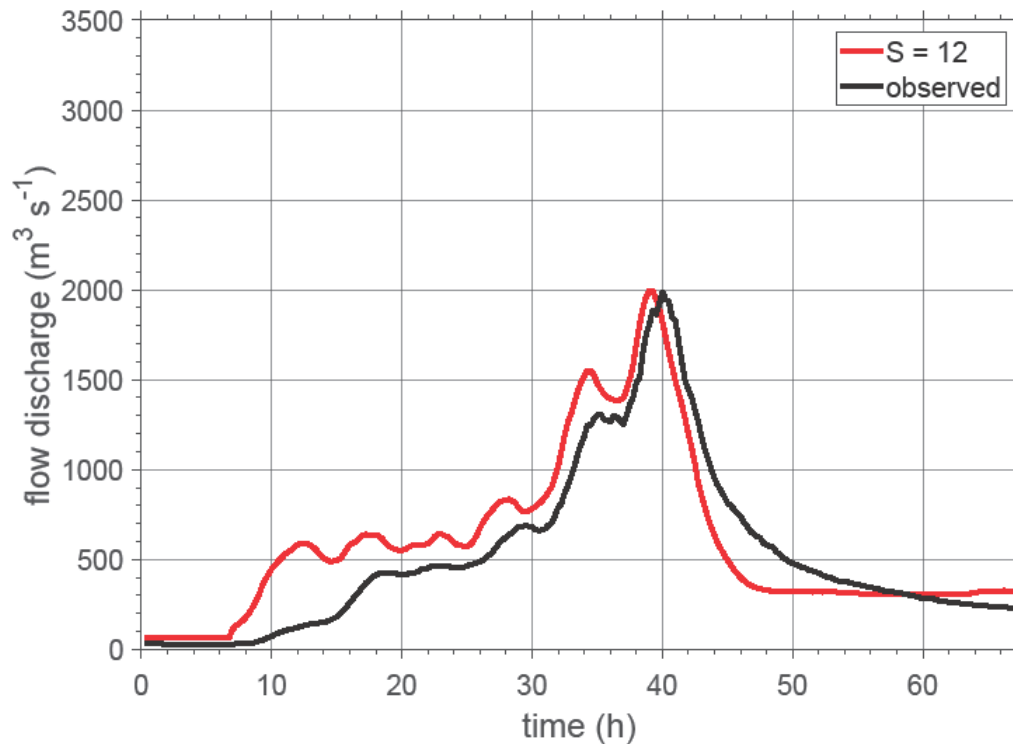


Figura 3.33. Simulazione 12, evento dicembre 2017, portata a Calamazza.

Si scelgono i parametri individuati dalla simulazione 12 (Figura 3.35, Figura 3.36). Nonostante il relativo valore di NSE non sia il più elevato, è la simulazione che meglio si avvicina alla curva osservata in corrispondenza del picco dell'evento che, nell'ambito della valutazione del comportamento dei fenomeni di inondazione, viene considerato un aspetto prioritario rispetto alla sola valutazione numerica.

3.4 Valutazione della sicurezza

Per la valutazione dello stato di fatto della sicurezza idraulica del Fiume Magra è stato amplificato l'evento di precipitazione considerato nelle sezioni precedenti relativo al 12 dicembre 2017. Il problema viene semplificato utilizzando i dati pluviometrici forniti dal solo pluviometro di Bagnone – baricentrico per il bacino – e considerando la precipitazione uniforme su tutta l'area di drenaggio in modo da simulare un evento di precipitazione con tempo di ritorno pari a 200 anni. Per compiere questa operazione sono stati considerati i dati relativi alla curva di probabilità pluviometrica (LSPP) che, per un assegnato tempo di ritorno, descrive l'andamento della precipitazione cumulata con la durata di precipitazione (Figura 3.37).

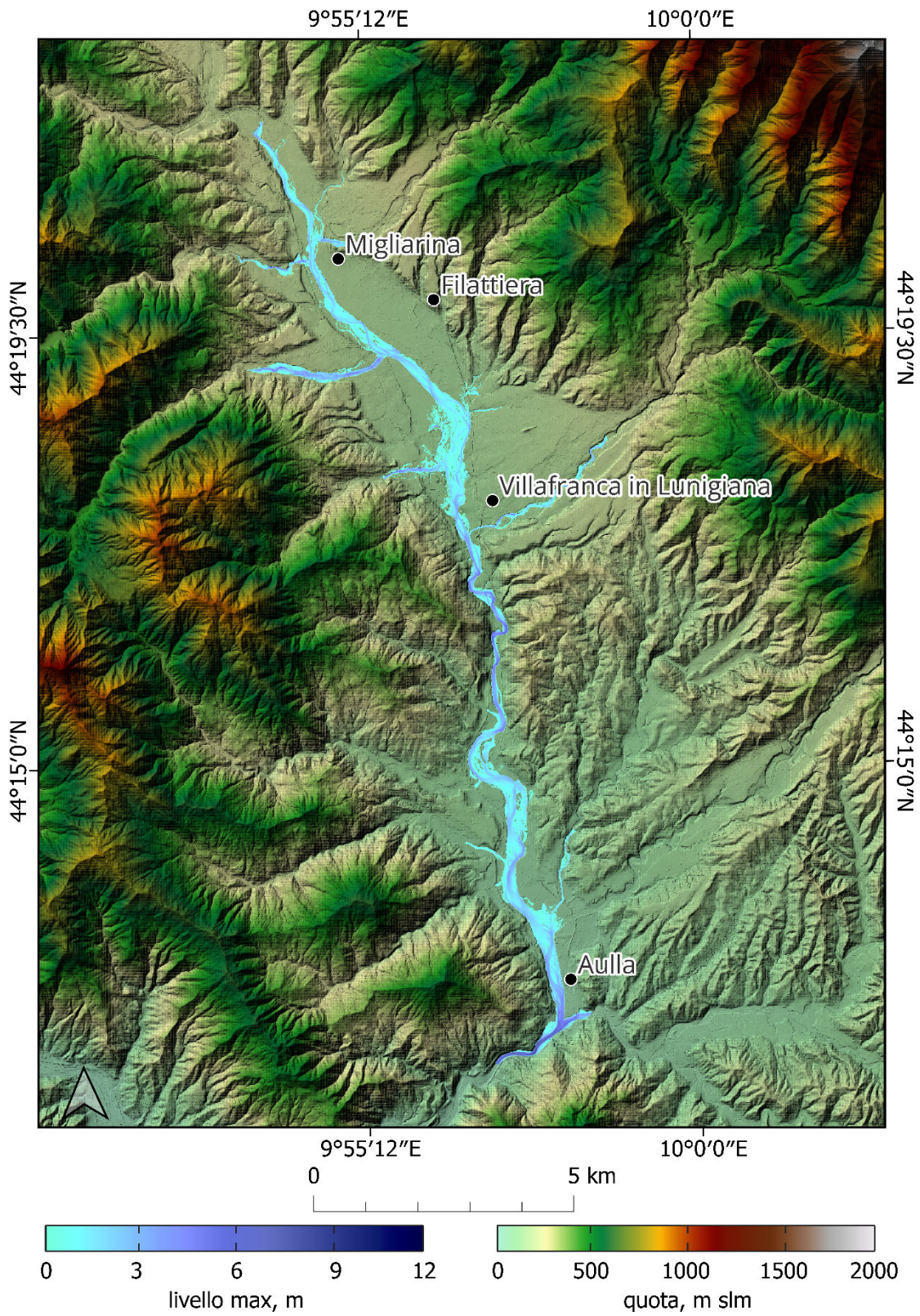


Figura 3.34. Simulazione 12, livello massimo, dicembre 2017.

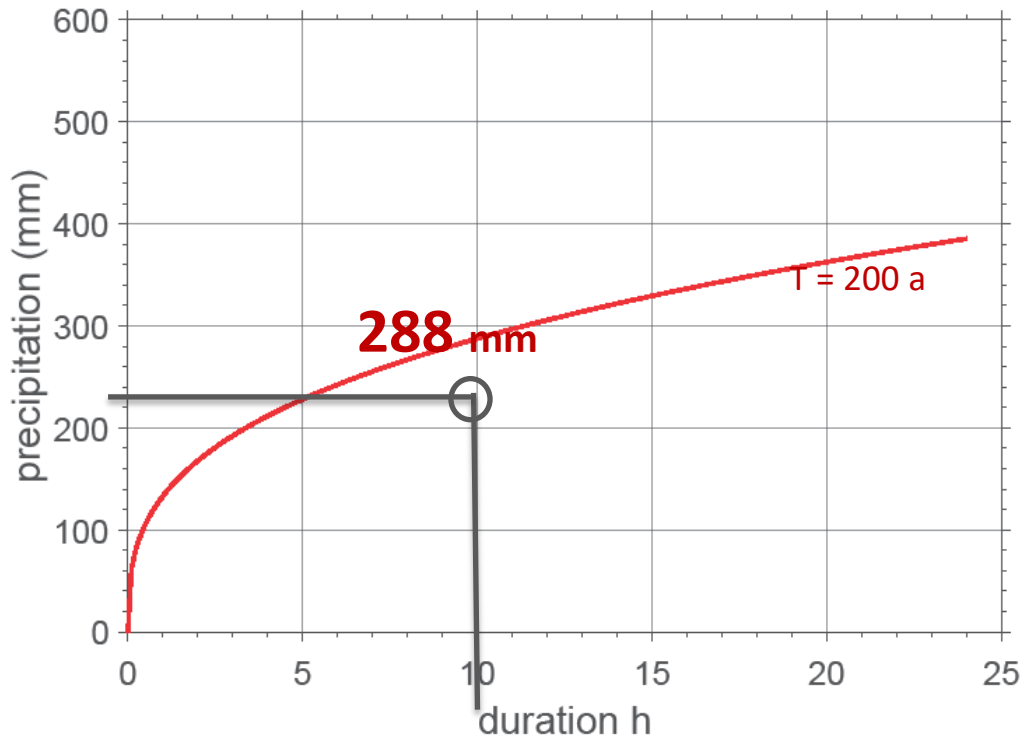


Figura 3.35. Linea segnalatrice di probabilità pluviometrica per il pluviometro di Bagnone con tempo di ritorno pari a 200 anni.

È stata scelta una durata di 10 ore, di poco superiore al tempo di corrivazione del bacino chiuso in località Calamazza (circa 8 ore). All'interno della finestra temporale dell'evento che va dal 10 dicembre 2017 ore 10:00 al 12 dicembre 2017 ore 5:00, è stata fatta scorrere una finestra temporale corrispondente alla durata di 10 ore fino ad individuare l'altezza di precipitazione cumulata massima. Tale valore viene scalato fino al raggiungimento del corrispondente valore nella curva LSPP.

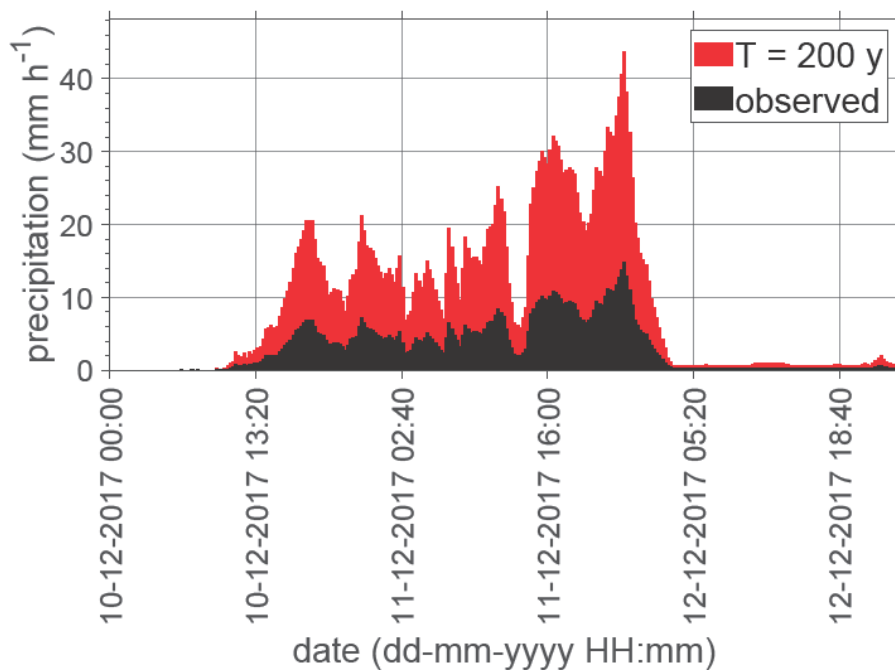


Figura 3.36. Evento dicembre 2017 amplificato.

Il nuovo dato di precipitazione è stato implementato all'interno del modello afflussi-deflussi e applicato ai 24 sottobacini di monte precedentemente descritti. I 24 idrogrammi di piena ottenuti sono stati assegnati alle condizioni al contorno del modello idraulico (paragrafo 3.3.2).\

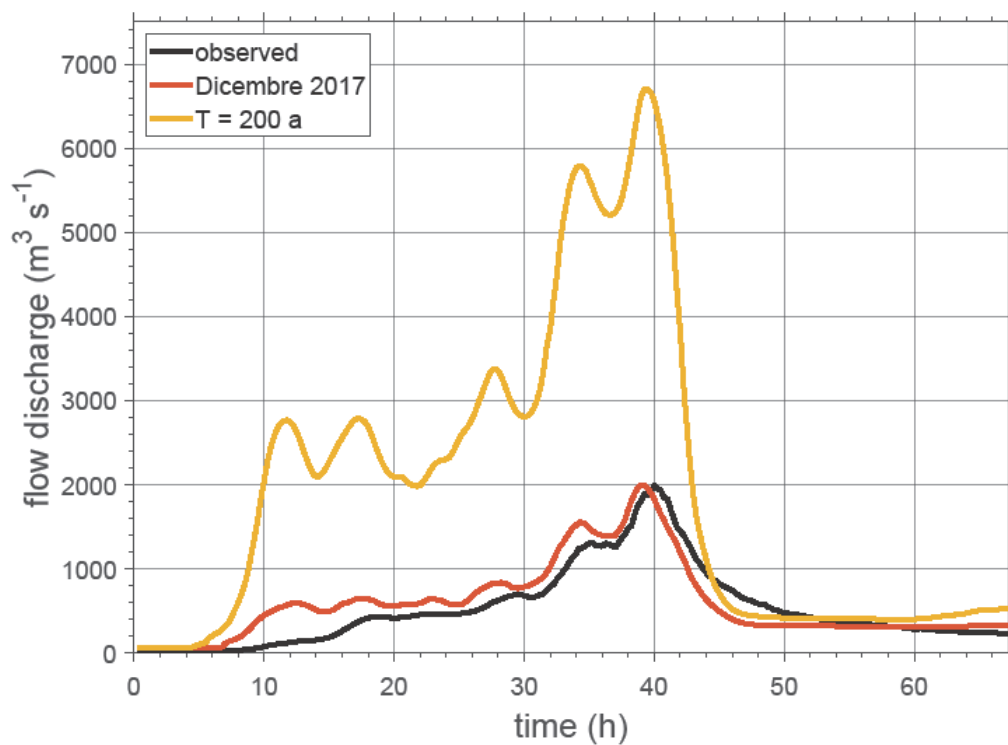


Figura 3.37. Risultato simulazione con tempo di ritorno pari a 200 anni confrontato con l'evento del dicembre 2017.

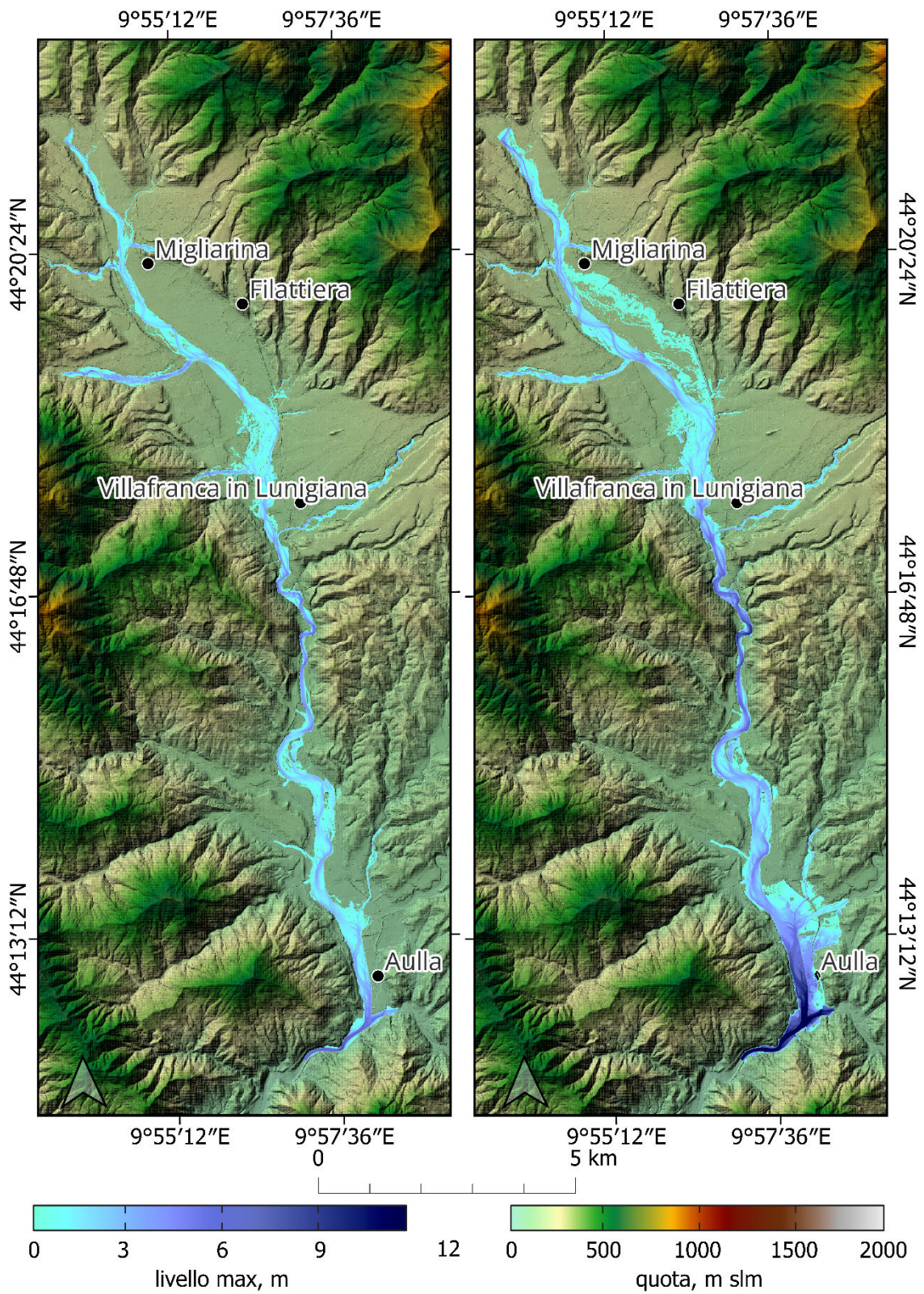


Figura 3.38. Confronto tra l'evento del dicembre 2017 (a sinistra) e l'evento amplificato (a destra).

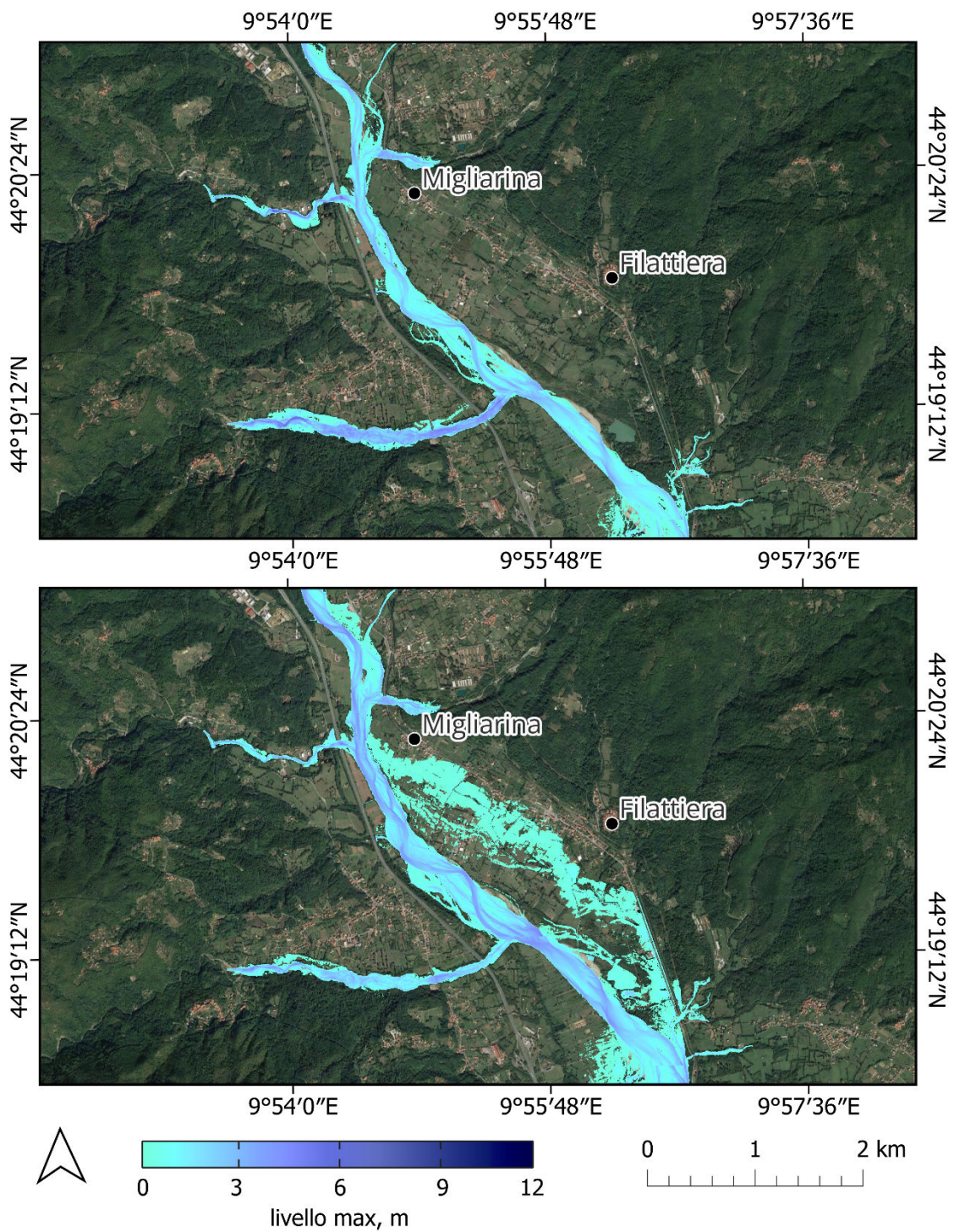


Figura 3.39. Dettaglio dell'area Migliarina-Filattiera. Confronto tra l'evento del dicembre 2017 (in alto) e l'evento amplificato (in basso).

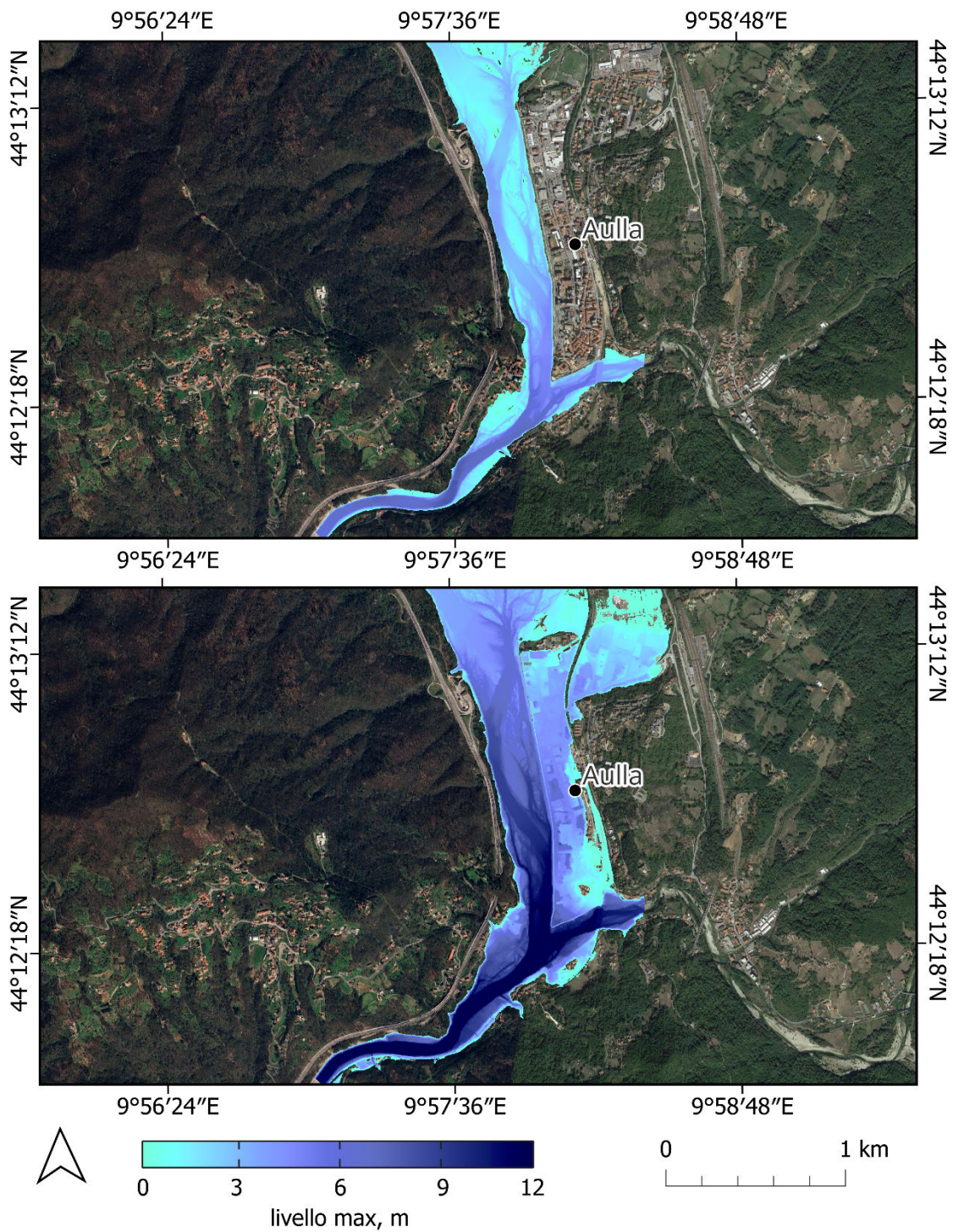


Figura 3.40. Dettaglio dell'area di Aulla. Confronto tra l'evento del dicembre 2017 (in alto) e l'evento amplificato (in basso).

Dalla Figura 3.40 si evince come globalmente la simulazione effettuata per l'evento del dicembre 2017 rimanga all'interno dell'alveo, mentre per l'evento amplificato si possono notare esondazioni nelle zone di Migliarina-Filattiera e Aulla (Figura 3.41, Figura 3.42).

L'esondazione nella zona di Migliarina-Filattiera (Figura 3.41) produce un danno limitato, in quanto interessa aree agricole, aree boschive e solo poche abitazioni; viceversa, l'esondazione su Aulla (Figura 3.42) produce danni molto elevati in quanto vengono interessate zone residenziali, zone produttive e zone commerciali.

3.5 Conclusioni

I metodi presentati e i modelli calibrati permettono di descrivere il comportamento idrologico ed idraulico del bacino del Fiume Magra, nella porzione che interessa il territorio della Lunigiana.

Lo studio è in una fase che può essere definita preliminare, ma si evince come i metodi presentati siano efficaci nella valutazione e simulazione degli eventi di piena; in una fase successiva possono essere arricchiti con dati territoriali più diffusi e più accurati, come ad esempio, un modello digitale del terreno a risoluzione maggiore o una rete di pluviometri più ricca.

Parte IV
Programmi di Formazione

4 Programmi di Formazione

4.1 Summer School in Lunigiana

Al fine di promuovere una moderna gestione delle risorse idriche, appropriata per la Green Community della Lunigiana, è stata organizzata una Summer School intitolata “Acqua Potabile, Siccità, Alluvioni e una Nuova e Consapevole Gestione della Risorsa Acqua.” Questa Summer School è stata organizzata dall’Unione di Comuni Montana della Lunigiana, dall’Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, dalla Rete Toscana Professioni Tecniche, dall’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Massa Carrara. Lo scopo principale della Summer School è evidenziare la necessità di gestire la risorsa idrica con rigore metodologico nelle diverse fasi in cui essa è scarsa oppure è sovrabbondante, e rimarcando in particolare l’importanza della risorsa idrica in montagna dove questa è spesso incontaminata e utilizzabile per la produzione e lo stoccaggio di energia pulita. L’organizzazione della Summer School e il pernottamento degli studenti sono stati finanziati dalla Comunità Europea attraverso il programma NextGenerationEU. La Summer School si è tenuta presso il Centro Didattico Pieve di Sorano dal giorno 1 al giorno 5 luglio 2024. La locandina della Summer School è riportata nella Figura 4.1.

La Summer School è stata rivolta agli studenti dei Corsi di Laurea, Laurea Magistrale, e Dottorato di Ricerca presenti, agli Ingegneri e Geologi Professionisti, al Personale della Protezione Civile, e a tutti gli interessati presenti in aula. È stato fatto uno sforzo per rendere comprensibili tutti i temi trattati, dall’Idraulica alla Morfodinamica Fluviale, dalla Idrologia alla Gestione della Risorsa Idrica e il Controllo delle Piene Fluviali. Uno degli obiettivi della Summer School è stato quello di stabilire un punto di incontro informale tra chi sviluppa i metodi di gestione delle risorse idriche in ambito accademico e chi opera concretamente sul territorio in modo da identificare le moderne tecnologie che possono effettivamente essere utili alla Green Community della Lunigiana. Le frequenti interazioni con i partecipanti che risiedono e operano nel territorio della Lunigiana hanno condotto a un reciproco arricchimento dei partecipanti ottenuto fondendo contenuti teorici e riscontri reali vissuti sul territorio.

La Summer School è iniziata lunedì, 1 luglio 2024, alle ore 9:30 con una lezione di carattere teorico sulla Meccanica dei Fluidi, l’Idrologia e le Costruzioni Idrauliche. Il pomeriggio è stato dedicato all’incontro di chi opera concretamente sul territorio italiano per la soluzione dei problemi specifici della montagna. Sono intervenuti i rappresentanti della Unione dei Comuni Montana della Lunigiana, Gianni Bocchieri, Giovanni Vetrutto, e Sergio Vasarri, Dipartimento Affari Generali e Autonomie, Giampiero Lupatelli, Economista Territoriale del CAIRE, Fausto Giovannelli e Raffaella Mariani, Parco Appennino Tosco-Emiliano, Antonio Nicoletto, Legambiente, Fabio Renzi, Fondazione Symbola, e Marco Mussone, Unione Nazionale Comuni Comunità Enti Montani (UNCCEM). L’UNCCEM è l’organizzazione nazionale unitaria che da oltre 60 anni raggruppa e rappresenta i comuni interamente e parzialmente montani le comunità montane e le Unioni di comuni montani. Nel corso del dialogo sono stati toccati numerosi problemi delle comunità montane che si collegano in modo diretto o indiretto alla gestione delle risorse idriche. Sono state in particolare menzionate la necessità di immagazzinare la risorsa idrica abbondante nelle stagioni fredde per il suo uso nella stagione estiva, quando il territorio della Lunigiana cresce notevolmente in popolazione per effetto del ritorno alle case di vacanza. È stato fatto un esplicito riferimento all’uso

dei serbatoi montani per la produzione e lo stoccaggio idroelettrico, ricordando che si tratta della fonte di energia con il minore impatto sulla produzione di CO₂ e quindi perfettamente appropriata per la Green Community della Lunigiana.

Le lezioni svolte hanno riguardato:

- Introduzione alla Meccanica dei Fluidi, Stefano Orlandini e Marco Redolfi
- Introduzione alla Idrologia, Stefano Orlandini
- Introduzione alle Costruzioni Idrauliche, Stefano Orlandini e Simone Pizzileo
- Gestione delle Risorse Idriche, Stefano Orlandini e Marco Redolfi
- Protezione Idraulica del Territorio, Giovanni Moretti e Stefano Orlandini
- Esercitazioni, Giovanni Moretti, Simone Pizzileo, e Riccardo Gasperoni

Nel corso delle lezioni vi sono stati interventi su:

- Innovazioni e sviluppo presso GAIA SpA, Severino Borrini
- Esperienze del Comune di Pontremoli, Roberto Bertolini

Le visite sul campo hanno riguardato:

- Visita a opere di presa e a una Centrale Idroelettrica
- Visita a un cantiere per la realizzazione di un'opera di difesa idraulica

RETE TOSCANA PROFESSIONI TECNICHE

Unione di Comuni Montano Lunigiana

Comune di Sorano

Finanziato dall'Unione europea

UNIMORE
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MODENA E REGGIO EMILIA

Summer school in Lunigiana

Acqua potabile, siccità, alluvioni e una nuova e consapevole gestione della risorsa acqua

A cura del **professor Stefano Orlandini**, docente del Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" dell' Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Dal 1 al 5 luglio 2024

Dove? A Filattiera presso il **Centro Didattico Pieve di Sorano**

Lunedì 1 luglio 2024
Introduzione alla Meccanica dei Fluidi
Dalle 9.30 alle 12.30
Leggi fondamentali
Correnti in pressione
Correnti a pelo libero
Moti di filtrazione
Marco Redolfi, Stefano Orlandini
Dalle 15.00 alle 18.00
Green Community Lunigiana, Garfagnana e Montagna del latte dialogano con il presidente UCML,
Gianni Bocchieri, Giovanni Vetrutto, Sergio Vasarri | Dipartimento Affari regionali e Autonomie
Giampiero Lupatelli | Economista territoriale, CAIRE
Fausto Giovanelli e Raffaella Mariani | Parco Appennino Tosco-Emiliano
Antonio Nicoletti | Legambiente
Fabio Renzi | Fondazione Symbola
Marco Bussone | Unceem

Martedì 2 luglio 2024
Introduzione alla Idrologia
Dalle 9.30 alle 12.30
Ciclo idrologico
Precipitazione
Evaporazione
Risposta del suolo
Propagazione delle acque
Stefano Orlandini
Dalle 14.00 alle 16.00
Esercitazioni
Simone Pizzileo, Riccardo Gasperoni, Giovanni Moretti

Mercoledì 3 luglio 2024
Introduzione alle Costruzioni Idrauliche
Dalle 9.30 alle 12.30
Acquedotti
Fognature
Serbatoi
Simone Pizzileo, Stefano Orlandini
Dalle 14.00 alle 17.00
Esperienza con Gaia S.p.a
Severino Borrini | Ufficio innovazione e sviluppo
Esercitazioni
Simone Pizzileo, Riccardo Gasperoni, Giovanni Moretti

Giovedì 4 luglio 2024
Gestione delle Risorse Idriche
Dalle 9.30 alle 12.30
Bilanci idrici
Morfodinamica fluviale
Stefano Orlandini, Marco Redolfi
Dalle 14.00 alle 16.00
Visita sul campo

Venerdì 5 luglio 2024
Protezione Idraulica del Territorio
Dalle 9.30 alle 12.30
Le arginature
Le alluvioni
Giovanni Moretti, Stefano Orlandini
Dalle 14.00 alle 16.00
Visita sul campo

Iscriviti qui: <https://forms.gle/s3jXuTsbG9jmtmTo8>

Figura 4.1. Locandina della Summer School in Lunigiana tenuta dal giorno 1 al giorno 5 luglio 2024 presso il Centro Didattico Pieve di Sorano.

4.2 Temi Rilevanti

Accanto alle lezioni introduttive che hanno riguardato concetti fondamentali della gestione delle risorse idriche, sono stati toccati argomenti particolari quali la morfodinamica fluviale e la realizzazione dei serbatoi montani. Alla luce della EU Nature Restoration Law, vi è oggi un forte impulso a naturalizzare o rinaturalizzare i corsi d'acqua, eliminando barriere al flusso idrico e in generale le limitazioni al deflusso imposte dall'Uomo. La rinaturalizzazione dei corsi d'acqua è possibile, ma richiede sforzi economici enormi e una approfondita conoscenza dei meccanismi di evoluzione dei corsi d'acqua. È apparso pertanto utile includere tra i temi della Summer School un'introduzione alla Morfodinamica Fluviale come illustrato nella Figura 4.2.



Figura 4.2. Lezione del Prof. Marco Redolfi sulla Morfodinamica Fluviale.

Un secondo argomento di fondamentale importanza nella gestione delle risorse idriche in ambiente montano è la realizzazione dei serbatoi. Se da un lato i serbatoi montani sbarrano le valli determinando barriere al flusso, d'altro canto essi permettono di regolare i deflussi mitigando gli effetti delle precipitazioni sovrabbondanti nelle stagioni fredde e costituendo una riserva per l'estate ai fini dell'uso pubblico in periodi dove la popolazione della Lunigiana cresce significativamente per il ritorno alle case di vacanza, dove l'agricoltura richiede notevoli volumi di acqua per l'irrigazione, e dove spesso la richiesta energetica è alta. I serbatoi montani permettono di ridurre i prelievi dagli acquiferi e costituiscono una fonte di energia pulita utile in sé e in combinazione con altre fonti rinnovabili. I serbatoi montani rappresentano un'alterazione ai sistemi fluviali che può avere effetti benefici non solo in termini economici ma anche in termini ambientali. Meritano pertanto una grande attenzione anche nell'ottica dello sviluppo della Green Community della Lunigiana. La presenza di serbatoi sul territorio della Lunigiana è stata analizzata in una lezione come illustrato nella Figura 4.3.



Figura 4.3. Lezione del Prof. Giovanni Moretti sui serbatoi esistenti in Lunigiana.

4.3 Visite sul Campo

Le visite sul campo sono state organizzate in modo spontaneo sulla base delle interazioni tra relatori e partecipanti alla Summer School. Una prima visita è stata condotta nel Comune di Fivizzano per comprendere il funzionamento della centrale idroelettrica di Arlia, come riportato in Figura 4.4. La centrale di Arlia non è stata, per Fivizzano, il primo caso di sfruttamento delle acque per la produzione di energia. Grazie, infatti, all'invenzione della dinamo e della lampada ad incandescenza di Tommaso Edison ed alla lungimiranza di alcuni imprenditori locali, la comunità fivizzanese fu la prima della provincia di Massa Carrara e della Spezia "ad avere la pubblica e privata illuminazione elettrica". In uno scritto del prof. Pietro Tedeschi si legge che il progetto di sostituire i lampioni a petrolio con lampade elettriche fu discusso ed approvato il 14 dicembre 1893. Il piccolo impianto fu inaugurato nel marzo del 1895. Per il funzionamento della dinamo da alcuni fu proposto "un impianto ad acqua fluente al ponte di Posara", mentre altri intendevano utilizzare "la cascata della Ferriera Arnavas, incrementata dal canale della Concia". Nella Valle del Lucido, invece, la luce elettrica arrivò nel 1925, come scrive il prof. Giorgio Pellegrinetti, "anche se una centrale elettrica esisteva già dalla fine del XIX secolo, costruita dalla Walton, proprietaria delle cave del monte Sagro e di Equi e di una grande segheria a Monzone". Vi è pertanto una lunga tradizione in Lunigiana nello sfruttamento delle risorse idriche per la produzione di energia. Le diverse interazioni che si sono avute durante la Summer School indicano la necessità di rivedere in chiave moderna l'utilizzo delle risorse idriche in Lunigiana come strumento ottimale per la produzione e lo stoccaggio idroelettrico, anche in combinazione con altre fonti energetiche rinnovabili.



Figura 4.4. Visite sul campo alle opere idrauliche rilevanti nel territorio della Lunigiana.

Riguardo alla sistemazione dei corsi d'acqua, è stata condotta una seconda visita a un cantiere presso Terrarossa, dov'è in corso di realizzazione una muratura di sponda lungo il torrente Civiglia. L'intervento ha un costo di un milione di euro e riguarda in particolare nel tratto fra il castello Terrarossa e il ponte della Strada statale 64 (in località Terrarossa), nel Comune di Licciana Nardi. Rientra nei lavori di manutenzione straordinaria del Consorzio 1 Toscana Nord. "Un intervento che riporterà il ripristino di questa area delicata dal punto di vista idraulico – ha detto il presidente del Consorzio, Ismaele Ridolfi. Le opere in progetto garantiranno infatti il contenimento della portata duecentennale del torrente, consentendo pertanto la messa in sicurezza delle aree limitrofe nei confronti delle possibili esondazioni." L'obiettivo di questi lavori è l'adeguamento delle arginature destra e sinistra del tratto del torrente al fine di evitare gli allagamenti periodici che finora si sono verificati nelle aree limitrofe al corso d'acqua. Aree caratterizzate dalla presenza di numerose attività industriali e commerciali. È previsto dal Consorzio che venga realizzato in destra idraulica un muro in cemento armato, in prosecuzione del tratto già presente per circa 240 metri. Il muro sarà realizzato a tergo del muro in pietra esistente, così da non avere alcuna interferenza con quest'ultimo dal punto di vista strutturale. L'Ente realizzerà anche una scogliera cementata in massi da 1 a 3 tonnellate a delimitazione dell'alveo di magra, posta in alveo in posizione antistante all'esistente muro in pietra. Sulla sinistra idraulica è prevista la realizzazione di nuova arginatura in terra – in sostituzione di quella attuale – con andamento curvilineo e quota di sommità non adeguata al contenimento della portata duecentennale per una lunghezza di 340 metri circa. Prevista anche la rimozione della rampa stradale di accesso alla statale 64 immediatamente a sinistra dell'alveo per realizzare una scogliera in massi cementati lunga una ventina di metri a protezione della sponda dell'alveo, che in tale punto è soggetto a erosione. "A fine lavori, durante i quali verrà arrecato meno disturbo possibile alle specie faunistiche presenti – chiude Ridolfi – lungo l'argine faremo anche la piantumazione di essenze autoctone tipiche della vegetazione fluviale. Siamo riusciti a raggiungere l'obiettivo di mettere in sicurezza un'area che presenta criticità elevate e, al tempo stesso, dare una risposta alle esigenze della comunità di Licciana Nardi."

Al termine della Summer School è stato consegnato un attestato di frequenza ai partecipanti come riportato nella Figura 4.5. Pare che vi sia stata reciproca soddisfazione da parte degli organizzatori e dei partecipanti. Il dialogo continuo instaurato durante la Summer School ha permesso da un lato di migliorare la conoscenza del territorio della Lunigiana, e più in generale delle Comunità Montane, da parte di chi è stato incaricato a svolgere il presente Masterplan, e d'altro canto ha dato consapevolezza di moderni metodi per la gestione delle risorse idriche a chi opera direttamente sul territorio. Il presente Masterplan non possiede i requisiti di completezza e di approfondimento necessari per risolvere i problemi della Green Community in materia di risorse idriche. L'auspicio è, comunque, che possa rappresentare un valido punto di partenza per lo sviluppo, nel corso degli anni, delle corrette politiche di gestione delle risorse idriche nelle Comunità Montane e in particolare per la Green Community della Lunigiana.



Figura 4.5. Rilascio degli Attestati di Frequenza alla Summer School.

4.4 Primi Riconoscimenti

La Green Community Lunigiana è stata premiata da Legambiente e UNCEM a Festambiente 2024, Grosseto, per la Summer School sull'acqua, per le politiche di sviluppo territoriali volte a contrastare spopolamento, a garantire rivitalizzazione delle zone agricole, a essere “una buona pratica di sostenibilità ambientale che in Italia possono essere un traino per raggiungere la completa transizione ecologica ed energetica a emissioni zero,” come hanno sottolineato ieri sera a Rispecchia il Presidente di Legambiente Stefano Ciafani e Antonio Nicoletti, alla guida del Dipartimento Parchi, Montagna e Foreste di Legambiente nazionale. Con loro, a consegnare il Premio all'Unione montana di Comuni della Lunigiana, il Presidente UNCEM Marco Bussone. A ricevere la targa, presente l'assessora regionale dell'Emilia-Romagna a Foreste e Parchi, Barbara Lori, Gianluigi Giannetti, Sindaco di Fivizzano e Presidente dell'Unione Montana Lunigiana. “Stiamo facendo un grande lavoro per attuare il piano che ci è stato finanziato dal PNRR e per dire come il territorio può trasformarsi – ha detto Giannetti, la Green Community è strumento avanzato proprio per coinvolgere le comunità. Insieme ad altre Green Community costruiamo futuro. Siamo onorati di questo premio.”

Nel corso della serata, UNCEM, Legambiente, Fondazione Symbola (con il Segretario generale Fabio Renzi), Federparchi (con il Presidente Luca Santini), PEFC (con il

Segretario generale Antonio Brunori) hanno sottoscritto un patto per lo sviluppo e la crescita delle Green Communities, anche nel quadro del Programma ITALIAE del Dipartimento Affari regionali e Autonomie della Presidenza del Consiglio dei ministri. Intesa e collaborazione per sostenere i territori, accompagnarli, chiedere insieme nuovi fondi al Governo, per finanziare tutti i 160 progetti di Green Communities presentati dai territori italiani (quasi 1500 Comuni) sul PNRR (40 sono già stati finanziati) e per rafforzare le collaborazioni tra Enti locali montani ed Enti parco, nazionali e regionali, per dare forza e sviluppo ad azioni di neopopolamento, crescita economica e sociale, nuovi servizi anche all'interno delle aree protette, "dove vi sono centinaia di paesi che hanno urgenza di Politiche che uniscano protezione allo sviluppo – ha rilevato il Presidente UNCEM Bussone – ad esempio sulla pianificazione, certificazione e gestione forestale, sul recupero di aree agricole oggi invase dal bosco, sull'attivazione di filiere e di posti di lavoro, sulla garanzia di servizi, come scuola, trasporti, sanità, digitalizzazione che interessino anche le aree protette, vissute e rigenerate dall'intreccio tra uomo e natura." Aree parco vive. Con paesi vivi e vissuti. "In fondo – ha concluso Bussone a Festambiente – le Green Communities sono tutto questo. Necessarie e urgenti. Comunitarie davvero, non elenco di spesa pubblica. Sintesi del futuro, della valorizzazione dei beni collettivi. Foreste pianificate in modo sostenibile, certificato, che generano lavoro e impresa. Agricoltura che conquista aree coltivabili e protegge i paesi, come ci insegna il Parco delle Cinque Terre. Antenne per i segnali radio, per la telefonia, necessari anche nei parchi. Strumenti antidoto all'ideologia. Ambientalismo concreto, virtuoso e lungimirante come mostra Legambiente. Grazie ad Antonio Nicoletti per l'idea e la forza di volontà, con Stefano Ciafani. Con lui diciamo SI alle rinnovabili che fanno bene alle comunità, contro ogni NO e contro le speculazioni. Green Communities cuore della politica per i territori, paesi e Comuni insieme, affrontando compiutamente crisi climatica e crisi demografica."

5 Riferimenti Bibliografici

- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005), Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2018), The State of Food Security and Nutrition in the World 2018: Building Climate Resilience for Food Security and Nutrition. <http://www.fao.org/state-of-food-security-nutrition/en/>
- Fekete, B. M., Vörösmarty, C. J., and Grabs, W. (2002), High-resolution fields of global runoff combining observed river discharge and simulated water balances. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(3), 15-1-15-10.
- Gleick, P. H. (1996), Basic Water Requirements for Human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, 21(2), 83-92.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2019), Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Moisello, U (1999), *Idrologia Tecnica. La goliardica pavese*, Pavia, Italia.
- Moretti, G., and S. Orlandini (2023), Thalweg and ridge network extraction from unaltered topographic data as a basis for terrain partitioning. *J. Geophys. Res. Earth Surface*, 128(4), e2022JF006,943. <https://doi.org/10.1029/2022JF006943>.
- Orlandini, S. (1999), Two-layer model of near-surface soil drying for time-continuous hydrologic simulations, *J. Hydrol. Eng. Am. Soc. Civ. Eng.*, 4(2), 91–99.
- Orlandini, S., M. Mancini, C. Paniconi, and R. Rosso (1996), Local contributions to infiltration excess runoff for a conceptual catchment scale model, *Water Resour. Res.*, 32(7), 2003–2012.
- Pizzileo, S., G. Moretti, and S. Orlandini (2024), Flood plain inundation modeling with explicit description of land surface macrostructures. *Adv. Water Resour.*, 188, 104713. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104713>.
- UN Water. (2021), Water and Climate Change. <https://www.unwater.org/water-facts/climate-change>
- United Nations World Water Assessment Programme (UN WWAP) (2015), The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. Paris, UNESCO.
- United States Army Corp of Engineers (USACE) (2016), HEC-RAS River Analysis Systems User manual, version 5.0. US Army Corp of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- World Bank (2020), Water Storage, Climate Change, and Sustainable Development. <https://www.worldbank.org/en/topic/water>
- World Health Organization (WHO) (2017), Guidelines for Drinking-water Quality, 4th Edition. WHO Press, Geneva, Switzerland.