

Rapporto
della Commissione tecnico-scientifica
istituita con deliberazione della Giunta
Regionale n. 984/2023 e determinazione
dirigenziale 14641/2023, al fine di
analizzare gli eventi meteorologici
estremi del mese di maggio 2023

Autori:

Prof. Armando Brath armando.brath@unibo.it (Coordinatore)

Prof. Nicola Casagli nicola.casagli@unifi.it

Prof. Marco Marani marco.marani@unipd.it

Dott.ssa Paola Mercogliano paola.mercogliano@cmcc.it

Prof. Renzo Motta renzo.motta@unito.it

Sommario

1	INTRODUZIONE	5
2	INQUADRAMENTO DELL'AREA IN ESAME	6
2.1.1	<i>Inquadramento geomorfologico</i>	6
2.1.2	<i>Inquadramento geologico</i>	7
3	CARATTERIZZAZIONE IDROLOGICO-IDRAULICA DELL'EVENTO	9
3.1	VALUTAZIONE DEI VOLUMI DI PIOGGIA CADUTI SUI BACINI	12
3.2	LA RACCOLTA DELL'INFORMAZIONE IDROLOGICA STORICA	20
3.3	IL CONFRONTO CON L'EVENTO DEL MAGGIO-GIUGNO 1939	21
3.4	CARATTERIZZAZIONE STATISTICA DELLE PIOGGE AREALI E STIMA DEL LORO TEMPO DI RITORNO	26
3.4.1	<i>Confronti tra eventi storici notevoli</i>	27
3.4.2	<i>L'analisi statistica dei valori estremi: metodi</i>	37
3.4.3	<i>L'analisi statistica dei valori estremi per durate di uno e due giorni (1921-2023)</i>	37
3.4.4	<i>L'analisi statistica dei valori estremi di durate inferiori al giorno (1991-2023)</i>	47
3.5	ANALISI DEI DATI IDROMETRICI DELL'EVENTO	56
4	CARATTERIZZAZIONE DEI MOVIMENTI GRAVITATIVI DI VERSANTE	60
4.1	TIPOLOGIE DI FRANA	61
4.1.1	<i>Scorrimenti rapidi di terra e/o detrito (tipologia A)</i>	62
4.1.2	<i>Colate di detrito non canalizzate (tipologia B)</i>	64
4.1.3	<i>Colate di detrito canalizzate (tipologia C)</i>	65
4.1.4	<i>Colate di terra e/o fango (tipologia F)</i>	66
4.1.5	<i>Scorrimenti traslativi e/o rotazionali (tipologia R)</i>	67
4.1.6	<i>Scivolamenti in roccia su piano di strato (tipologia SCST e SCSTI)</i>	68
4.1.7	<i>Frane complesse (tipologia CMPL)</i>	69
4.1.8	<i>Crolli o scivolamenti/crolli (tipologia CR)</i>	70
4.1.9	<i>Frane di attribuzione incerta (tipologia INC)</i>	70
4.2	DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA DELLE FRANE	71
4.2.1	<i>Confronto con le isoiete dell'evento</i>	74
4.2.2	<i>Confronto con la litologia</i>	77
4.2.3	<i>Confronto con la mappa inventario regionale delle frane</i>	81
4.2.4	<i>Confronto con le aree a pericolosità idrogeologica</i>	82
4.2.5	<i>Confronto con l'uso del suolo</i>	84
4.2.6	<i>Impatto sulle strutture e sulle infrastrutture</i>	86
4.3	CONDIZIONI PLUVIOMETRICHE DI INNESCO DELLE FRANE	91
4.3.1	<i>Soglie pluviometriche di innesco</i>	91
4.3.2	<i>Soglie pluviometriche di innesco per la Regione Emilia-Romagna</i>	91
4.3.3	<i>Confronto tra eventi pluviometrici del maggio 2022 e le soglie d'innesco</i>	94
5	CARATTERIZZAZIONE DEI PRINCIPALI CAMBIAMENTI NELL'USO DEL SUOLO	99
5.1	RUOLO DELLA COPERTURA FORESTALE NELLA REGIMAZIONE DELLE ACQUE	99
5.2	RUOLO DELLA COPERTURA FORESTALE IN EVENTI ECCEZIONALI	101
5.3	LE DINAMICHE DI COPERTURA FORESTALE	103
5.4	IL CAMBIO DI COPERTURA FORESTALE TRA IL 1936 ED IL 2014	107
5.5	SUPERFICIE AGRICOLA UTILIZZATA (SAU)	111
5.6	RISCHIO IDRAULICO E CONSUMO DI SUOLO	112
5.7	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	114
6	SCENARI CLIMATICI PER LE FORZANTI IDROLOGICHE	116
6.1	LE ANALISI DI SCENARIO	116

6.2	LE CURVE IDF	118
7	CAMBIAMENTI ATTESI DELLE FORZANTI IDROLOGICHE NEGLI SCENARI CLIMATICI FUTURI	123
7.1	ANALISI DEI CAMBIAMENTI ATTESI NEI VALORI ESTREMI DELLE PIOGGE GIORNALIERE	123
7.2	L'ANALISI STATISTICA DEI CAMBIAMENTI ATTESI NEI VALORI ESTREMI DELLE PIOGGE DI BREVE DURATA	127
7.3	ANALISI DEI CAMBIAMENTI ATTESI NELLE CURVE DI POSSIBILITÀ CLIMATICA	135
8	CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	139
8.1	SINTESI DELLE PRINCIPALI RISULTANZE DELLO STUDIO	139
8.2	RACCOMANDAZIONI SULLE MISURE DI RIDUZIONE DEL RISCHIO	140
8.2.1	<i>Interventi non strutturali</i>	141
8.2.2	<i>Interventi strutturali</i>	142
9	RINGRAZIAMENTI	145
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	146

1 Introduzione

A partire dalla serata del giorno 1 maggio 2023 fino al giorno 3 maggio 2023, il territorio della Regione Emilia-Romagna è stato interessato da eventi idro-meteorologici di eccezionale intensità che hanno determinato una grave situazione di criticità particolarmente nelle province di Forlì-Cesena, Ravenna, Bologna, Modena e Reggio Emilia.

Nei giorni 16-17 maggio si è verificato un ulteriore evento meteorologico estremamente intenso che, oltre a interessare i territori delle province romagnole sopra indicate e di quella di Bologna, ha colpito intensamente anche il territorio della provincia di Rimini.

Questi eventi meteorologici eccezionali hanno provocato numerosissime alluvioni e frane con conseguente isolamento di molte località, evacuazione di numerose famiglie dalle loro abitazioni, gravi danni a infrastrutture lineari, ad aziende agricole, a edifici pubblici e privati, alle opere di difesa idraulica e alla rete dei servizi essenziali.

In considerazione degli ingenti danni causati, si sono rese necessarie valutazioni specifiche e qualificate circa l'analisi dell'evento per aggiornare il quadro conoscitivo e fornire indicazioni e linee di indirizzo operative per una futura corretta gestione del rischio idrogeologico nella Regione.

La Regione ha quindi ritenuto necessario disporre di valutazioni altamente qualificate finalizzate alla migliore comprensione degli eventi occorsi. In tale ottica la Giunta Regionale, con DGR n. 984/2023, ha dato mandato al Direttore generale Cura del territorio e dell'ambiente di costituire un'apposita Commissione di elevato profilo tecnico-scientifico avente il compito di analizzare e valutare le cause delle esondazioni. La suddetta commissione è stata quindi costituita con determinazione del Direttore generale Cura del territorio e dell'ambiente n. 14641 del 04/07/2023.

La Commissione ha operato attraverso un continuo scambio di informazioni e di idee tra i suoi membri componenti e tenendo dodici riunioni plenarie, organizzate anche avvalendosi di strumenti telematici.

Il presente documento sintetizza le risultanze del lavoro svolto.

2 Inquadramento dell'area in esame

Si riporta di seguito un breve inquadramento sinottico dal punto di vista geomorfologico e geologico della Regione Emilia-Romagna, al fine di contestualizzare la descrizione degli effetti al suolo degli eventi pluviometrici, la dinamica dei versanti e dei bacini idrografici, e la distribuzione spaziale dei dissesti in relazione ai fattori predisponenti del dissesto idrogeologico.

2.1.1 Inquadramento geomorfologico

La geomorfologia della Regione Emilia-Romagna è caratterizzata da rilievi montani a S e SW in corrispondenza dell'Appennino, da aree collinari nella fascia pedemontana e dalla Pianura Padana nella maggior parte nel settore settentrionale e nord-orientale.

La Regione si estende per circa 22.452 km², con un'area montana di 5635 km², un'area collinare di 6084 km², mentre la pianura occupa 10.733 km². La regione è bagnata a E dal Mar Adriatico per 115 km. Dal modello digitale del terreno (DTM) rappresentato in **Figura 1** è possibile notare che l'altimetria varia con quote minime di -4 m s.l.m., rilevati principalmente in corrispondenza della piana alluvionale costiera, e massime di 2171 m s.l.m. lungo la dorsale appenninica, in corrispondenza del rilievo più elevato, il Monte Cimone.

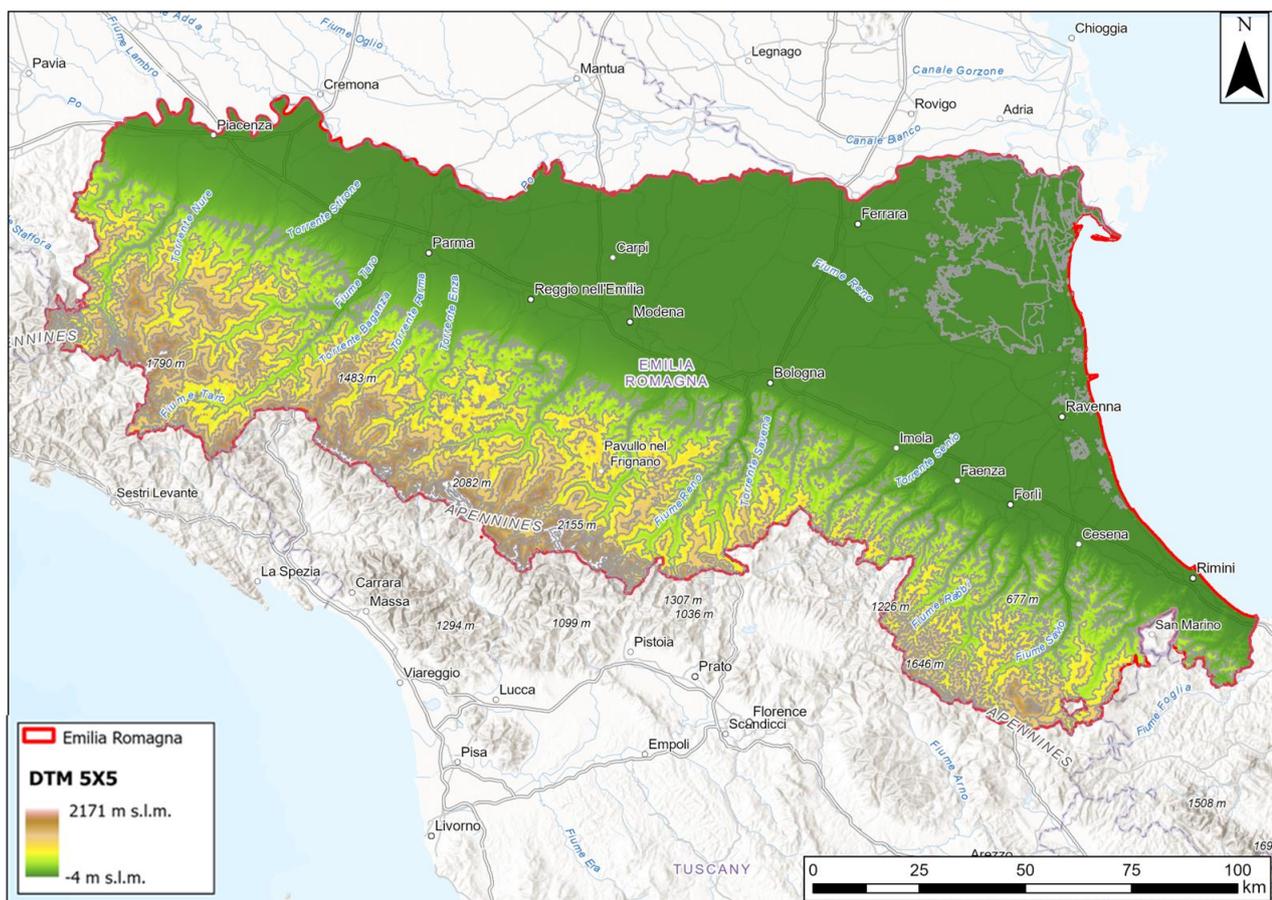


Figura 1 – Modello digitale del terreno (DTM) con risoluzione 5x5 m.

La morfologia dell'Appennino settentrionale è fortemente influenzata dalle caratteristiche litologiche e litotecniche delle unità affioranti. Esse sono costituite quasi esclusivamente da rocce sedimentarie, composte da alternanze pelitico-arenaceo-marnose di tipo flyschoidi, da argille, marne, argilliti e, in subordine, da arenarie cementate e rocce ofiolitiche.

In particolare, il settore occidentale del medio Appennino, da Piacenza a Bologna, risulta interessato da formazioni ad alto contenuto pelitico, appartenenti al Dominio Ligure e Sub-ligure; questo spiega il motivo dell'elevata franosità di questo settore rispetto a quello orientale ed al settore del crinale appenninico, caratterizzati soprattutto da litologie prevalentemente arenaceo-marnose appartenenti al Dominio Tosco-Umbro (ISPRA, 2007).

Dal rapporto sulle frane in Italia, l'ISPRA (2007) colloca l'Emilia-Romagna come la seconda regione italiana, dopo la Lombardia, per numero, diffusione ed estensione di frane sul proprio territorio. In totale sono state censite quasi 80.000 frane su tutto il territorio regionale. La maggior parte di queste ha un'attività caratterizzata da lunghe fasi di quiescenza alternate da riattivazioni che possono determinare la mobilitazione di interi versanti.

2.1.2 Inquadramento geologico

L'Appennino emiliano-romagnolo si estende approssimativamente per più di 5.000 km² nella fascia S e SW della regione, raggiungendo altitudini di 2165 m s.l.m (Monte Cimone nella provincia di Modena), fino al margine pedeappenninico con quote variabili fra 100 e 200 m s.l.m.

Il Dominio Ligure, relativamente più alloctono, costituisce le unità strutturali superiori ed affiora estesamente negli Appennini dell'Emilia, da Pavia a Bologna. Le formazioni liguri (dell'età del Giurassico superiore all'Eocene inferiore), precedentemente denominate Argille Scagliose, sono dei *melange* tettonici, cioè frammenti di formazioni intensamente deformate e fratturate ed olistostromi. Esse presentano un alto contenuto di argilla che si rigonfia facilmente in presenza d'acqua e una struttura a blocchi matrice-sostenuti dovuta agli effetti deformativi causati da un'intensa attività tettonica.

Queste unità caotiche sono spesso sovrastate da una spessa serie di torbiditi calcaree o arenacee databili dal Cretaceo superiore all'Eocene inferiore, conosciute come Flysch Ligure del Cretaceo superiore, Flysch a Elmintodi e Flysch Tortoniano Ligure (Gasperi et al., 2005). Queste formazioni costituiscono ampie lastre, spesse e meno deformate, che giacciono sopra i complessi basali le cui strutture stratificate sono di solito ben conservate. I processi di degrado fisico e meccanico rendono queste formazioni suscettibili allo sviluppo di erosione e all'attivazione di fenomeni franosi.

La Sequenza Epiligure del Medio Eocene (inizio del Messiniano) è costituita da arenarie in forma di spesse lastre piatte, orizzontalmente stratificate e leggermente piegate, che giacciono sopra i complessi liguri più deformati. Queste rocce sono molto resistenti ai processi di degrado, ad eccezione delle brecce argillose e degli olistostromi che mostrano caratteristiche litologiche simili alle unità liguri.

Nell'area romagnola affiorano ampiamente sequenze torbiditiche, in particolare la Formazione Marnoso Arenacea.

La distribuzione areale dei principali Domini geologico-strutturali della Regione Emilia-Romagna è mostrata in Figura 2.

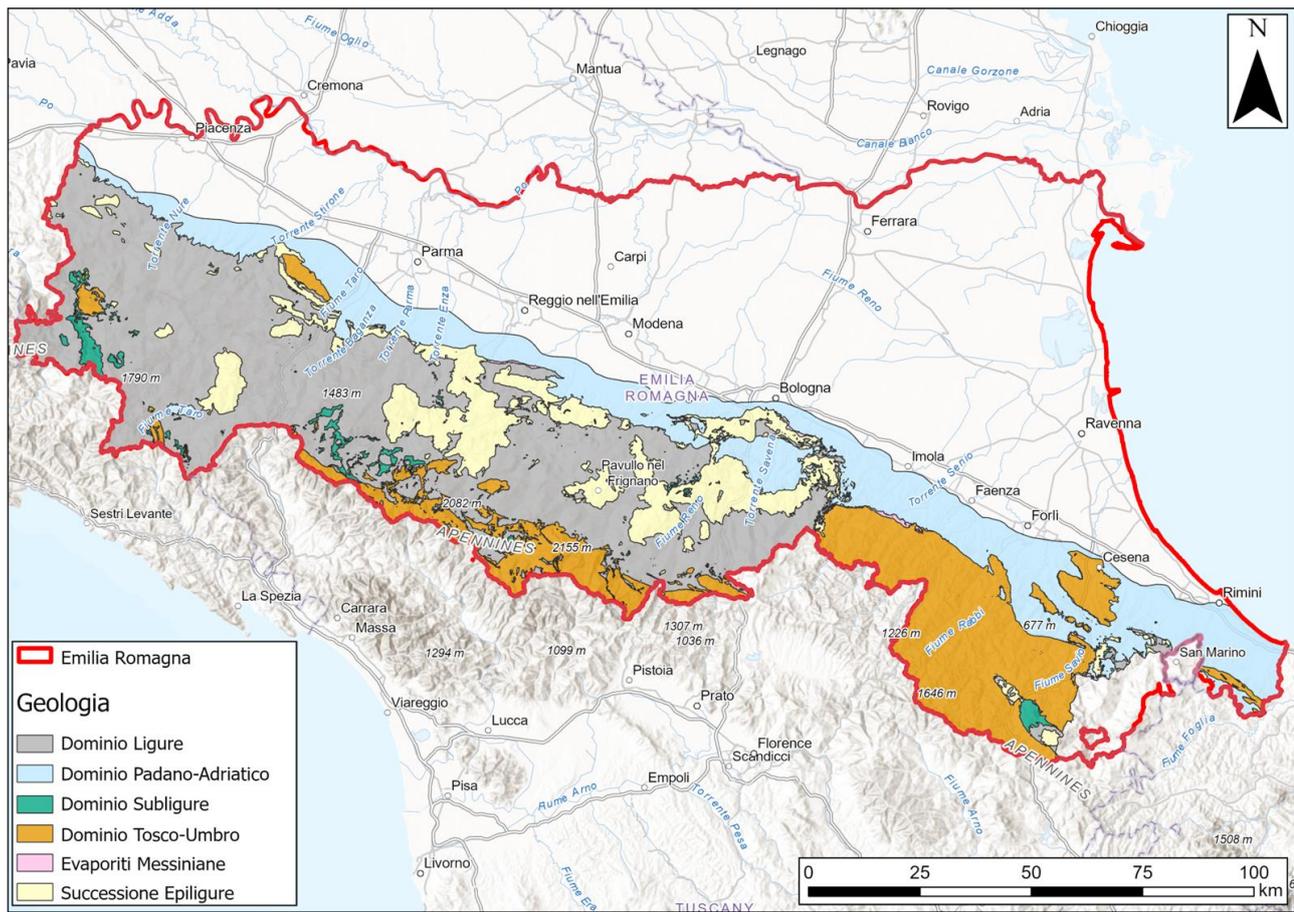


Figura 2 – Carta dei Domini Geologico-Strutturali della Regione Emilia-Romagna - Direzione Generale Cura del territorio e dell'ambiente, Settore Difesa del Territorio.

3 Caratterizzazione idrologico-idraulica dell'evento

Come accennato in premessa, nel mese di maggio dell'anno 2023 la Regione Emilia-Romagna è stata interessata in un'ampia parte del suo territorio, e in particolare nella zona romagnola, da due importanti eventi meteorici, accaduti il primo tra l'1 e il 3 maggio e il secondo tra il 16 e il 18 maggio. Per un inquadramento generale dei due eventi si rimanda ai rapporti prodotti da Arpa Emilia-Romagna Struttura Idro-Meteo-Clima e segnatamente al "Rapporto dell'evento meteo idrogeologico e idraulico dell'1-4 maggio 2023", datato 26 maggio 2023, e al "Rapporto degli eventi meteorologici di piena e di frana del 16-18 maggio 2023", datato 7 luglio 2023.

Per entrambi gli eventi, l'evoluzione meteorologica a grande scala e quella più specificamente riferita al territorio della regione Emilia-Romagna sono efficacemente descritti nei rapporti di evento citati, cui si rimanda. Negli stessi rapporti d'evento sono state condotte alcune analisi delle precipitazioni puntuali registrate nei pluviometri presenti sul territorio e degli idrogrammi di livello dei corsi d'acqua maggiormente interessati dai fenomeni. Dalle analisi delle piogge locali si conferma che entrambi gli eventi hanno avuto caratteristiche di intensità molto elevata, determinando in molte stazioni pluviometriche il superamento dei massimi storici rilevati nel periodo di osservazione storico precedente.

Per le elaborazioni condotte nel presente studio sono stati inizialmente raccolti i dati di precipitazione oraria in tutti i pluviometri dalla rete di misura regionale per cui il dato osservazionale risultava disponibile. Per un primo inquadramento dei fenomeni si può fare riferimento alle mappe delle isoiete (linee di uguale valore di precipitazione), costruite in riferimento alla pioggia totale caduta nel primo evento (periodo 1-3 maggio 2023) e nel secondo (periodo 15-17 maggio 2023), che sono riportate rispettivamente nella Figura 3 e nella Figura 4. Nella Figura 3 è riportata anche la posizione dei pluviometri utilizzati.

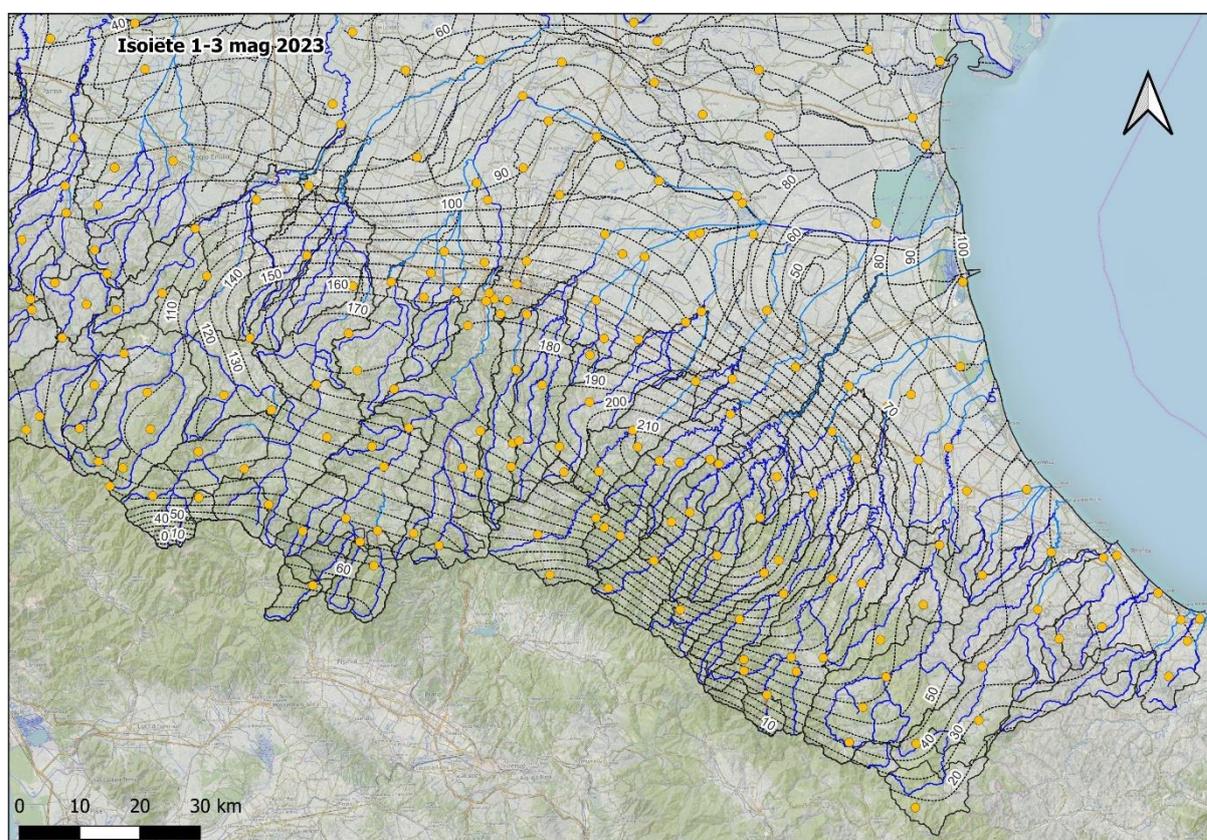


Figura 3 – Mappa delle isoiete della pioggia totale caduta dall'1 al 3 maggio 2023.

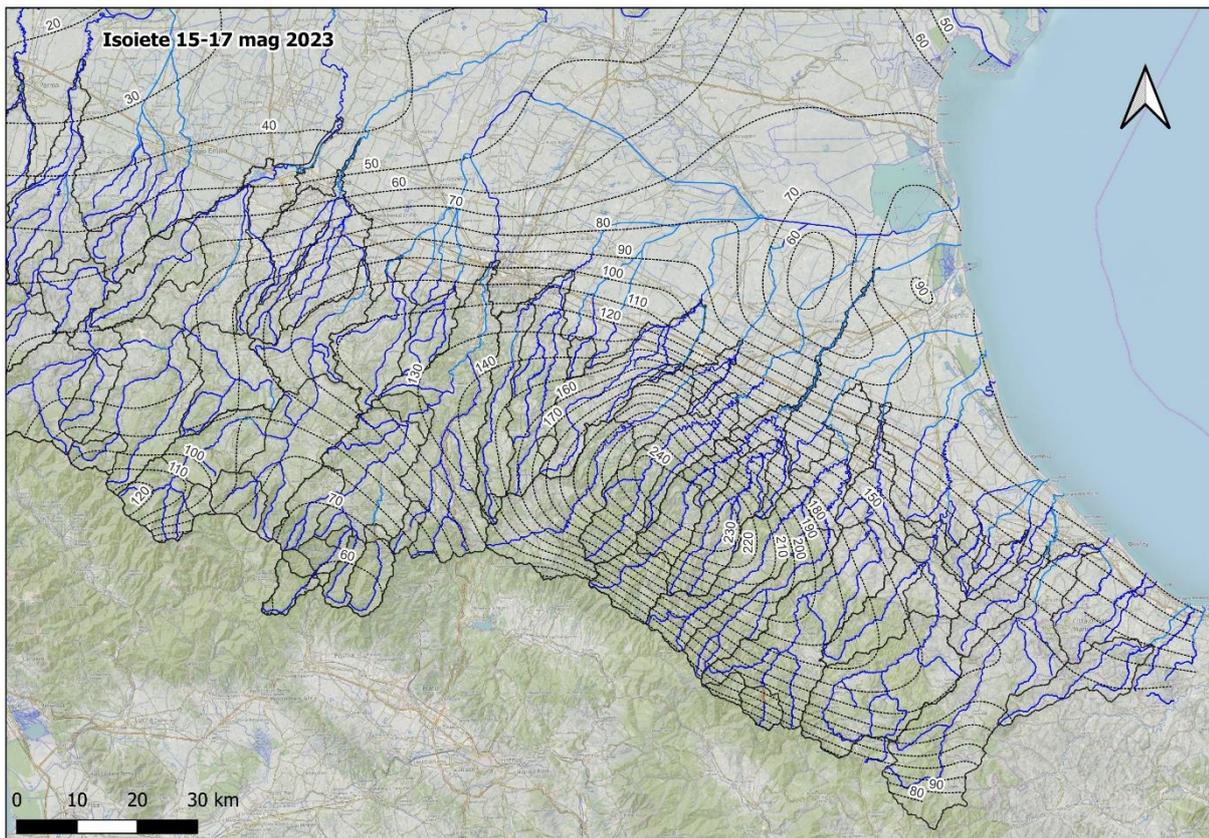


Figura 4 - Mappa delle isoiete della pioggia totale caduta dal 15 al 17 maggio 2023.

Si nota come l'epicentro della precipitazione sia sostanzialmente lo stesso per entrambi gli eventi, con totali di precipitazione simili ma più elevati nel secondo evento (fino a 240 mm circa, contro i 210 mm circa del primo evento). La zona più colpita è quella pedemontana dei bacini degli ultimi affluenti di destra del Reno (Sillaro, Santerno e Senio) e dei corsi d'acqua romagnoli con foce in Adriatico compresi tra il Lamone e il Savio. Nelle figure, è evidente l'effetto esercitato dall'orografia del territorio. Più ad est verso il Marecchia, le precipitazioni totali dei due eventi sono risultate invece inferiori. Anche gli affluenti di sinistra del Reno sono stati interessati da precipitazioni abbondanti, anche se inferiori rispetto a quelli di destra e ai bacini romagnoli. Nel caso dell'evento di inizio maggio si è avuto un importante interessamento anche dei bacini posti più ad ovest, con totali rilevanti anche su Panaro e Secchia, oltre che sul Reno.

Sono state poi analizzate le piogge massime giornaliere cadute nel primo e nel secondo evento. Le relative mappe delle isoiete sono riportate nella Figura 5 e nella Figura 6. Per quanto riguarda il primo evento (v. Figura 5), quasi dappertutto, il massimo di precipitazione giornaliera si verifica il giorno 2 maggio e mentre nel secondo evento il massimo si ha il giorno 16 maggio 2023 (v. Figura 6). Si evidenziano valori di precipitazione giornaliera massima fino a oltre 150 mm/g nel primo evento e oltre 170 mm/g nel secondo evento. Colpisce la vastità dell'area interessata da valori molto elevati della precipitazione massima giornaliera.

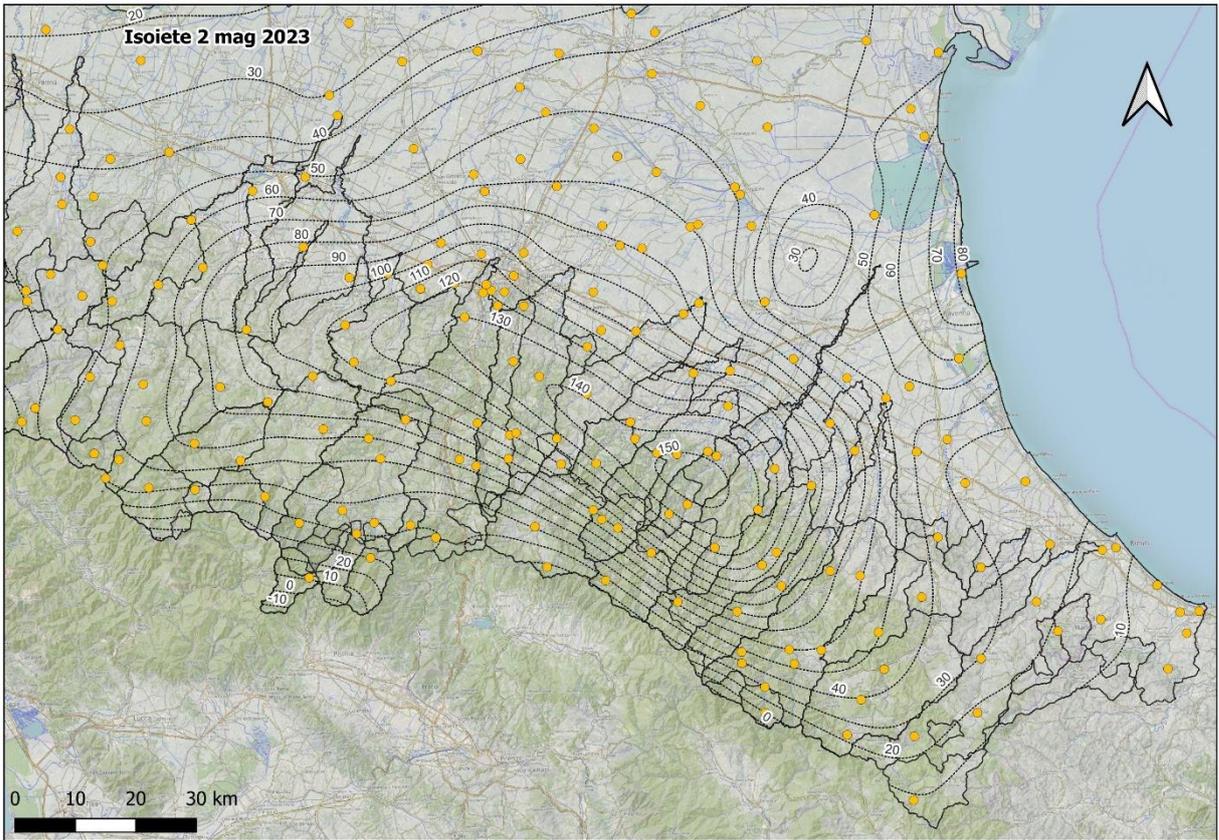


Figura 5 – Isoiete della massima precipitazione giornaliera del primo evento (2 maggio 2023).

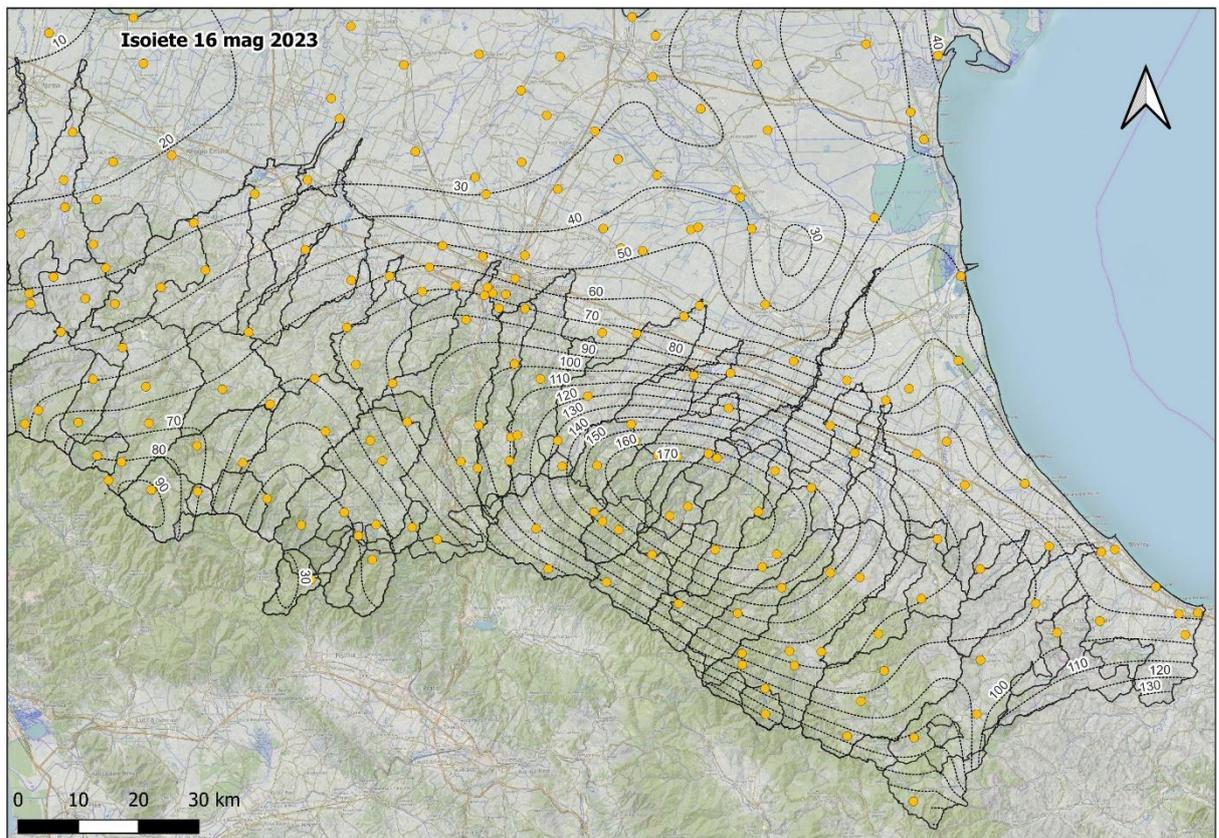


Figura 6 - Isoiete della massima precipitazione giornaliera del secondo evento (16 maggio 2023).

Infine, è stata considerata la pioggia massima caduta in due giorni consecutivi. In questo caso, per la zona romagnola, è nettamente prevalente il secondo evento, nel quale nei giorni 16 e 17 maggio si conseguono i valori più rilevanti. Nella Figura 7 si riporta l'altezza di pioggia complessivamente caduta nei giorni 16-17 maggio, che può considerarsi la massima in due giorni consecutivi. Si apprezza la presenza di un'estesa zona, centrata sulla zona collinare dei fiumi Senio e Lamone, caratterizzata da piogge bigioraliere superiori a 200 mm, con punte fino a oltre 240 mm.

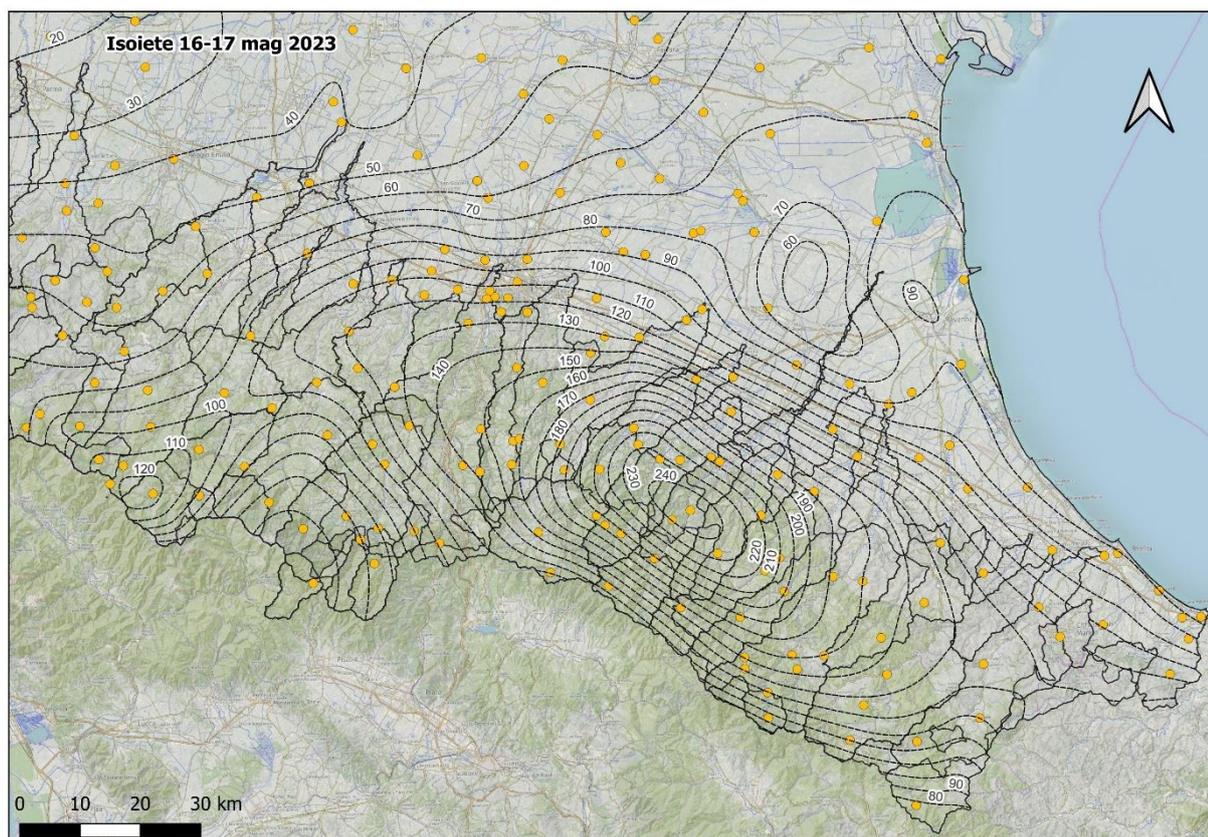


Figura 7 - Isoiete della massima precipitazione bigioraliere (16-17 maggio 2023).

3.1 Valutazione dei volumi di pioggia caduti sui bacini

L'analisi finora condotta aggiunge alcuni elementi di conoscenza ulteriori rispetto a quelle sviluppate nei rapporti di evento ma ne segue sostanzialmente l'impostazione, basata sull'analisi delle piogge puntuali e sulla loro variabilità spaziale. Nel presente studio, per cogliere meglio la specificità degli eventi del maggio 2023, sono state eseguite anche numerose analisi sulle piogge medie spaziali. Rispetto alle analisi condotte sulle piogge puntuali, tali analisi danno un'informazione ben più significativa ai fini della caratterizzazione dei volumi di pioggia caduti, elemento determinante nella formazione delle piene dei corsi d'acqua esaminati.

Tali analisi risultano di grande valore soprattutto in casi come quello in esame, in cui non risulti di fatto possibile, salvo pochi casi marginali, ricostruire affidabilmente le onde di piena transitate nei corsi d'acqua. Nella situazione in esame, i numerosissimi episodi di esondazione dei corsi d'acqua pregiudicano di fatto la ricostruzione delle onde di piena. Infatti, la valutazione dei volumi esondati da ciascun corso d'acqua a partire dalla conoscenza dell'estensione e dei tiranti idrici degli allagamenti verificatisi sul territorio si presenta molto complessa, viste le interazioni avvenute fra le esondazioni dei vari corsi d'acqua e gli importanti effetti esercitati dalla rete secondaria di scolo.

Rimarrebbe la possibilità di ricostruire l'andamento delle onde di piena, in particolare nelle porzioni degli idrogrammi registrati in cui questi ultimi non possono essere considerati rappresentativi delle piene naturali a causa delle esondazioni intervenute, ricorrendo alla modellistica afflussi-deflussi. Va detto però che questo approccio, sia pur interessante, esula dalle finalità del mandato conferito alla Commissione. Inoltre, esso da un lato può presentare significative incertezze, per minimizzare le quali è richiesta notevole cura nelle operazioni di calibrazione, dall'altro richiede comunque la valutazione delle piogge a scala di bacino, che è proprio l'operazione che è stata qui condotta, sia pure relativamente alla scala spaziale giornaliera e bigiornaliera.

Pertanto, sono stati considerati un insieme di bacini idrografici per i quali è stato analizzato il comportamento della pioggia media areale su ciascun bacino, valutata su opportuni intervalli di integrazione temporale. Nella scelta dei bacini sono state considerate, per ovvie ragioni di disponibilità di dati idrometrici, sezioni di chiusura ubicate in corrispondenza di stazioni di misura. Sono state considerate le stazioni idrometriche presenti in Emilia-Romagna che hanno una serie storica dei massimi annuali della portata al colmo composta da almeno 5 anni di dati e il cui deflusso si può considerare naturale (ovvero non ci sono opere idrauliche tali da alterare la naturalità del deflusso o comunque si hanno osservazioni prima della messa in funzione di tali opere). Si hanno così 112 stazioni idrometriche, il cui elenco è riportato nella Tabella 1.

Tabella 1 – Elenco delle sezioni di chiusura dei bacini idrografici considerati.

<i>Codice</i>	<i>Stazione_idrometrica di chiusura del bacino</i>	<i>Area (Kmq)</i>
A008	Arda a Mignano (diga del serbatoio)	88.0
A010	Aveto (Tebbia) a Cabanne	41.1
A044	Dolo (Secchia) a Fontanaluccia (diga del serbatoio)	41.0
A063	Enza a Sorbolo	661.6
A101	Panaro a Bomporto	1064.3
A102	Parma a Ponte Bottego	596.9
A103	Parma a Barganzola	599.5
A142	Secchia a Ponte Cavola	348.7
A143	Secchia a Ponte Bacchello	1389.5
A172	Taro a S.Maria	29.7
A173	Taro a Piane di Carniglia	91.0
A174	Taro a Pradella	295.6
A175	Taro a Ostia	413.0
A176	Taro a S. Quirico	1414.8
A180	Tidone a Molato (diga del serbatoio)	81.4
A190	Tebbia a due Ponti	75.1
A191	Tebbia a Valsigiara	223.6
A192	Tebbia a S. Salvatore	640.4
B001	Bidente di Corniolo a Campigna	19.7
B002	Bidente di Ridracoli a Ridracoli (diga del serbatoio)	36.4
B003	Brasimone (Setta) a Santa Maria (diga del serbatoio)	25.6
B004	Correcchio (Reno) a Contrada Il Portone	6.4
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1
B006	Lamone a Faenza	249.9
B007	Lamone a Sarna	255.9
B008	Lamone a Grattacoppa	529.0

<i>Codice</i>	<i>Stazione_idrometrica di chiusura del bacino</i>	<i>Area (Kmq)</i>
B009	Limentra di Riola (Reno) a Stagno	67.7
B010	Limentra di Sambuca (Reno) a Pavana (diga del serbatoio)	39.5
B011	Limentra di Treppio (Reno) a Suviana (diga del serbatoio)	77.5
B012	Orsigna (Reno) a Setteponti	15.6
B013	Quaderna (Reno) a Palesio	23.0
B014	Reno a Pracchia	41.0
B015	Reno a Molino di Pallone	88.7
B016	Reno a Ponte della Venturina	100.2
B017	Reno a Calvenzano	588.7
B018	Reno a Casalecchio	1069.5
B021	Rio Faldo (Reno) a Setteponti	3.5
B022	Ronco (Fiumi Uniti) a Meldola Casa Luzia	441.4
B023	Samoggia (Reno) a Calcara	173.6
B024	Savena (Reno) a Castel dell'Alpi	11.8
B025	Savena (Reno) a S. Ruffillo	160.4
B026	Savio a Mercato Saraceno	361.1
B027	Savio a San Vittore	598.1
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5
B029	Silla (Reno) a Silla	84.0
B031	Baganza a Berceto	17.0
B032	Trebbia a Bobbio	653.6
B033	Borello a Borello	127.7
B034	Santerno a Borgo Tossignano	318.5
B035	Tresinaro a Ca' de' Caroli	150.4
B037	Pisiatello a Calisese	38.9
B038	Scodogna a Casella Nuova	11.4
B039	Arda a Case Bonini	72.2
B040	Senio a Casola Valsenio	135.6
B041	Stirone a Castellina Soragna	110.5
B042	Montone a Castrocaro	236.5
B043	Chero a Ciriano	55.9
B044	Ronco a Coccolia	549.6
B045	Tassobbio a Compiano	100.7
B046	Parma a Corniglio	110.2
B048	Enza a Currada	430.1
B049	Leo a Fanano	64.5
B050	Nure a Farini	209.0
B051	Nure a Ferriere	48.7
B053	Arda a Fiorenzuola	126.2
B054	Acquicciola a Fiumalbo	18.4
B056	Secchia a Gatta	233.6
B057	Secchiello a Gatta	72.4

<i>Codice</i>	<i>Stazione_idrometrica di chiusura del bacino</i>	<i>Area (Kmq)</i>
B058	Santerno a Imola	416.2
B059	Lavino a Lavino di Sopra	83.5
B060	Lonza a Vetto	62.6
B061	Secchia a Lugo	694.6
B062	Lamone a Marradi	105.2
B064	Riglio a Montanaro	87.7
B065	Conca a Morciano	139.8
B066	Santerno a Mordano	448.0
B067	Recchio a Noceto	40.3
B069	Scoltenna a Pievepelago	131.5
B072	Secchia a Ponte Alto	1382.5
B073	Ceno a Ponte Ceno	51.1
B074	Ceno a Ponte Lamberti	331.4
B075	Tidone a Ponte Nibbiano	143.2
B076	Nure a Pontenure	373.3
B077	Panaro a Ponte Samone	584.6
B078	Sissola a Pontestrambo	16.7
B079	Scoltenna a Ponte Val Sasso	272.3
B080	Montone a Ponte Vico	543.4
B081	Rabbi a Predappio	172.7
B082	Crostolo a Puianello	85.8
B083	Lamone a Reda	520.2
B084	Marecchia a Rimini SS16	521.5
B085	Rio Cella a Querceto	10.0
B086	Marzeno a Rivalta	187.9
B087	Trebbia a Rivergaro	916.2
B088	Rossenna a Prignano sulla Secchia	185.6
B089	Tidone a Rottofreno	260.6
B090	Secchia a Rubiera SS9	1250.2
B091	Chiavenna a Saliceto	90.1
B092	Ghiara a Salsomaggiore	30.1
B093	Aveto a Salsominore	208.7
B094	Rubicone a Savignano	38.4
B095	Cedra a Selvanizza	79.9
B096	Enza a Selvanizza	84.8
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3
B099	Uso a Santarcangelo	106.8
B100	Savio a S. Carlo	577.6
B101	Tiepido a San Donnino	51.4
B103	Panaro a Spilamberto	746.5
B105	Lamone a Strada Casale	193.9
B106	Taro a Tornolo	104.5

Codice	Stazione_idrometrica di chiusura del bacino	Area (Kmq)
B107	Reno a Vergato	552.2
B108	Enza a Vetto	298.7

Sulle aree di tali bacini, integrando spazialmente l'informazione puntuale (v. mappe delle isoiete prima rappresentate), sono state ottenute le piogge medie areali (ovvero i volumi specifici di pioggia). Nella Figura 8 è riportata l'altezza di pioggia media areale complessivamente caduta relativamente al primo evento (1-3 maggio 2023) mentre nella Figura 9 è riportata l'altezza media areale relativa al secondo evento.

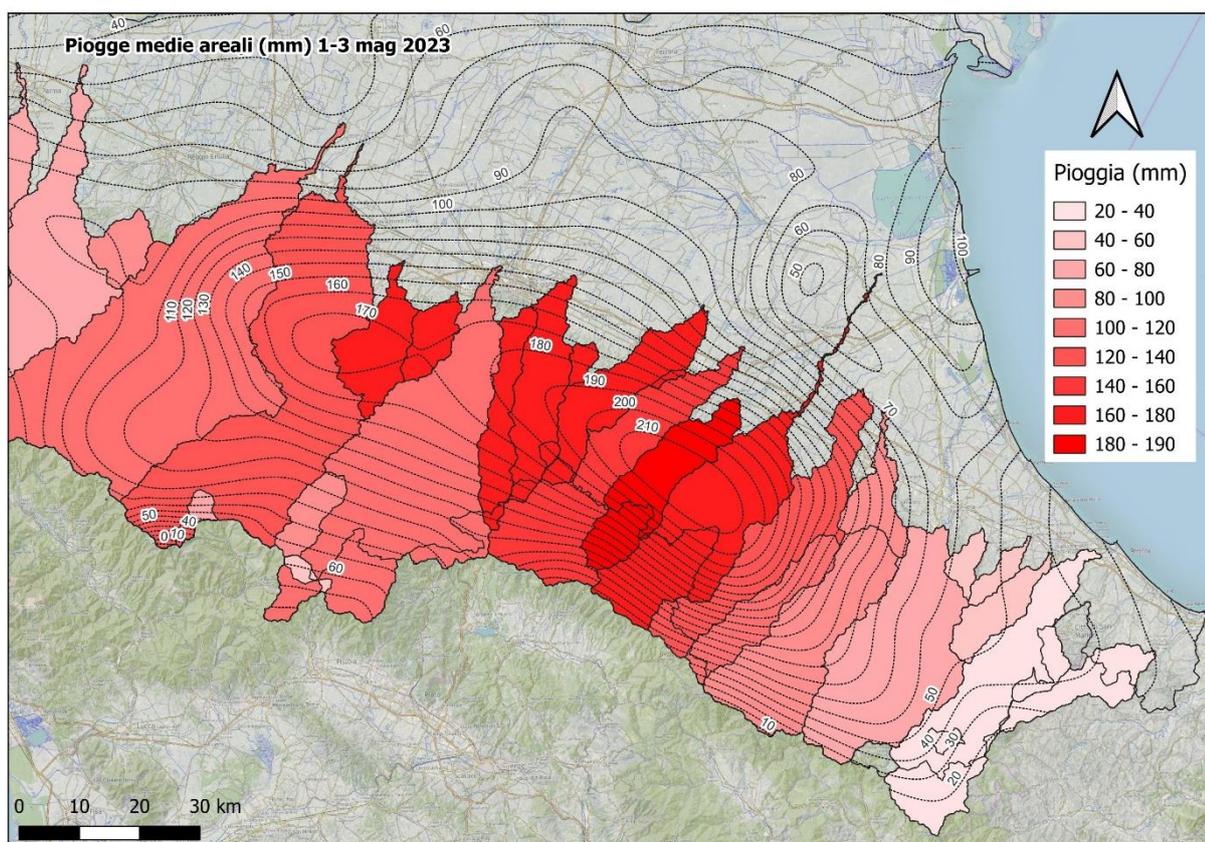


Figura 8 – Piogge medie areali complessivamente cadute sui bacini durante il primo evento.

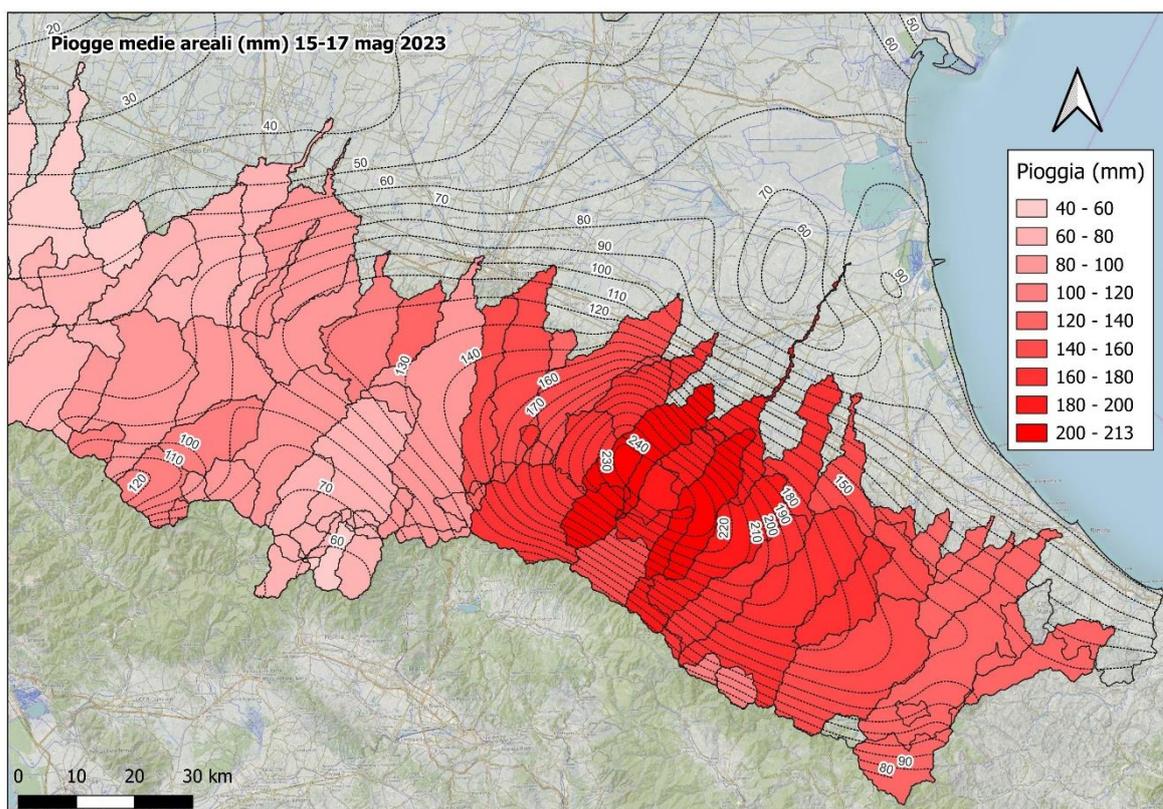


Figura 9 - Piogge medie areali complessivamente cadute sui bacini durante il secondo evento.

La gradazione di colori permette un'agevole individuazione della classe di valori di pioggia relativa a ciascun bacino. Si precisa che la campitura relativa al bacino sotteso da una certa sezione idrometrica va intesa come da estendere a tutto il bacino a monte, anche se nei sottobacini a monte si rinvergono colorazioni differenti. Ad esempio, in Figura 9 si nota che i sottobacini presenti nella parte più a monte del bacino del Ronco hanno colorazioni più chiare rispetto al bacino a valle; il significato della rappresentazione adottata si può meglio apprezzare dalla Figura 10 che riporta un dettaglio della mappa della Figura 9 per il bacino del Ronco con indicazione anche dei codici delle stazioni di misura poste alla chiusura dei bacini considerati; si notano a monte il Bidente di Ridracoli a Ridracoli (codice B002), sul cui bacino è stata valutata una pioggia media areale di 119 mm, e il Bidente del Bidente di Corniolo a Campigna (B001), con pioggia media areale valutata in 114 mm. Più a valle si trova la stazione Ronco a Meldola (B022), con pioggia media areale sul bacino pari a 160.5 mm (classe 160-180 mm), e ancora più a valle Ronco a Coccolia (B044), con pioggia media areale sul bacino sotteso pari a 156.7 mm (classe 140-160, colorazione leggermente più chiara del bacino precedente). L'esempio fatto serve a precisare che i 160.5 mm del bacino del Ronco a Meldola sono stati valutati considerando anche quanto piovuto sui sottobacini B001 e B002; pertanto, la colorazione 160-180 mm, che si rinviene per il Ronco a Meldola, va considerata estesa anche a tali sottobacini. Come pure i 156.7 mm del bacino del Ronco a Coccolia non si riferiscono al solo interbacino compreso tra Meldola e Coccolia ma a tutto il bacino a monte della sezione di Coccolia.

Si è ritenuto utile fornire indicazione numerica sui valori delle piogge medie areali che sono stati valutati con le elaborazioni descritte. L'informazione per esigenze di spazio e di chiarezza espositiva viene fornita per alcuni bacini che si ritengono essere particolarmente significativi.

Sono stati quindi individuati sette bacini scegliendo come loro sezione di chiusura la stazione idrometrica posta più a valle dei corsi d'acqua maggiormente interessati dall'alluvione, ovvero: Idice a Castenaso (B005), Sillaro a Sesto Imolese (B098), Santerno a Imola (B058), Senio a Castel Bolognese (B028), Lamone a Reda (B083), Montone a Ponte Vico (B080) e Ronco a Coccolia (B044). Le posizioni delle stazioni di misura prescelte a chiusura dei sette bacini, insieme con la delimitazione di questi ultimi, sono visibili nella Figura 11.

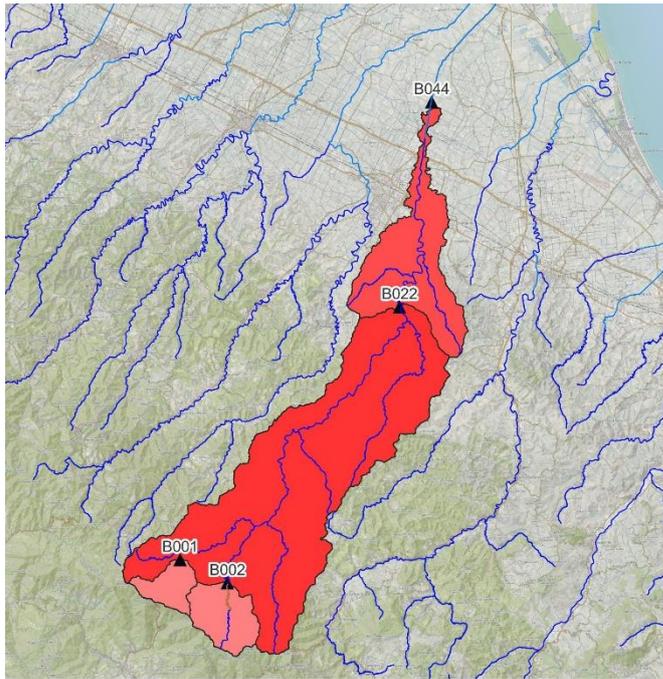


Figura 10 - Dettaglio della mappa della pioggia media areale dell'evento del 15-17 maggio 2023 sul Ronco.

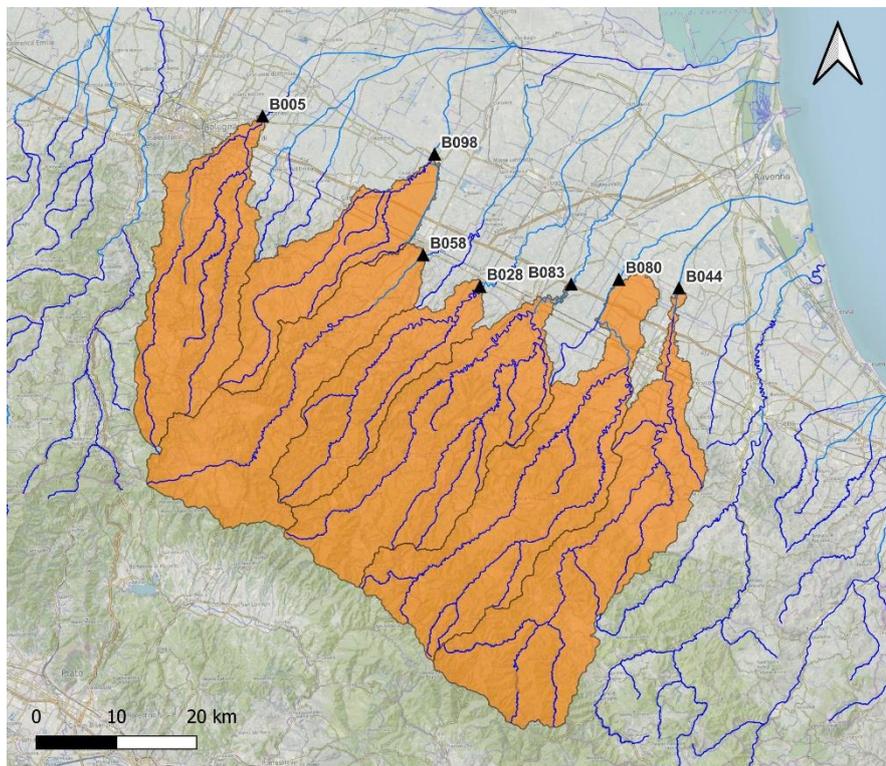


Figura 11 – Ubicazione dei sette bacini ritenuti più significativi.

Tabella 2 – Altezze di pioggia medie areali (mm) per i 7 bacini selezionati

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>Pioggia 1-3 mag</i>	<i>Pioggia 15-17 mag</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	170.3	144.4
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	173.2	156.4
B058	Santerno a Imola	416.2	153.3	178.4
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	183.4	210.0
B083	Lamone a Reda	520.2	172.9	197.5
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	132.8	172.7
B044	Ronco a Coccolia	549.6	86.3	156.7

Elaborazioni analoghe a quelle in precedenza descritte sono state effettuate con riferimento alla pioggia massima giornaliera media areale, che si può considerare avvenuta, per i bacini di maggiore interesse, il 16 maggio 2023 (si segnala che ciò non vale per tutti bacini, in quanto per alcuni, in questo caso di minore interesse, quali ad esempio il Panaro e per il Secchia, il massimo giornaliero si è avuto nel primo evento di pioggia). La mappatura dei valori massimi giornalieri della pioggia media areale caduta sui bacini nel maggio 2023 è riportata Figura 12; nella Figura 13 è riportata quella in due giorni consecutivi.

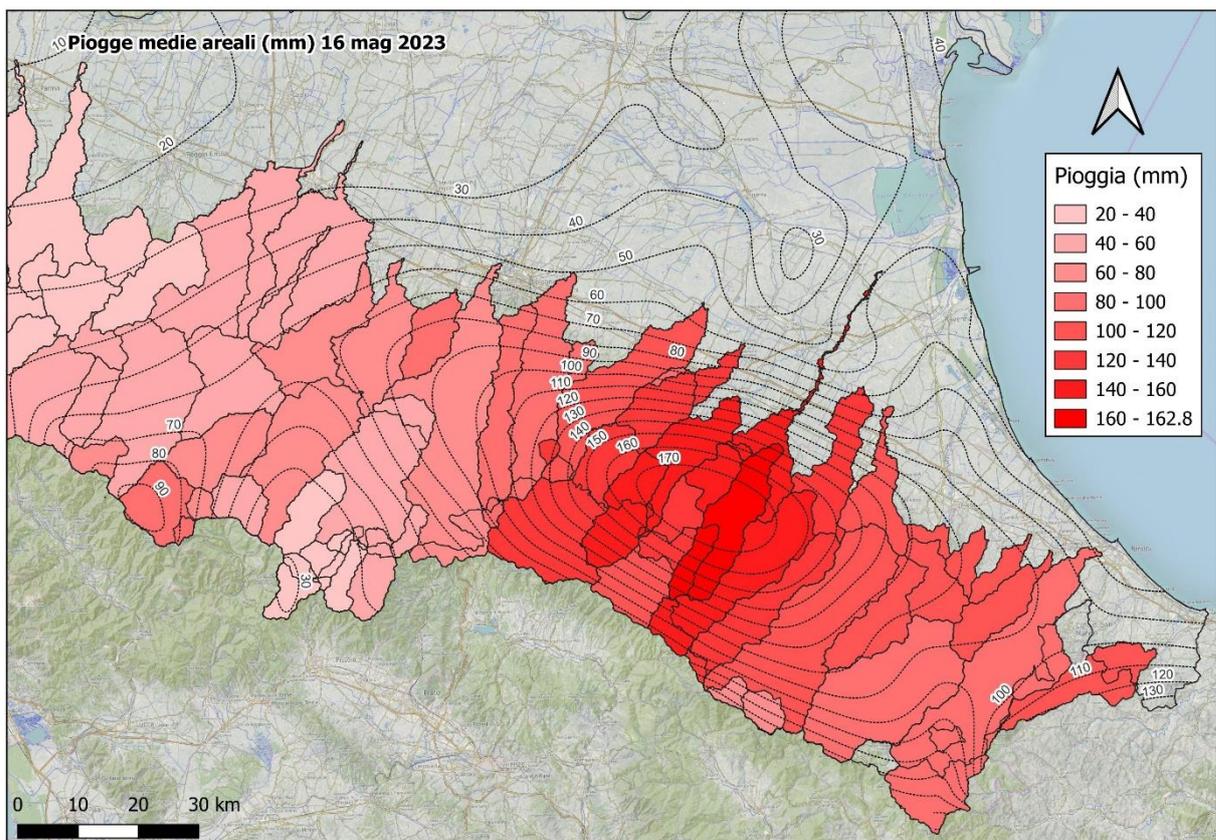


Figura 12 – Pioggia massima giornaliera media areale sui bacini di interesse.

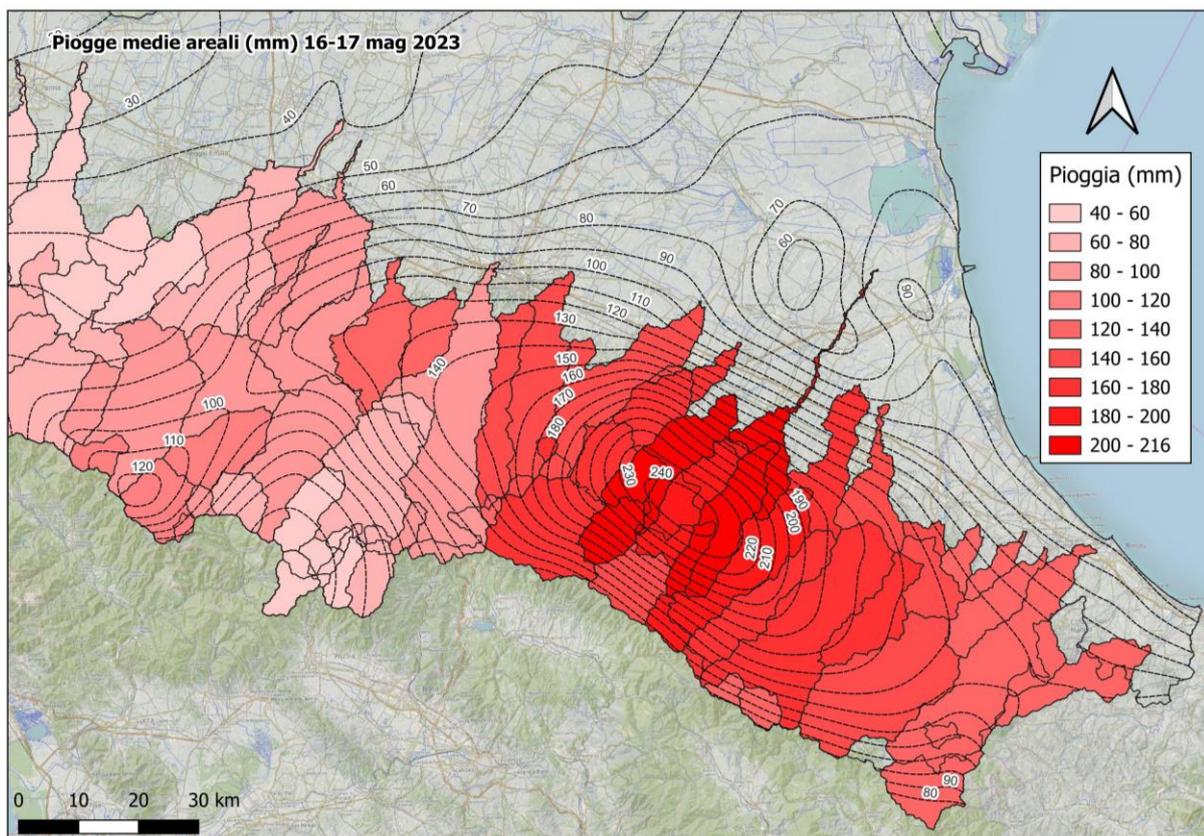


Figura 13 - Pioggia media areale massima in due giorni consecutivi sui bacini di interesse.

Tabella 3 – Massima altezza di pioggia media areale in un giorno e in due giorni consecutivi (mm) per i 7 bacini selezionati

Codice	Nome	Area (Kmq)	Pioggia giornaliera	Pioggia 2 giorni
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	99.1	148.3
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	104.8	158.8
B058	Santerno a Imola	416.2	123.9	176.7
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	152.5	207.2
B083	Lamone a Reda	520.2	151.3	200.1
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	134.2	176.6
B044	Ronco a Coccolia	549.6	113.8	158.9

3.2 La raccolta dell'informazione idrologica storica

Al fine di poter pervenire ad una valutazione del grado di eccezionalità dell'evento del maggio 2023 sono stati attentamente analizzati i dati idrologici storici disponibili. La principale fonte di informazione sugli eventi storici del passato gli Annali Idrologici pubblicati in passato dal Servizio Idrografico Italiano (poi Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale). Da un paio di decenni la raccolta dell'informazione idrologica avviene a cura delle Regioni; in Emilia-Romagna è competente Arpa. Arpa pubblica oggigiorno gli Annali Idrologici e ha anche curato la digitalizzazione dei dati storici pubblicati sugli Annali storici e l'archiviazione digitale dei dati più recenti.

Una notevole messe di dati è stata messa a disposizione da Arpae Emilia-Romagna, sulla base di specifica richiesta. Sono state infatti messe a disposizione le serie delle altezze di pioggia giornaliera registrate ai pluviometri della rete osservazionale dal 1921 a oggi, le serie dei massimi annuali delle piogge di durata pari a 1, 2, 3, 4 e 5 giorni consecutivi registrate ai pluviometri dal 1921 a oggi, le serie storiche disponibili dei massimi annuali delle piogge cadute in intervalli di durata pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore consecutive registrate ai pluviometri, le registrazioni dei principali idrogrammi di piena dal 2000 al 2021, le scale di deflusso disponibili per l'anno 2022 in tutte le stazioni della regione.

Oltre a questi dati messi a disposizione direttamente da Arpae, sono stati ricavati dati anche dal dataset climatico Eraclito. Questo riporta su una griglia di circa 5 km x 5 km l'altezza di pioggia a scala giornaliera coprendo tutto il territorio regionale dal 1961 a oggi. I dati sono ottenuti tramite interpolazione spaziale su una griglia regolare a partire dai valori rilevati dalla rete delle stazioni pluviometriche storiche. Infine, dal data set meteorologico Erg5, che riporta le altezze di pioggia orarie dal 1991 a oggi, sono stati desunti tutti i dati disponibili per l'area di interesse.

3.3 Il confronto con l'evento del maggio-giugno 1939

Nei mesi di maggio e giugno dell'anno 1939 si verificarono in Romagna eventi pluviometrici particolarmente intensi e spazialmente diffusi che presentano interessanti analogie con quelli del maggio 2023. Si è quindi ritenuto interessante effettuare specifiche elaborazioni al fine di istituire un utile confronto tra tale evento e quello del 2023. Relativamente a tali eventi, sono stati appositamente raccolti i dati delle piogge giornaliere in tutti i pluviometri, all'epoca funzionanti, ubicati sul bacino del fiume Reno e sui bacini dei corsi d'acqua romagnoli. Si è constatato infatti che, per l'evento del 1939, la copertura del dato garantita dal data base messo a disposizione da Arpae era sensibilmente inferiore rispetto a quella consentita dall'estrazione diretta dei dati dall'Annale Idrologico del 1939. La posizione delle stazioni pluviometriche per le quali si è proceduto alla raccolta dati dall'Annale Idrologico del 1939 è indicata nella Figura 14; nella stessa figura sono rappresentate anche le isoiete dell'altezza totale di pioggia caduta nel periodo 28 maggio-2 giugno 1939. Nella Figura 15 è invece riportata la mappa delle isoiete dell'altezza totale di pioggia caduta nel periodo 12-16 giugno 1939.

L'evento del 1939 si articola infatti in due eventi componenti: il primo, più intenso, ha inizio il 28 maggio e termine il 2 giugno 1939; il secondo, meno intenso, ha inizio il 12 giugno e termine il 16 giugno 1939. Dalla Figura 14 si notano, per il primo dei due eventi, valori di pioggia cumulata persino superiori a quelli dell'evento del maggio 2023; su un'ampia zona della parte montana dei bacini romagnoli la pioggia arriva a superare i 300 mm. Ovviamente il confronto non è omogeneo perché l'evento del 1939 si articola su un numero di giorni maggiore di quello del 2023. Per istituire un confronto più rappresentativo ci si può riferire alla massima pioggia giornaliera del 1939 confrontandola con quella del 2023. Nella Figura 16 è riportata la mappa delle isoiete della precipitazione massima giornaliera del primo evento del 1939, verificatasi per tutte le stazioni di misura il 30 maggio, mentre nella Figura 17 è riportata la mappa della precipitazione massima giornaliera del secondo evento del 1939, verificatasi il 15 giugno. Si nota come, a differenza del 2023, questa volta sia stato il primo evento quello più intenso.

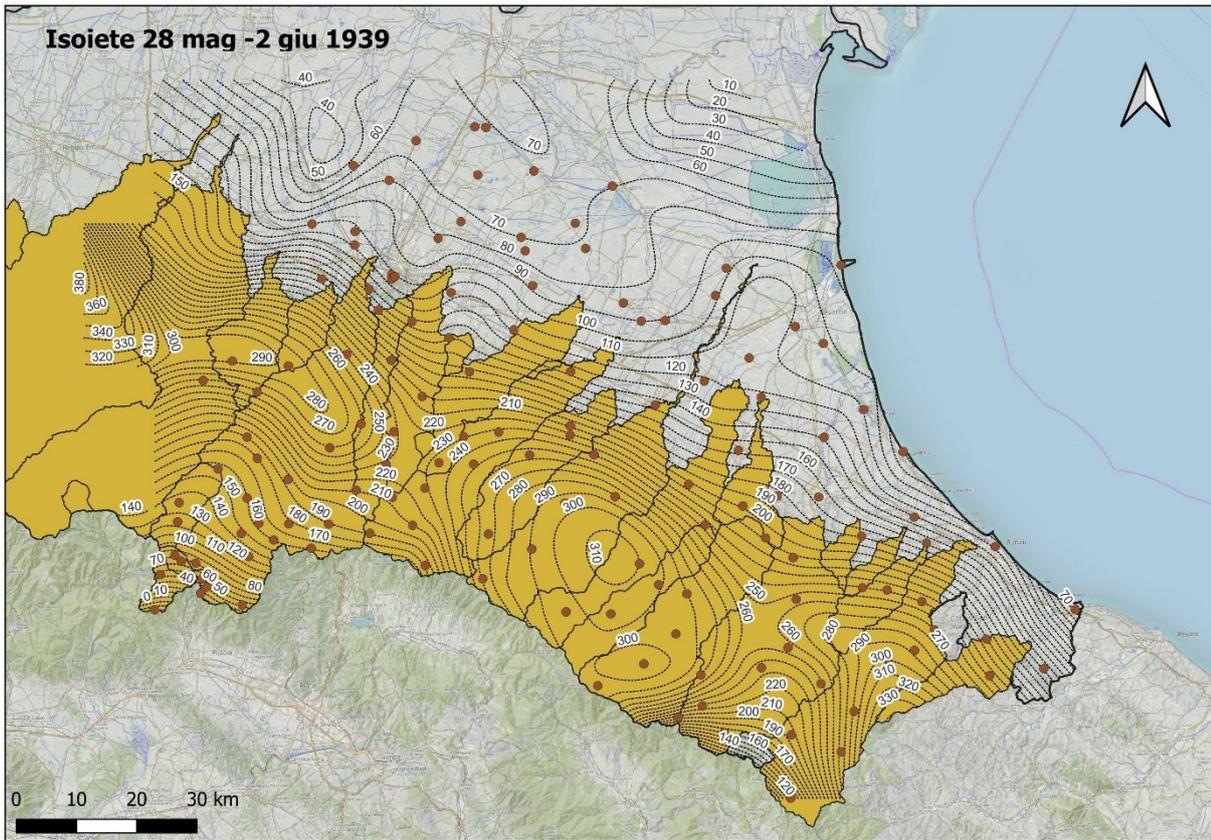


Figura 14 – Mappa delle isoiete della pioggia totale caduta dal 28 maggio al 2 giugno 1939.

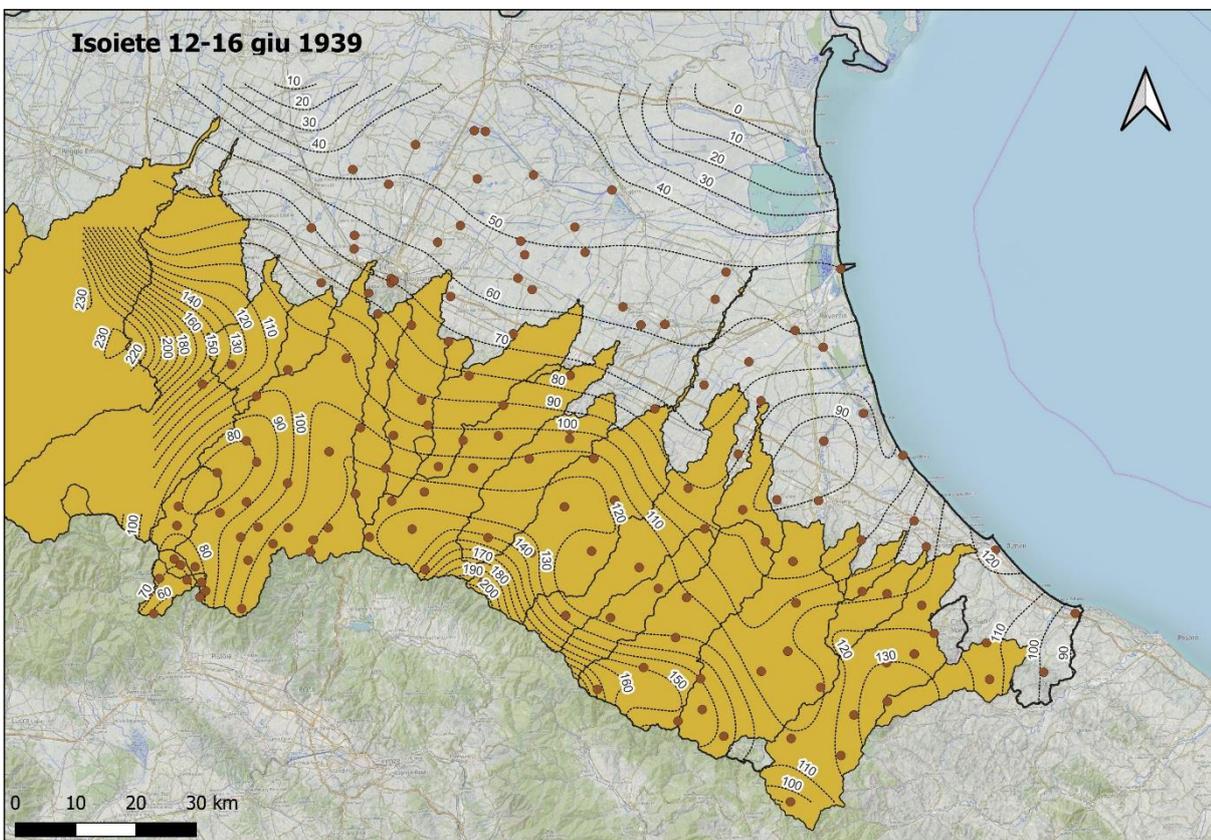


Figura 15 – Mappa delle isoiete della pioggia totale caduta dal 12 giugno al 16 giugno 1939.

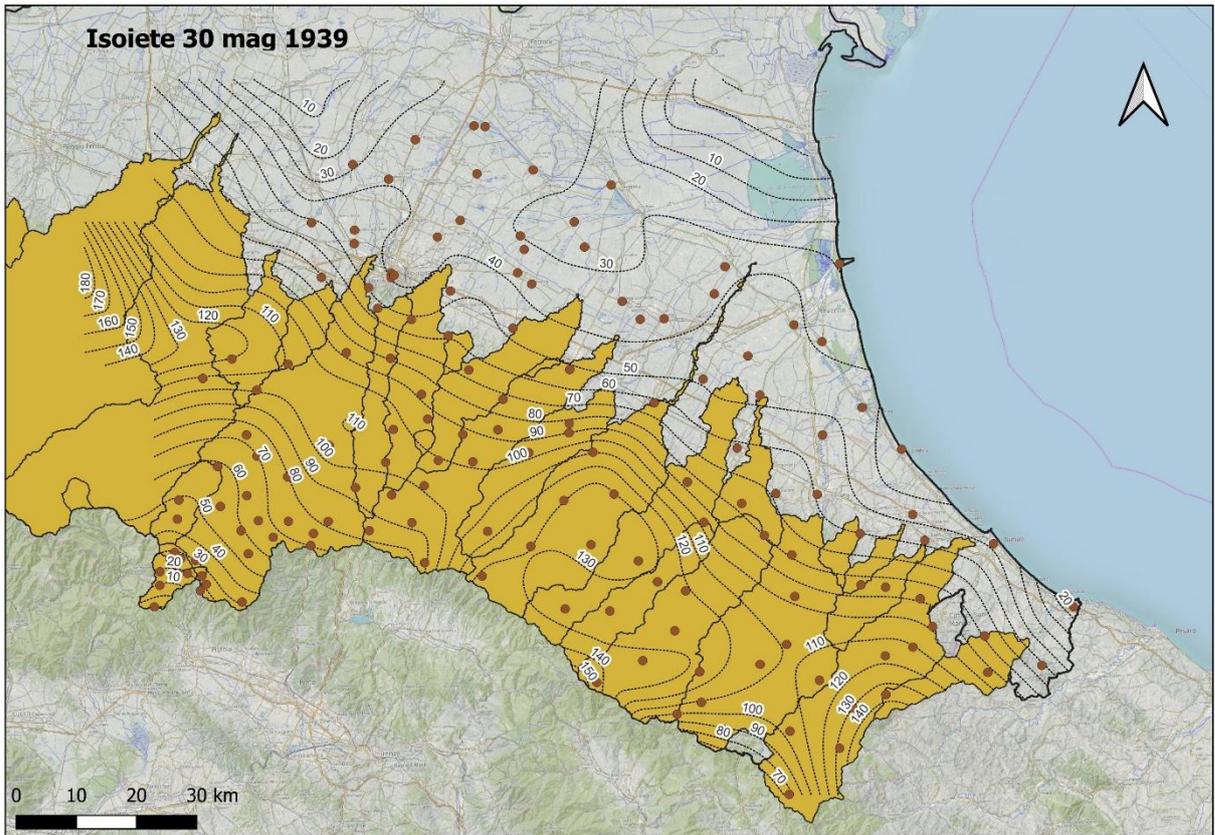


Figura 16 – Mappa delle isoiete dell'altezza di pioggia giornaliera del 30 maggio 1939.

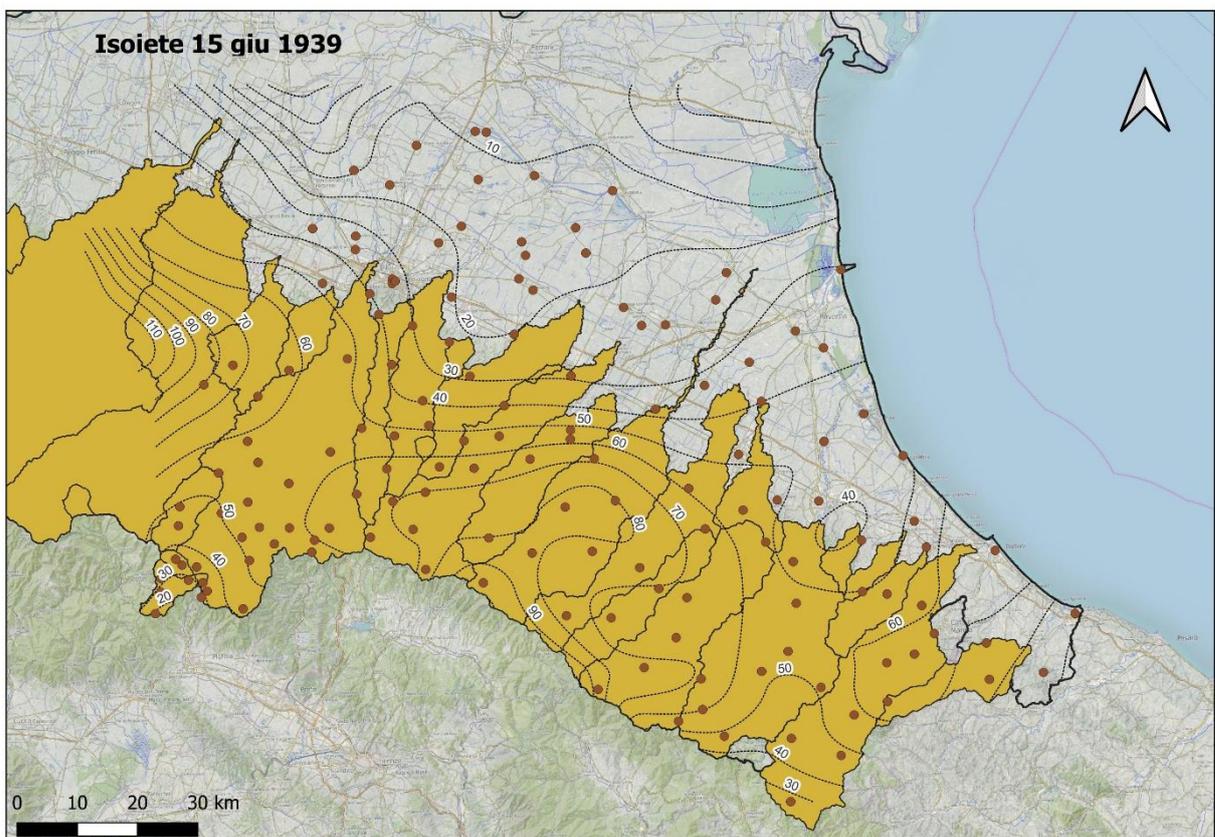


Figura 17- Mappa delle isoiete dell'altezza di pioggia giornaliera del 15 giugno 1939.

Anche per l'evento del 1939 è stata effettuata l'analisi delle piogge medie areali a scala di bacino. La Figura 18 mostra la mappatura per i vari bacini e sottobacini dei valori dell'altezza di pioggia media areale complessivamente caduta nel primo evento piovoso, dal 28 maggio al 2 giugno 1939. Nella Tabella 4 vengono riportati, per i sette bacini rappresentativi, i valori dell'altezza di pioggia media areale caduta nel periodo dal 28 maggio al 2 giugno 1939. Si riscontrano valori molto elevati rispetto al 2023, ma non direttamente comparabili con quelli del 2023 vista la differente durata dei due eventi meteorici.

Tabella 4 – Altezza di pioggia media areale complessivamente caduta sui 7 bacini selezionati dal 28 maggio al 2 giugno 1939			
<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>Pioggia (mm)</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	195.4
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	169.0
B058	Santerno a Imola	416.2	215.5
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	247.2
B083	Lamone a Reda	520.2	267.3
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	261.6
B044	Ronco a Coccolia	549.6	256.3

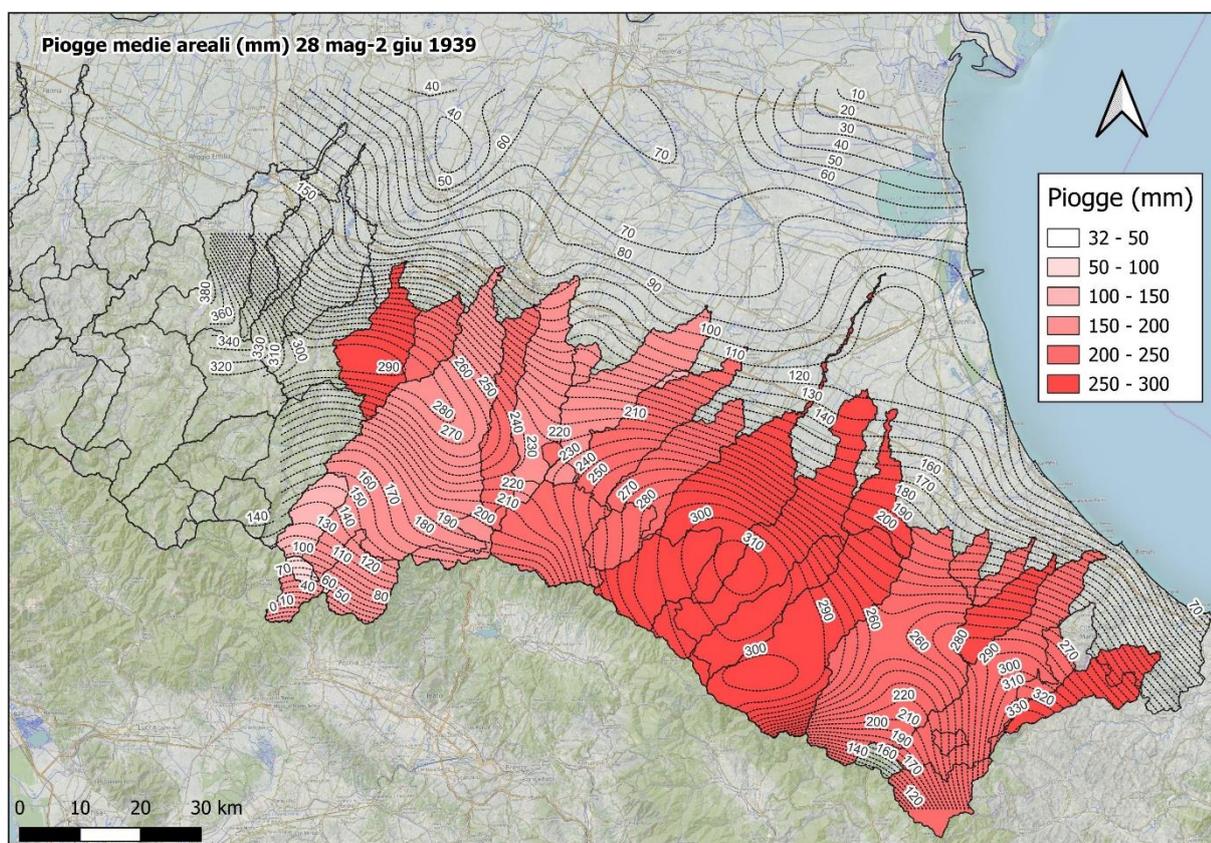


Figura 18 – Piogge medie areali complessivamente cadute sul bacino del Reno e sui bacini romagnoli dal 28 maggio al 2 giugno 1939.

Anche ai fini di una più significativa comparazione con l'evento del 2023, è stata prodotta la mappatura delle massime altezze giornaliere di pioggia media areale sui bacini durante l'evento del 1939, riportata nella Figura 19. Il confronto con l'analoga mappatura relativa all'evento del 2023 mostra come, per tale variabile, si abbia generalmente una maggiore severità dell'evento del maggio 2023 rispetto all'evento del 1939.

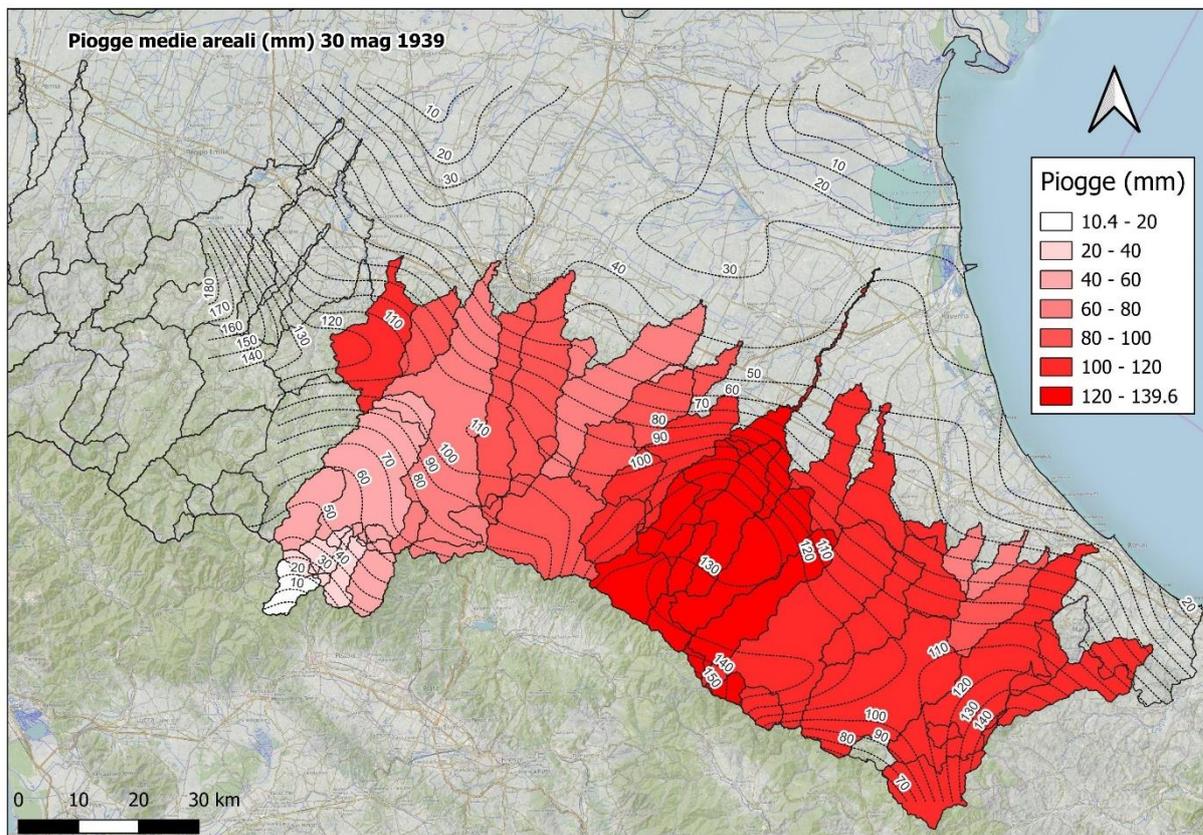


Figura 19 - Valore massimo giornaliero dell'altezza di pioggia media areale sui bacini per l'evento del 1939.

Nella Tabella 5 vengono riportati i valori relativi ai sette bacini rappresentativi, che sono messi a confronto con i corrispondenti valori del 2023. Con riferimento a tale indicatore, che è anche quello più rappresentativo in quanto la durata giornaliera è la più prossima ai tempi di risposta caratteristici dei bacini esaminati, si evidenzia chiaramente la predominanza dell'evento del maggio 2023 rispetto a quello del 1939.

Tabella 5 – Massima altezza giornaliera della pioggia media areale (mm) per i 7 bacini selezionati nell'evento del 1939 e in quello del 2023

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>Evento 1939</i>	<i>Evento 2023</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	83.0	99.1
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	66.9	104.8
B058	Santerno a Imola	416.2	89.4	123.9
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	101.7	152.5
B083	Lamone a Reda	520.2	120.6	151.3
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	111.8	134.2
B044	Ronco a Coccolia	549.6	109.0	113.8

Per rendere ancora più agevole il confronto tra i due eventi, nella Figura 20 è riportato il rapporto tra il valore massimo giornaliero della pioggia media areale caduta sui vari bacini nell'evento del 2023 e quello dell'evento del 1939. Incidentalmente, si segnala che, per l'evento del 2023, alcuni bacini (fra cui gli affluenti di sinistra del Reno e i primi affluenti di destra) hanno raggiunto il massimo giornaliero della pioggia areale durante il primo dei due eventi (1-3 maggio 2023). Nella Figura 20 sono rappresentati in colorazione verde i bacini per i quali il massimo giornaliero della pioggia media areale del 2023 risulta inferiore a quello del 1939 mentre in colorazione azzurra quelli in cui esso è superiore. Si vede che, se si fa riferimento alle sezioni di chiusura dei bacini poste più a valle lungo ciascun corso d'acqua, l'evento del 2023 prevale su quello del 1939 per tutti i corsi d'acqua esaminati, ad eccezione del Reno, del Savio e del Marecchia, con differenze che in diversi casi risultano molto marcate.

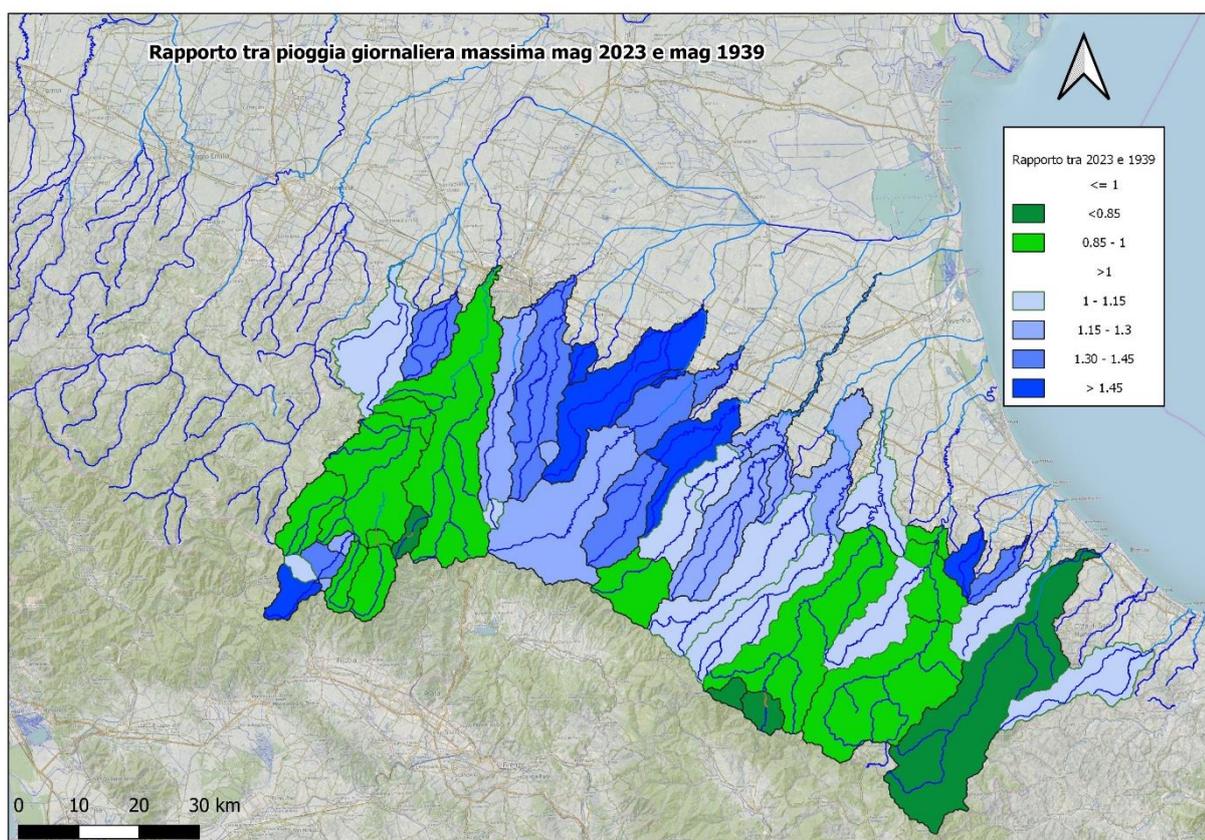


Figura 20 – Rapporto tra la massima pioggia giornaliera media areale sui vari bacini dell'evento del maggio 2023 e quella dell'evento del 1939.

3.4 Caratterizzazione statistica delle piogge areali e stima del loro tempo di ritorno

Al fine di potere formulare su base oggettiva una valutazione sul livello di rarità dell'evento meteorico del maggio 2023, si sono costruite a partire dal dataset delle piogge giornaliere alle stazioni di misura del periodo 1921-2021 messo a disposizione da Arpa le stime delle piogge giornaliere medie areali su ciascuno dei bacini di interesse, applicando il metodo dei poligoni di Thiessen alle stazioni di volta in volta disponibili. Le stime delle piogge giornaliere medie areali sono state valutate con tale metodologia per il periodo 1921-1960. Invece, per il periodo dal 1961 a oggi, le stime delle piogge giornaliere sono state ottenute utilizzando il database Eraclito messo a punto da Arpa; in questo caso, le stime sono state ottenute intersecando, per ciascun giorno del periodo dal 1961 a oggi, con l'ausilio di strumenti Gis, il perimetro del bacino con il raster a maglia di 5 km, contenente la stima della pioggia giornaliera nei punti griglia. Dalla serie delle piogge giornaliere medie areali di ciascun bacino così ottenute sono state quindi ottenute le serie dei valori massimi annuali della pioggia giornaliera media areale e di quella di due giorni consecutivi, utili per valutare il livello

di rarità dell'evento del 2023 e in particolare il suo tempo di ritorno. Un'operazione analoga è stata svolta per i dati orari disponibili. In questo caso si sono reperiti i dati orari interpolati su griglia regolare da ARPAE per il periodo 1991-2023 nel data base Erg5. Successivamente, con strumenti GIS, si sono calcolate, per ciascun intervallo orario, le medie spaziali sui bacini oggetto dell'analisi.

3.4.1 Confronti tra eventi storici notevoli

Prima di passare alla descrizione delle analisi statistiche condotte si illustrano i risultati del confronto tra il valore massimo giornaliero della pioggia media areale del maggio 2023 e il massimo storico della pioggia giornaliera media areale avvalendosi della grafica di Figura 21, nella quale viene riportato il rapporto fra le due entità. Nella scala del verde sono rappresentati i bacini per cui il rapporto tra il massimo giornaliero del maggio 2023 e quello storico del periodo 1921-2021 è inferiore all'unità, e quindi il 2023 non rappresenta il massimo storico; nella scala del rosso, quelli per cui invece tale rapporto è maggiore di uno e quindi l'evento del 2023 rappresenta il massimo storico. Si nota che, per i bacini complessivi dei corsi d'acqua romagnoli compresi tra il Senio e il Ronco compresi (Senio a Castelbolognese, Lamone a Reda, Montone a Ponte Vico, Ronco a Coccolia) , come pure per quello dell'Idice chiuso a Castenaso, l'evento del 2023 costituisce il massimo storico per la pioggia giornaliera media areale. In alcuni casi, inoltre, il valore del 2023 risulta molto superiore al precedente massimo storico. Trattandosi di un campione di osservazioni disponibili che si estende su oltre 100 anni, la circostanza dà chiare indicazioni sulle caratteristiche di eccezionalità dell'evento pluviometrico verificatosi nel maggio 2023. Analoghe considerazioni possono essere fatte per la pioggia media areale di due giorni consecutivi, cui si riferisce la Figura 22, grandezza per la quale sono ancora più evidenti le caratteristiche di eccezionalità dell'evento del maggio 2023 rispetto all'informazione storica disponibile.

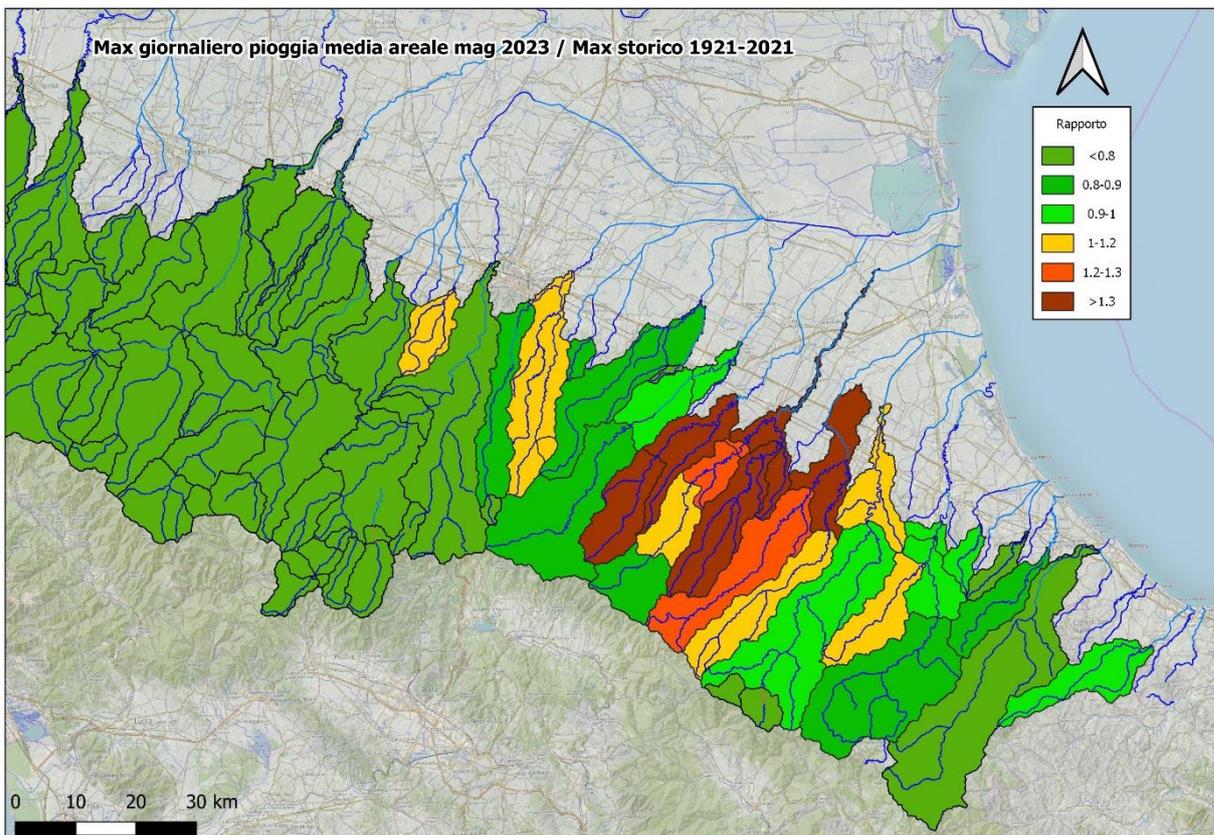


Figura 21 – Rapporto tra il massimo valore giornaliero della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023 e il massimo storico della pioggia giornaliera media areale.

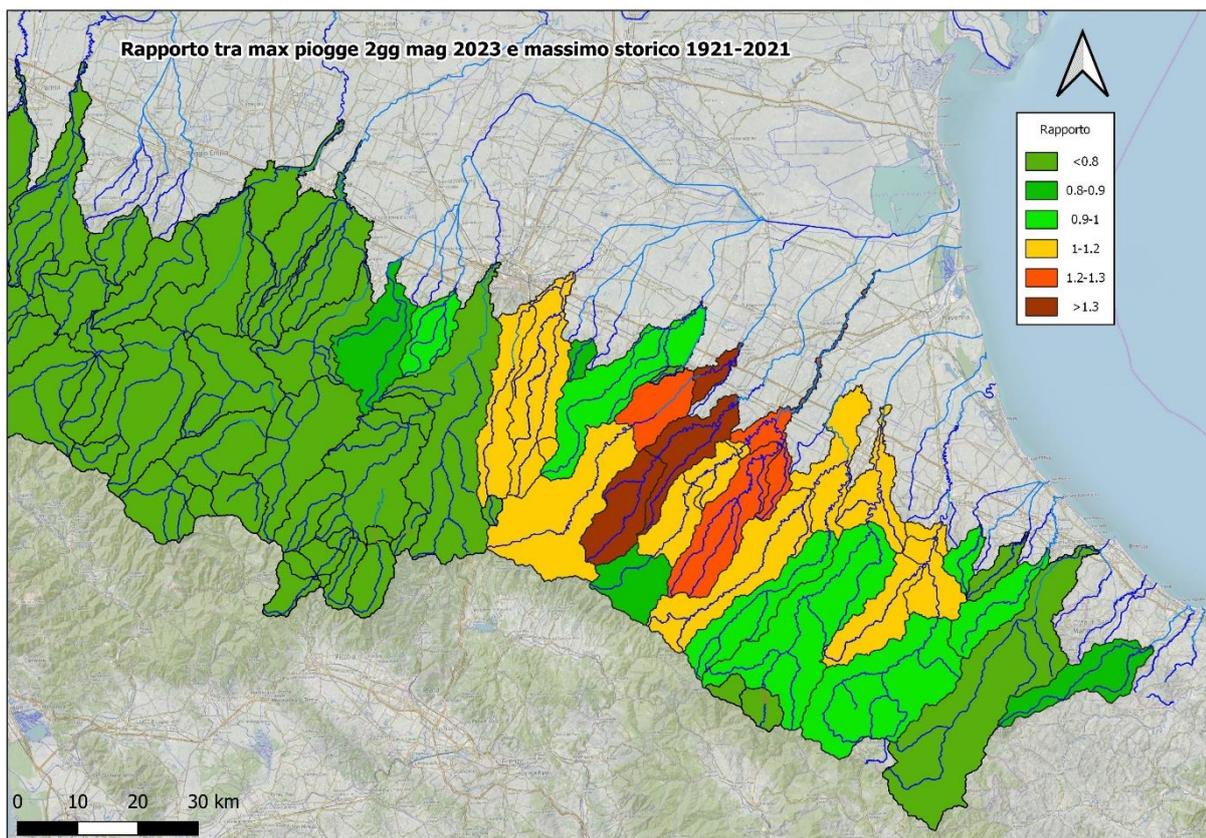


Figura 22 - Rapporto tra il massimo valore in 2 giorni della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023 e il massimo storico della pioggia media areale in 2 giorni.

Nella Tabella 6 vengono riportati, per i sette bacini rappresentativi, i valori dei rapporti relativi alla pioggia giornaliera ed a quella di due giorni consecutivi.

Tabella 6 – Rapporto tra la massima pioggia giornaliera e bigiornaliera media areale dell'evento del maggio 2023 e il corrispondente massimo annuale del periodo storico 1921-2021

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>Pioggia 1g</i>	<i>Pioggia 2gg</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	1.02	1.02
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	0.86	0.96
B058	Santerno a Imola	416.2	0.97	1.18
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	1.33	1.39
B083	Lamone a Reda	520.2	1.25	1.15
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	1.20	1.08
B044	Ronco a Coccolia	549.6	1.04	1.04

Per consentire un confronto più completo tra le caratteristiche dell'evento del maggio 2023 e quelle della pluviometria storica 1921-2021, nelle figure seguenti da Figura 23 a Figura 36, vengono rappresentate le serie storiche ricostruite dei valori massimi annuali della pioggia media areale giornaliera e in 2 giorni consecutivi per ciascuno dei 7 bacini selezionati e i valori massimi della pioggia giornaliera e in 2 giorni

consecutivi dei due eventi del maggio 2023. Dalla Figura 23, che si riferisce al bacino dell'Idice a Castenaso, si nota che la pioggia giornaliera media areale del 2 maggio 2023, pari a 114.15 mm, costituisce il massimo storico, di poco superiore al precedente massimo storico, avvenuto nel 1966 (112.12 mm), mentre la pioggia del 16 maggio (99.14 mm) è inferiore. Alla scala di 2 giorni (v. Figura 24), la pioggia media areale dell'1-2 maggio (154.61 mm) costituisce ancora il massimo storico superando il precedente (151.57 mm, avvenuto nel 1994); la massima pioggia di 2 giorni del secondo evento, avvenuta il 16-17 maggio e pari a 148.35 mm, risulta invece leggermente inferiore. Passando al secondo bacino, il Sillaro a Sesto Imolese, dalla Figura 25 le massime piogge giornaliere del primo e del secondo evento di maggio 2023, pari rispettivamente a 116.78 mm e a 104.77 mm, non costituiscono il massimo storico, in quanto superate dalle massime piogge medie areali giornaliere avvenute nel 1928 (135.75 mm) e nel 1948 (125.75 mm). Dalla Figura 26 si vede però che, per quanto riguarda la pioggia di 2 giorni consecutivi, sia il primo che il secondo evento di pioggia si avvicinano molto al massimo storico.

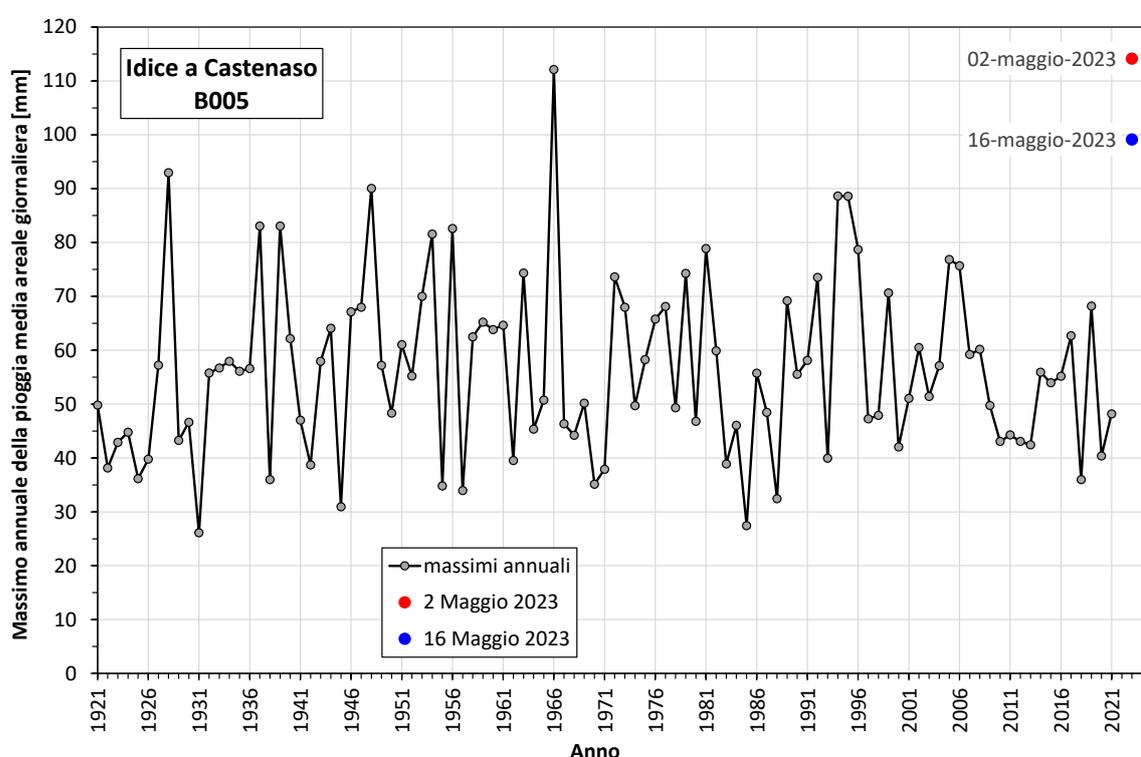


Figura 23 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino dell'Idice chiuso a Castenaso e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

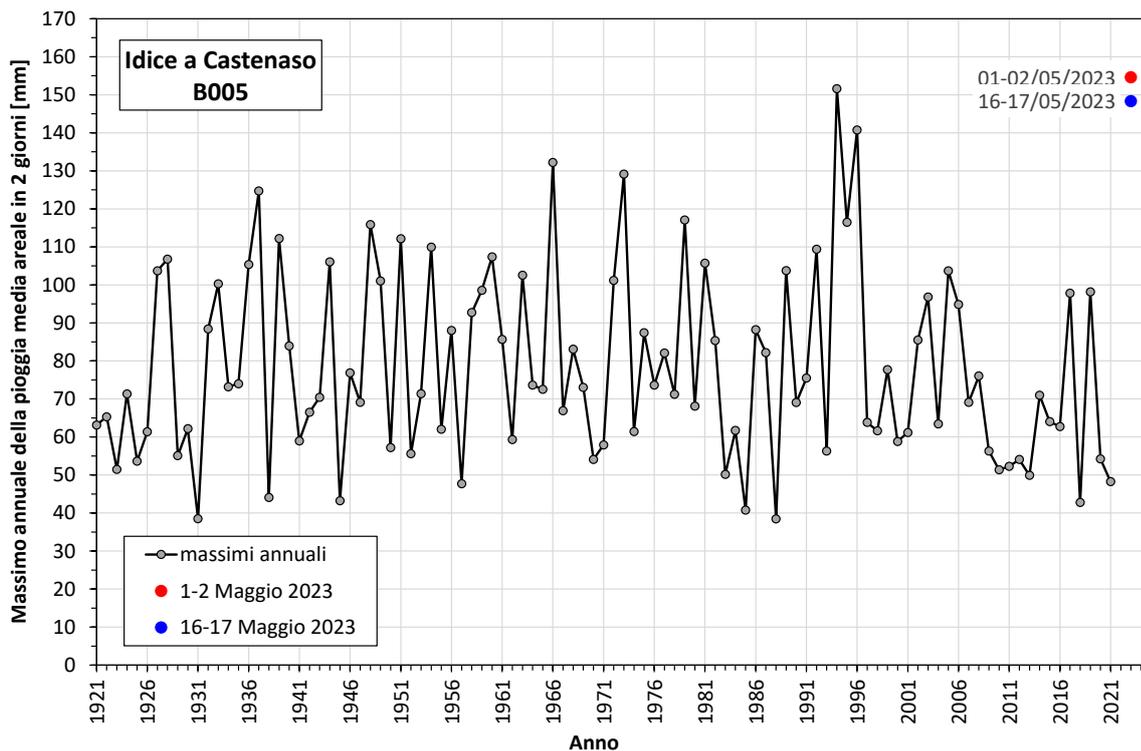


Figura 24 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino dell'Idice chiuso a Castenaso e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

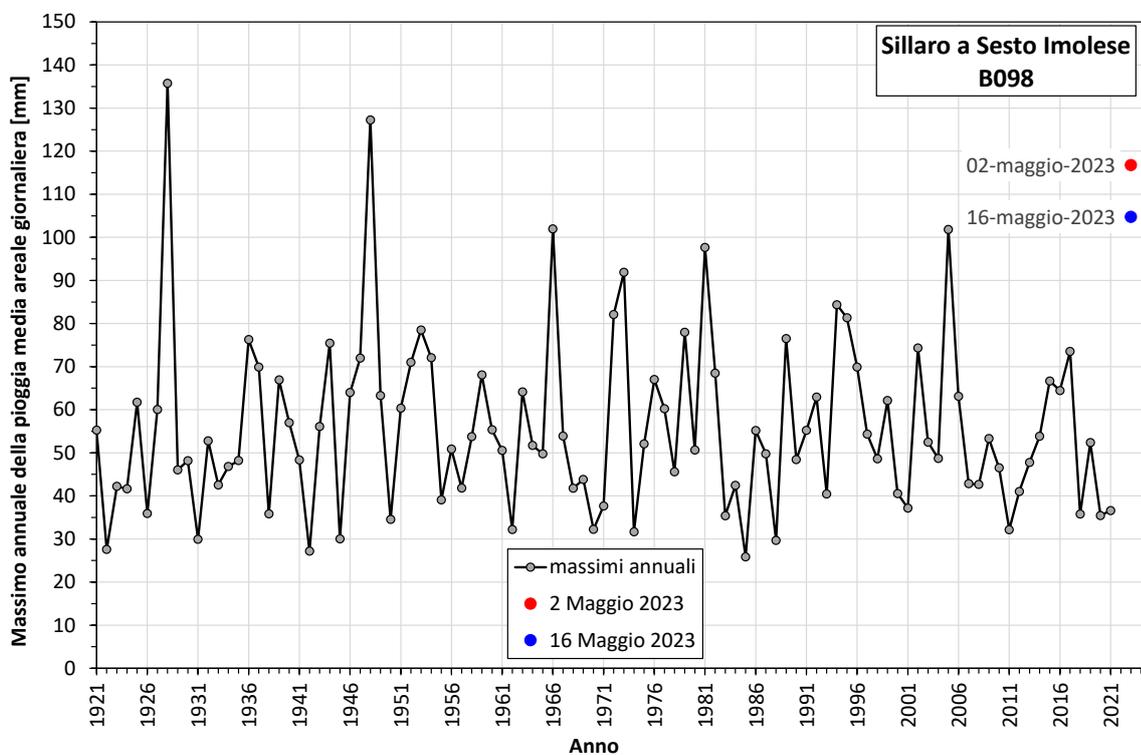


Figura 25 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

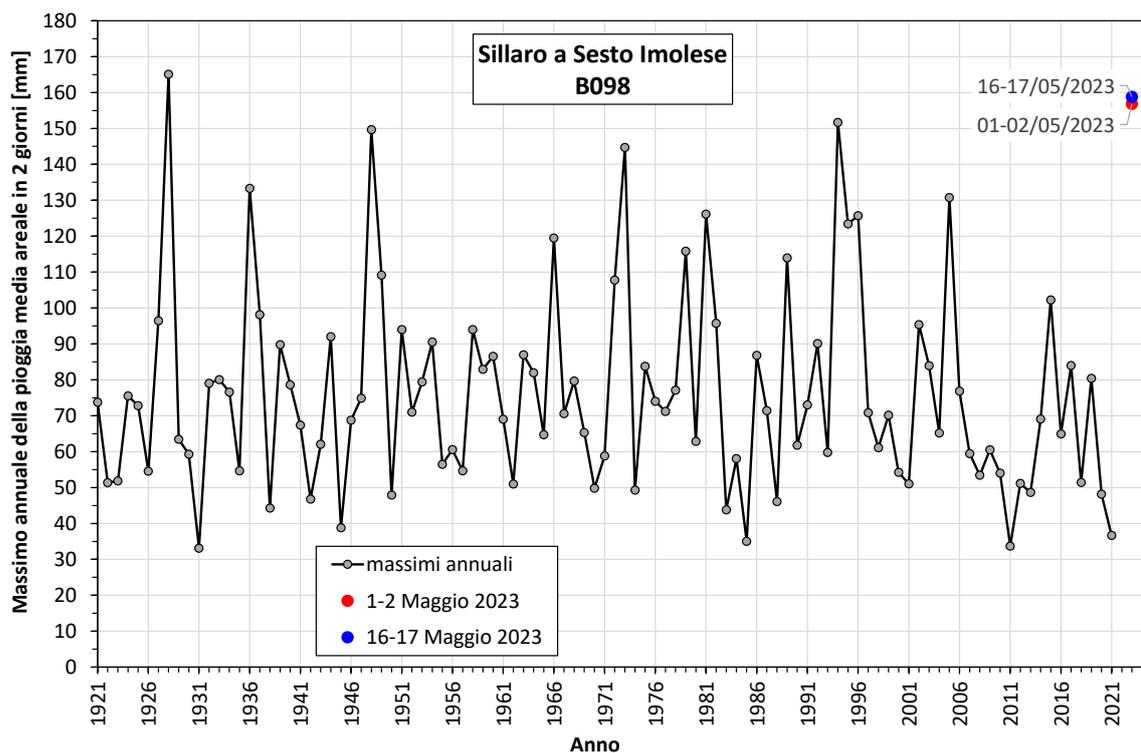


Figura 26 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

A partire dal Santerno e poi proseguendo verso la Romagna, il secondo evento piovoso del maggio 2023 inizia a prevalere rispetto al primo. Nella Figura 27 si nota che la massima pioggia media areale in un giorno del primo evento (16 maggio), pari a 123.86 mm, risulta di poco inferiore al massimo storico ricostruito del 1966 (127.65 mm); invece, la massima pioggia media areale caduta in 2 giorni consecutivi durante l'evento del maggio 2023 (16-17 maggio, 176.66 mm), risulta nettamente più alta (v. Figura 28) del massimo storico precedente, avvenuto, in base alla serie ricostruita, nel 1966 e pari a 149.49 mm.

Nel caso del Senio a Castel Bolognese (v. Figura 29), entrambi i massimi valori giornalieri della pioggia media areale calcolati per il primo che per il secondo evento del maggio 2023 (rispettivamente pari a 123.05 mm e 152.54 mm) risultano superiori al massimo storico precedente (1928, 114.31 mm), come risulta dalla Figura 29, a dimostrazione dell'eccezionalità di volumi piovuti. Questo comportamento si accentua ulteriormente se si passa all'analisi delle piogge areali massime cadute in 2 giorni (v. Figura 30); nel primo evento si ha un valore di 168.83 mm, nel secondo di 207.24 mm, valori entrambi nettamente maggiori del massimo storico precedente, verificatosi, secondo la ricostruzione effettuata, nel 1939 e pari a 149.98 mm.

Nel caso del Lamone a Reda, come si osserva dalla Figura 31, il massimo valore giornaliero della pioggia media areale per gli eventi del maggio 2023 si verifica nel secondo evento (16 maggio) ed è pari a 151.27 mm; si tratta di un netto superamento del precedente massimo storico, avvenuto nel 1939 e pari a 120.57 mm. Anche nel primo evento il massimo giornaliero (2 maggio) è risultato molto elevato (116.26 mm); senza considerare il secondo evento di maggio, si sarebbe trattato comunque del secondo valore più elevato della serie storica. Analoghe considerazioni si possono fare per i massimi annuali delle piogge medie areali in 2 giorni consecutivi (v. Figura 32); il massimo dell'evento di maggio 2023 (16-17 maggio) ammonta a 200.53 mm a fronte di un massimo storico precedente pari a 174.05 mm, che, secondo la ricostruzione effettuata dei campi di pioggia spaziali del passato, si sarebbero verificati nel 1939.

Nel caso del Montone a Ponte Vico, il valore massimo giornaliero della pioggia media areale del maggio 2023, pari a 134.23 mm, risulta superiore al massimo storico precedente, pari a 111.77 mm e verificatosi nel 1939 (v. Figura 33). Analogo comportamento si verifica per la pioggia in 2 giorni consecutivi (v. Figura 34); il massimo dell'evento è pari a 176.63 mm, nettamente superiore al massimo storico precedente 163.26 mm (anno 1939).

Infine, nel caso del Ronco a Coccolia (v. Figura 35) il massimo giornaliero dell'evento del maggio 2023 risulta pari a 113.78 mm e risulta anch'esso massimo storico (massimo precedente 109.03 mm del 1939); dalla Figura 36 si osserva invece che anche per la pioggia di 2 giorni l'evento del 2023 costituisce massimo storico (158.90 mm contro i 153.25 mm del 1939).

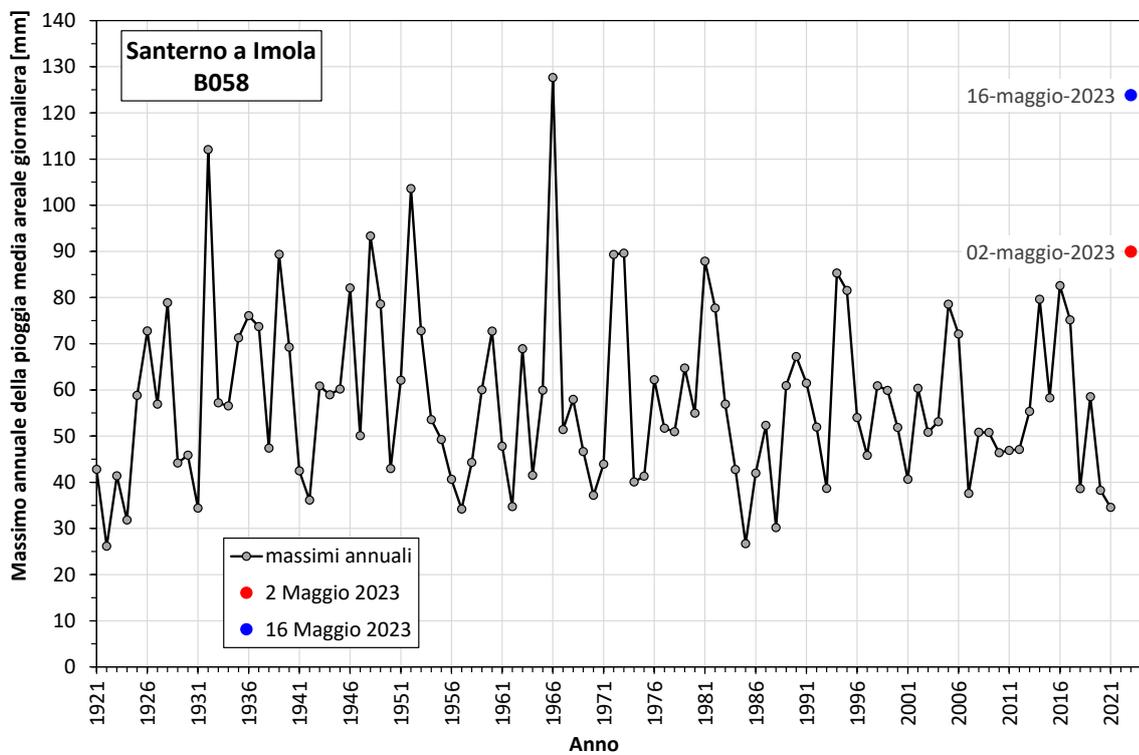


Figura 27 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Santerno chiuso a Imola e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

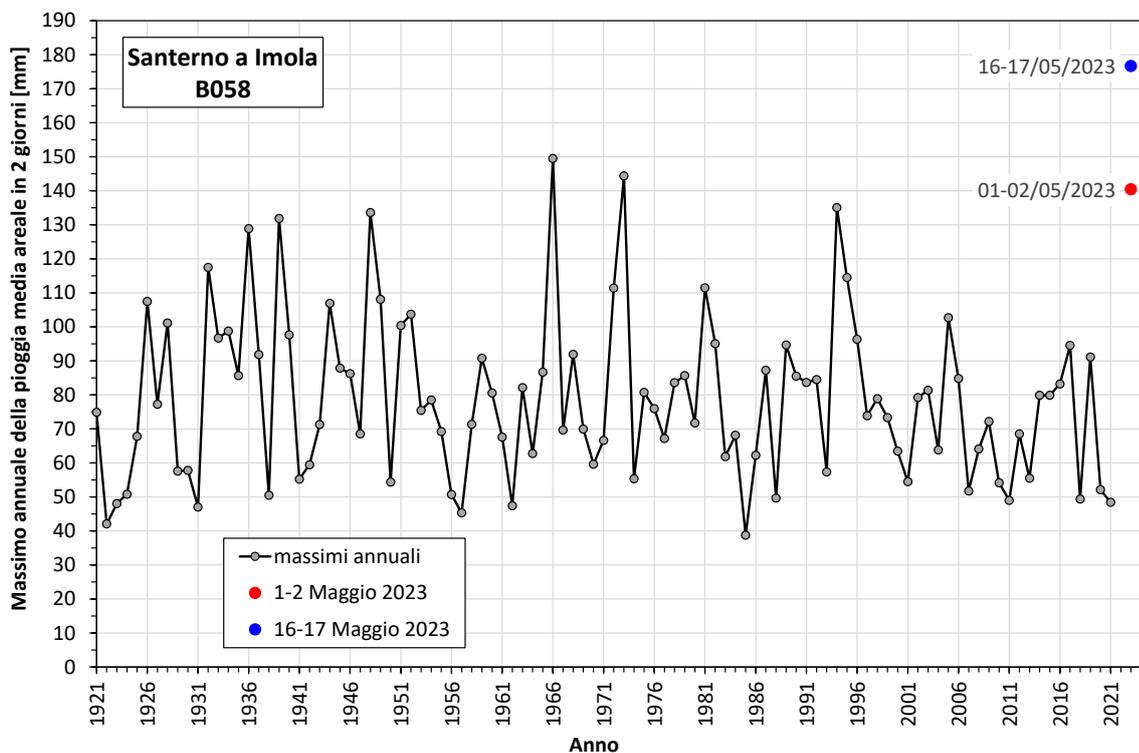


Figura 28 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Santerno chiuso a Imola e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

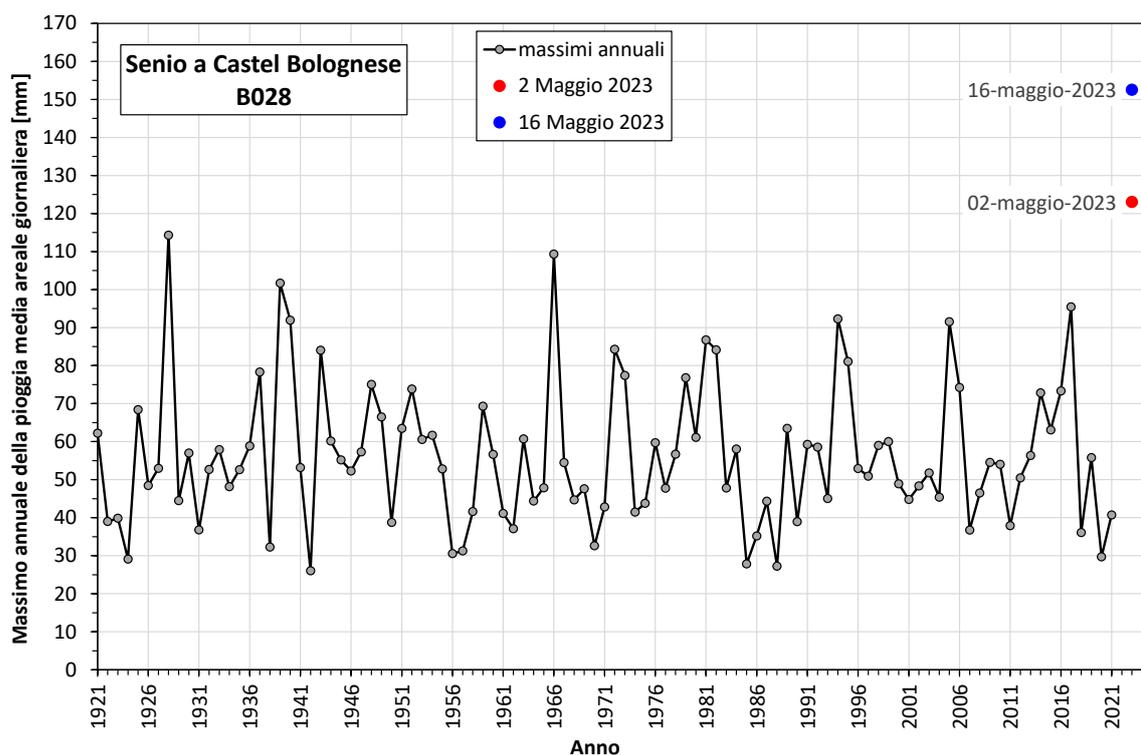


Figura 29- Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Senio chiuso a Castel Bolognese e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

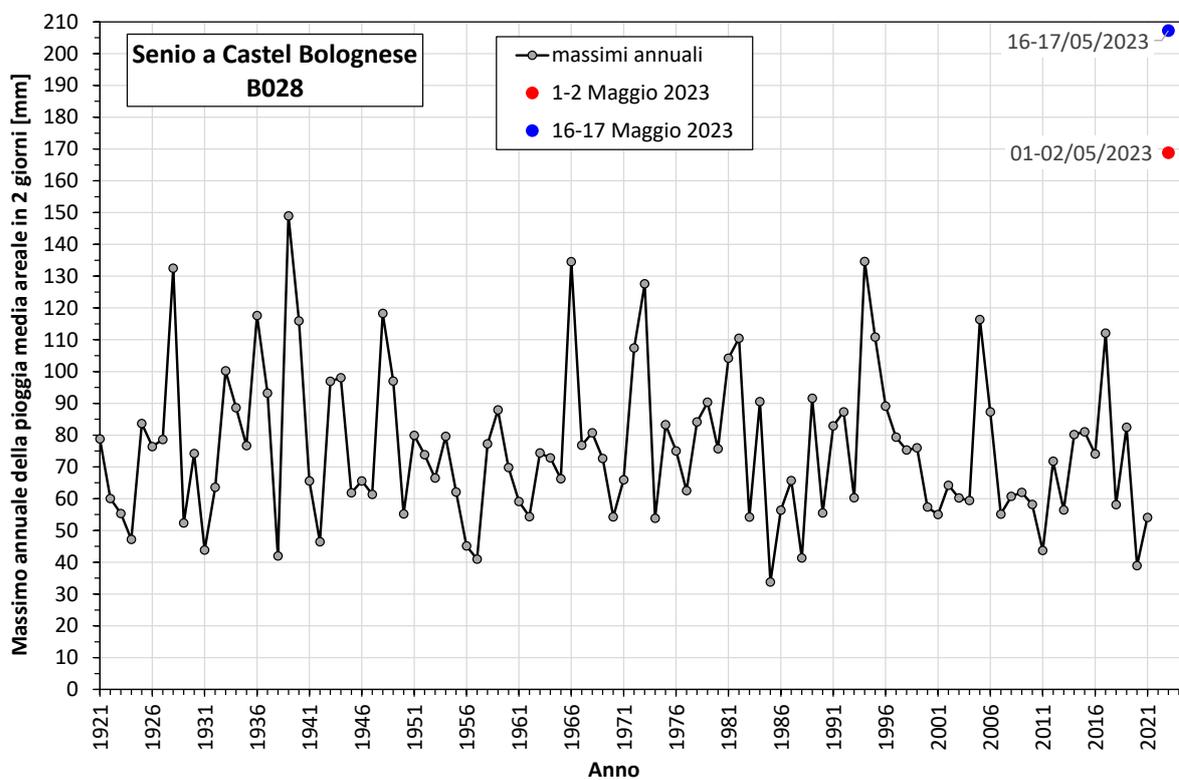


Figura 30 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Senio chiuso a Castel Bolognese e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

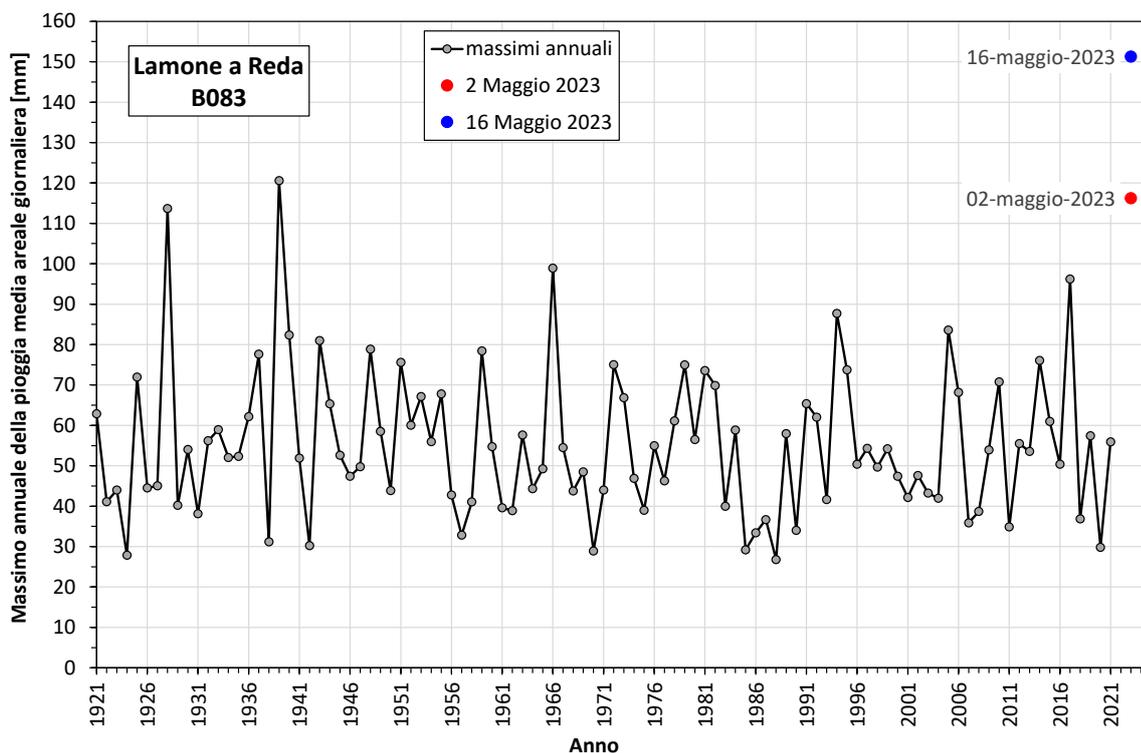


Figura 31- Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Lamone chiuso a Reda e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

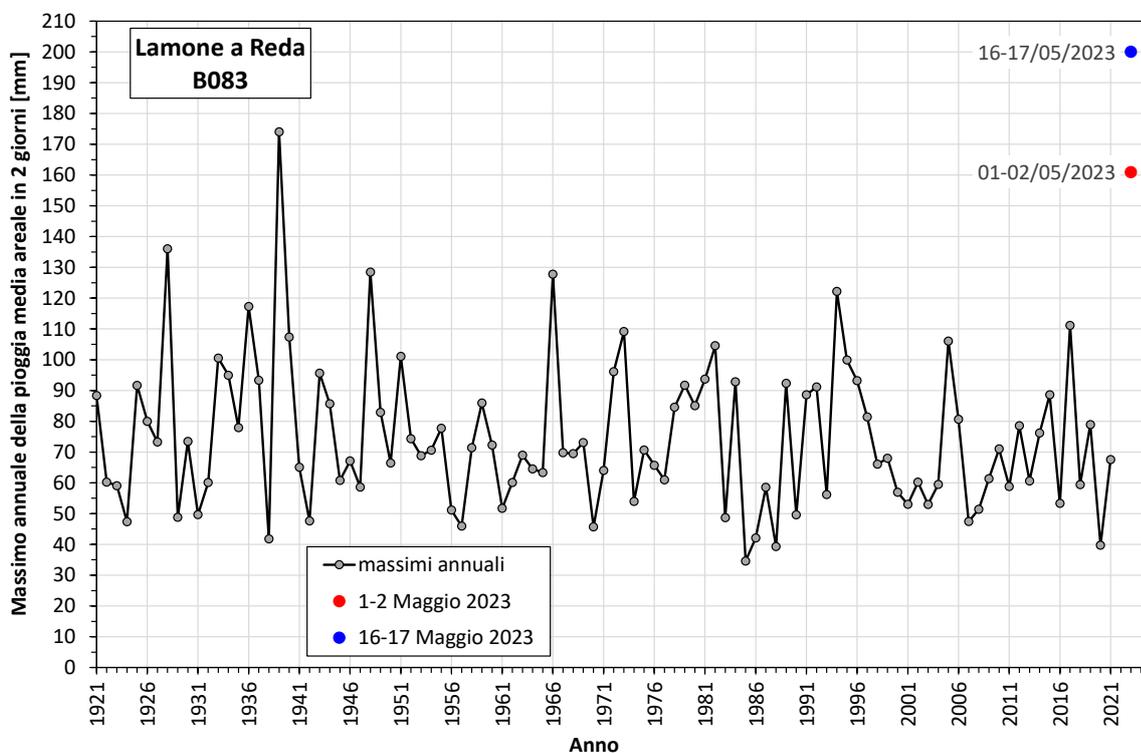


Figura 32 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Lamone chiuso a Reda e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

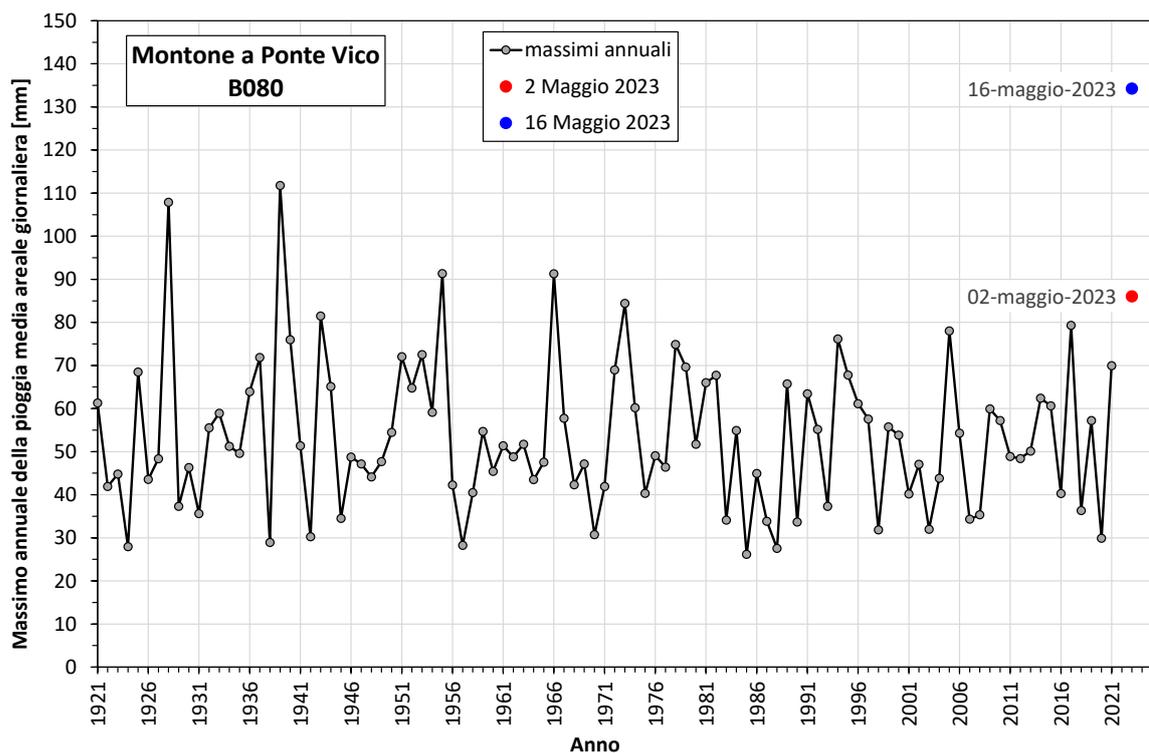


Figura 33- Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

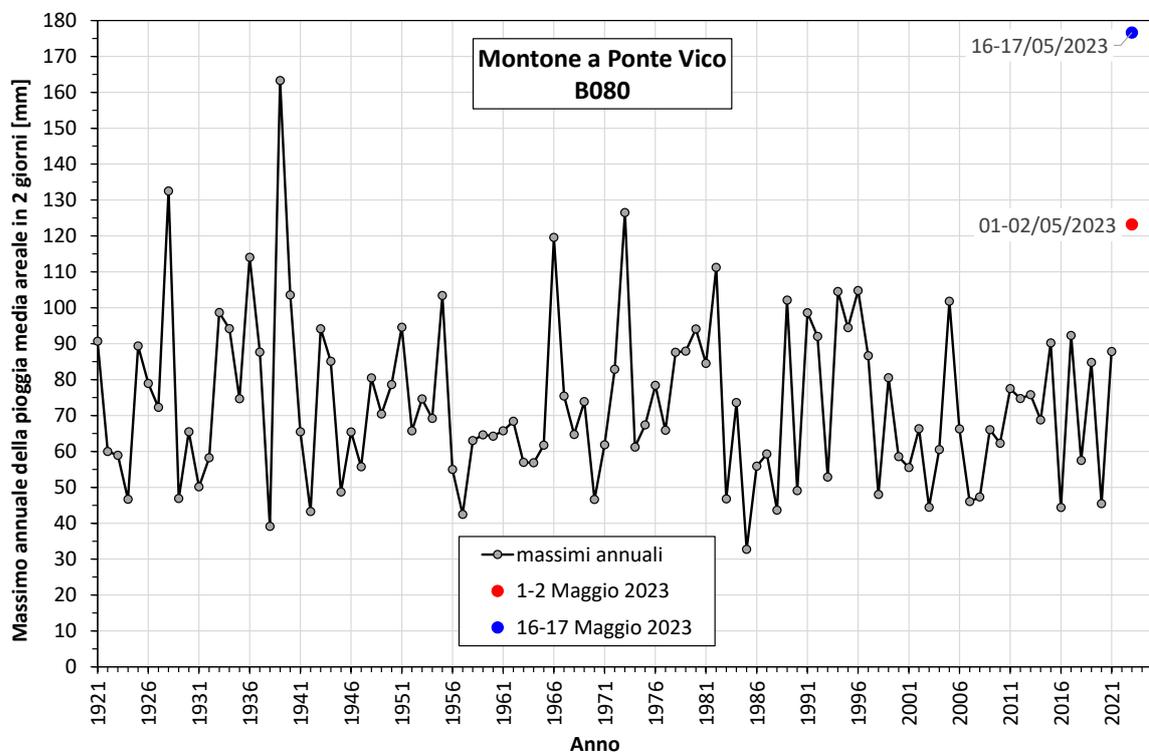


Figura 34 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

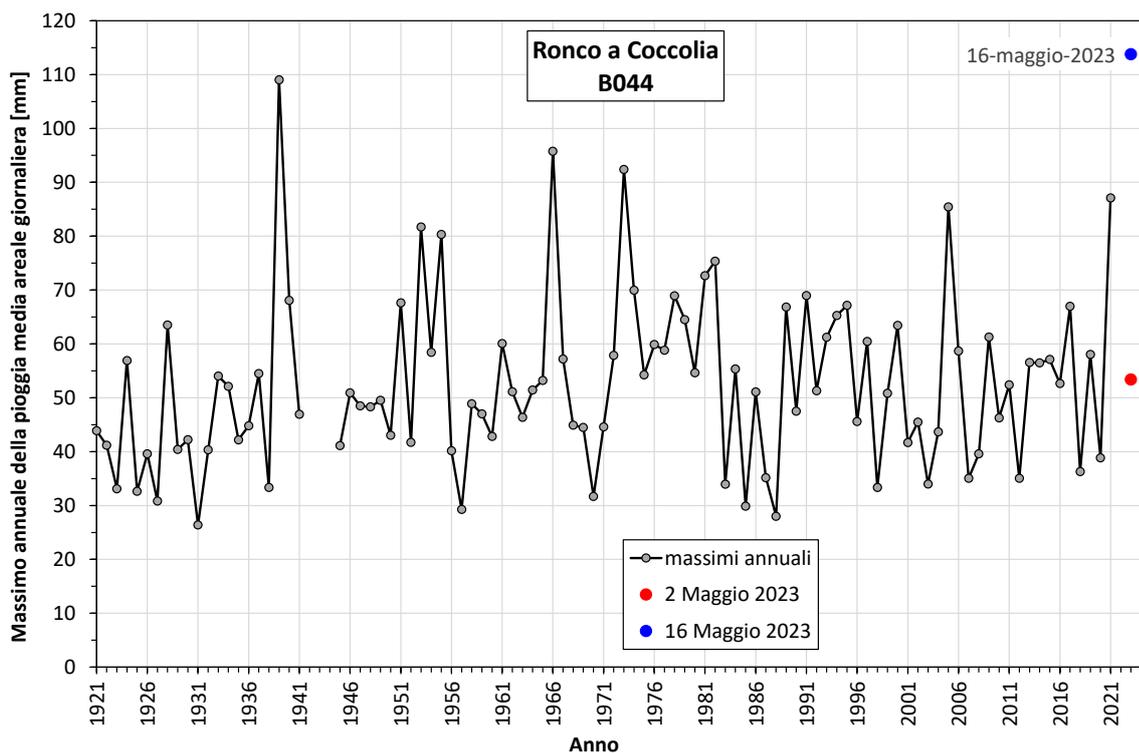


Figura 35- Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera per il bacino del Ronco chiuso a Coccolia e confronto con le piogge giornaliere massime dei due eventi del maggio 2023.

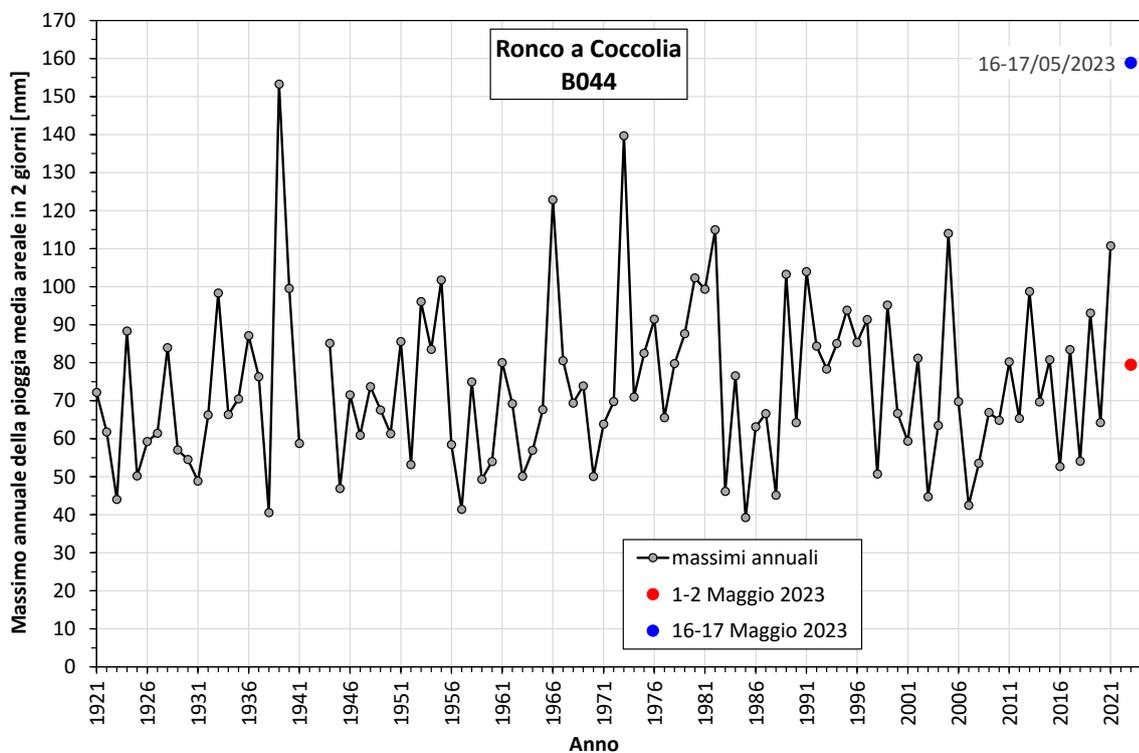


Figura 36 - Serie ricostruita dei massimi annuali della pioggia media areale in 2 giorni consecutivi per il bacino del Ronco chiuso a Coccolia e confronto con le piogge massime dei due eventi del maggio 2023.

3.4.2 L'analisi statistica dei valori estremi: metodi

Al fine di valutare il tempo di ritorno dell'evento, sono state quindi studiate la distribuzione di probabilità della serie dei massimi annuali delle altezze di pioggia media areale disponibile per ciascun bacino per durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore e per durate di 1 e 2 giorni consecutivi.

Per descrivere la distribuzione di probabilità è stata adottata la legge generalizzata del valore estremo (GEV), la cui funzione di distribuzione di probabilità $F(x)$ ha l'espressione:

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 - k \frac{(x-\xi)}{\alpha}\right]^{1/k}\right\} \quad (1)$$

nella quale x è il generico valore della variabile casuale (la pioggia massima annuale) e $F(x)$ è la sua probabilità di non superamento in un anno generico. Nell'equazione precedente ξ, α, k sono rispettivamente i parametri di posizione, scala e forma della distribuzione. La distribuzione GEV è un modello probabilistico che incorpora, come casi particolari, tre distribuzioni dei valori estremi: quella del I tipo, o legge di Gumbel, cui essa si riduce per $k \rightarrow 0$, la distribuzione del valore estremo del II tipo, o legge di Frechet, per $k < 0$, e quella del terzo tipo, o distribuzione di Weibull, per $k > 0$. Quest'ultima è poco utilizzata per problemi del tipo di quello in esame, in quanto superiormente limitata.

La stima dei parametri della distribuzione GEV è stata ottenuta impiegando il metodo degli L-moments, secondo quanto proposto nel noto lavoro di Hoskings. Dalla relazione precedente, fissato un valore di x , si ricava la sua probabilità di non superamento $F(x)$ e quindi il suo tempo di ritorno $T(x)$ come:

$$T(x) = \frac{1}{1-F(x)} \quad (2)$$

E' anche possibile invertire l'equazione (1) per ricavare la cosiddetta legge di previsione, che consente, fissato il tempo di ritorno T , di ricavare l'altezza di pioggia che, ai sensi della legge probabilistica adottata, possiede quel valore di T ; si ottiene infatti:

$$x(T) = \xi + \frac{\alpha}{k} \left\{ 1 - \left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) \right]^k \right\} \quad (3)$$

Per ciascun bacino, dalla serie dei massimi annuali delle piogge medie areali per le durate citate in precedenza, sono stati stimati i parametri della distribuzione (1) applicando il metodo degli L-moments; quindi, considerando la massima pioggia media areale dell'evento del 2023, con la legge (1) e poi con la (2) ne è stata ottenuta la stima del tempo di ritorno.

3.4.3 L'analisi statistica dei valori estremi per durate di uno e due giorni (1921-2023)

Nelle figure da Figura 37 a Figura 43 è illustrato il confronto per ciascuno dei 7 bacini selezionati tra la distribuzione di frequenza dei campioni delle osservazioni storiche dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera e in due giorni consecutivi e le relative distribuzioni di probabilità GEV, stimate in base ai campioni come in precedenza indicato. Per il calcolo della frequenza campionaria si è utilizzata la plotting position di Gringorten. Si precisa che, sull'asse delle ascisse, la scala del tempo di ritorno delle figure corrisponde a quella di una carta probabilistica di Gumbel.

Si può notare come l'andamento della legge di distribuzione di probabilità teorica ottenuto dall'inferenza statistica sui campioni disponibili sia sempre molto vicino a quello di una retta, a dimostrare che la legge GEV risultante differisce poco da una legge di Gumbel, che quindi, nei casi esaminati, si può ritenere una buona approssimazione del modello probabilistico GEV.

Nelle figure, sull'asse delle ordinate sono riportati i valori massimi giornalieri della pioggia media areale sul bacino in un giorno e in due giorni consecutivi, verificatisi per ciascuno dei due eventi di pioggia del maggio 2023 (punto rosso per primo evento; punto blue per il secondo evento). Tracciando idealmente una linea orizzontale in corrispondenza di tali punti fino a intersecare la distribuzione GEV teorica (linea continua) è possibile leggere sull'asse delle ascisse la stima del tempo di ritorno. Ovviamente, l'operazione di stima del tempo di ritorno può essere effettuata, con maggiore precisione, attraverso l'equazione (3).

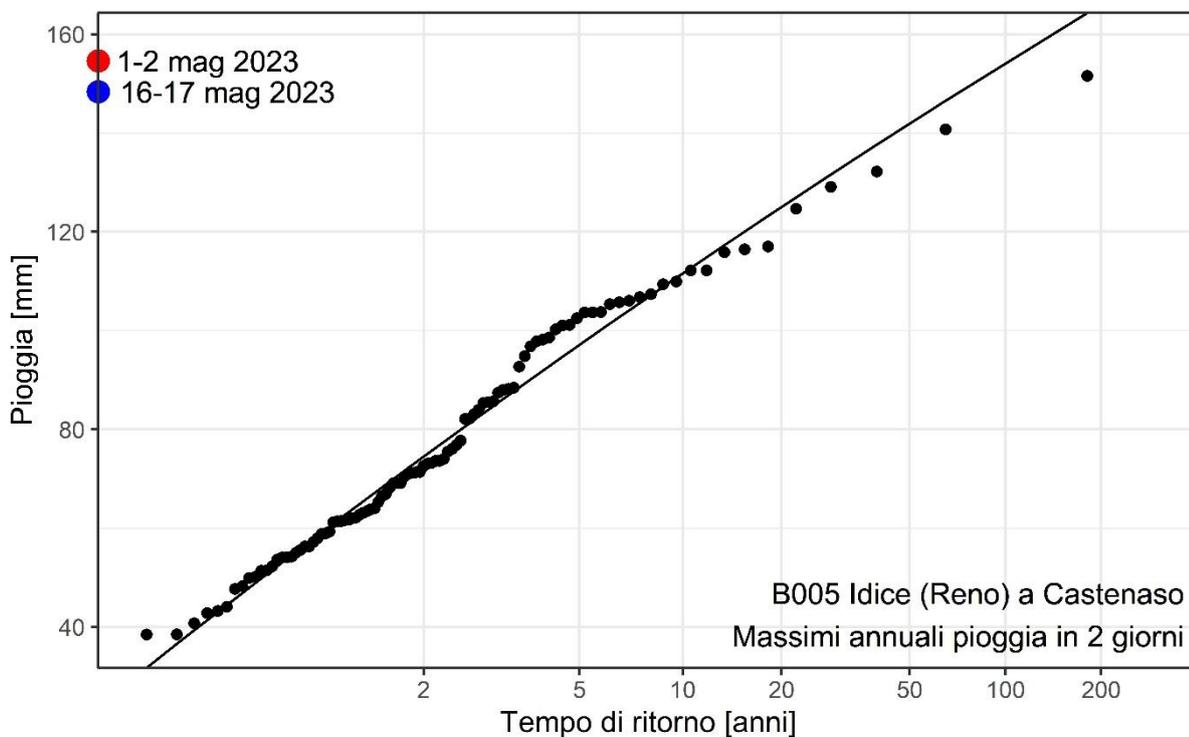
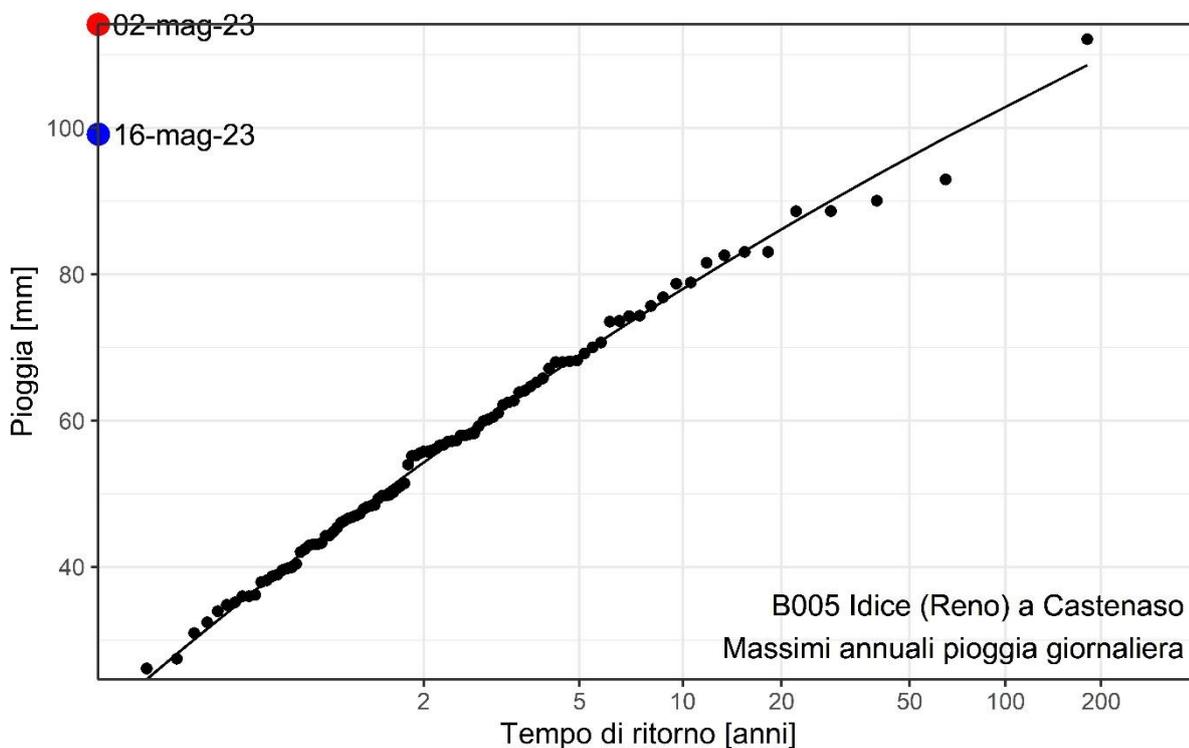


Figura 37 - Bacino dell'Idice chiuso a Castenaso. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

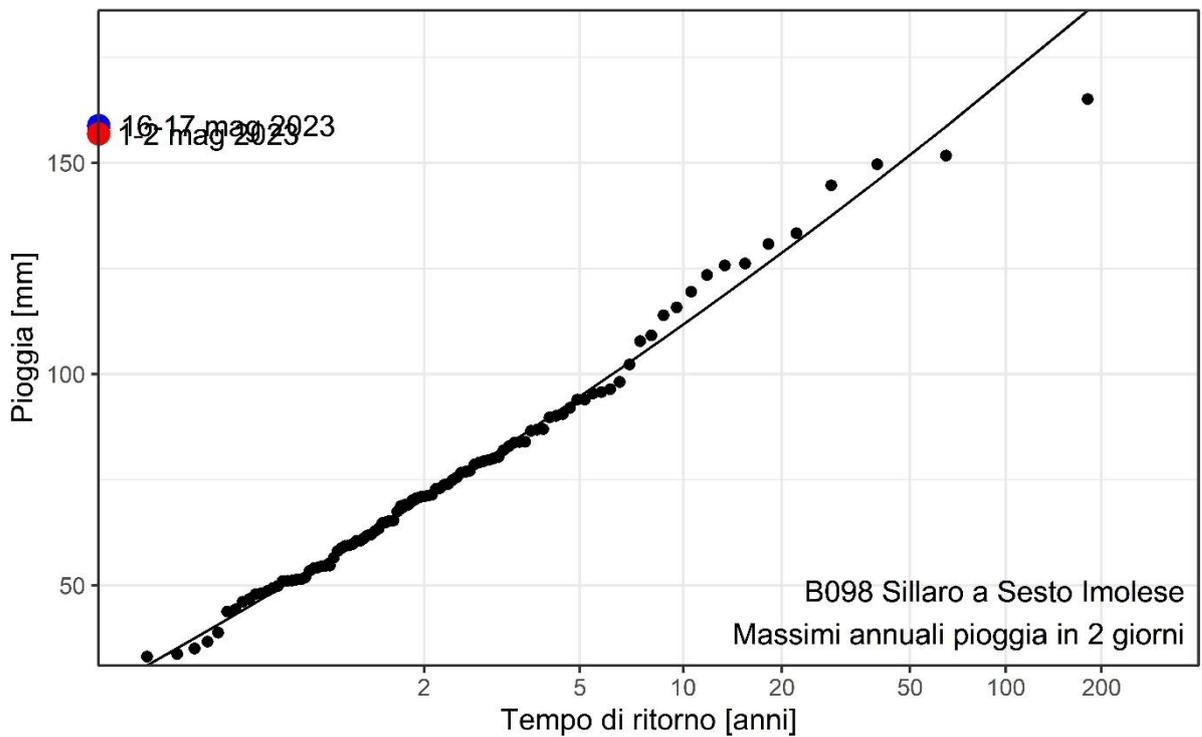
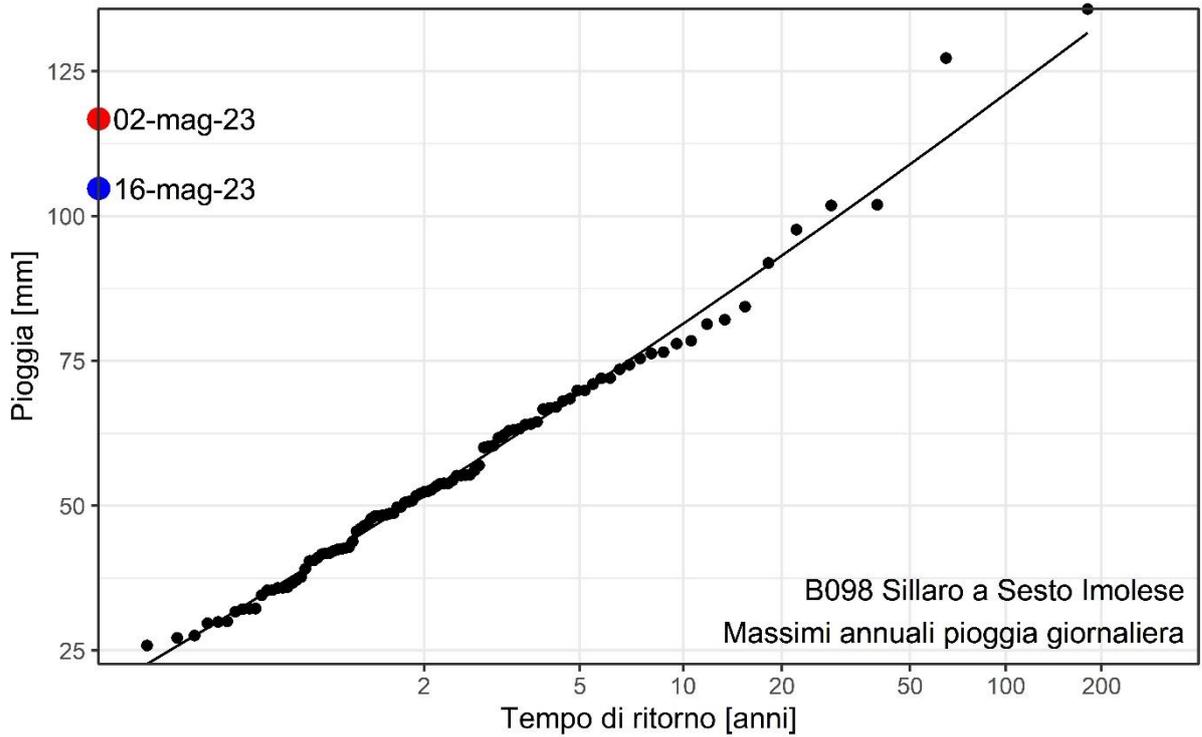


Figura 38 - Bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

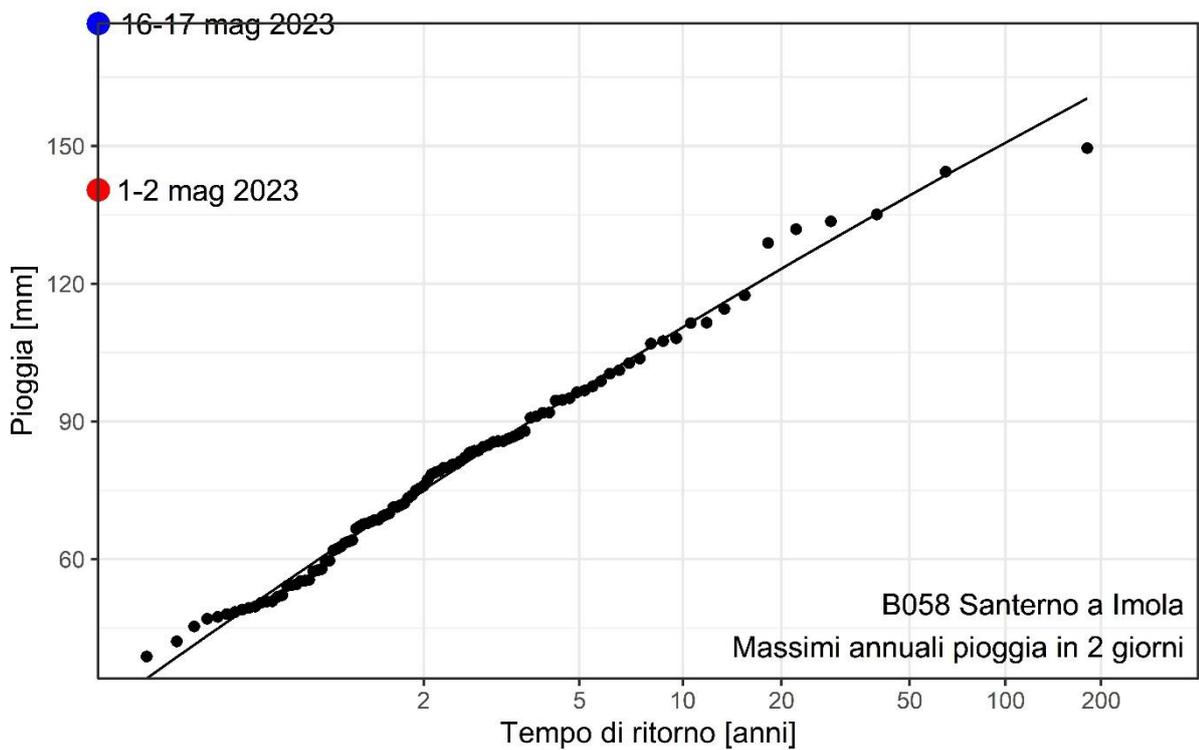
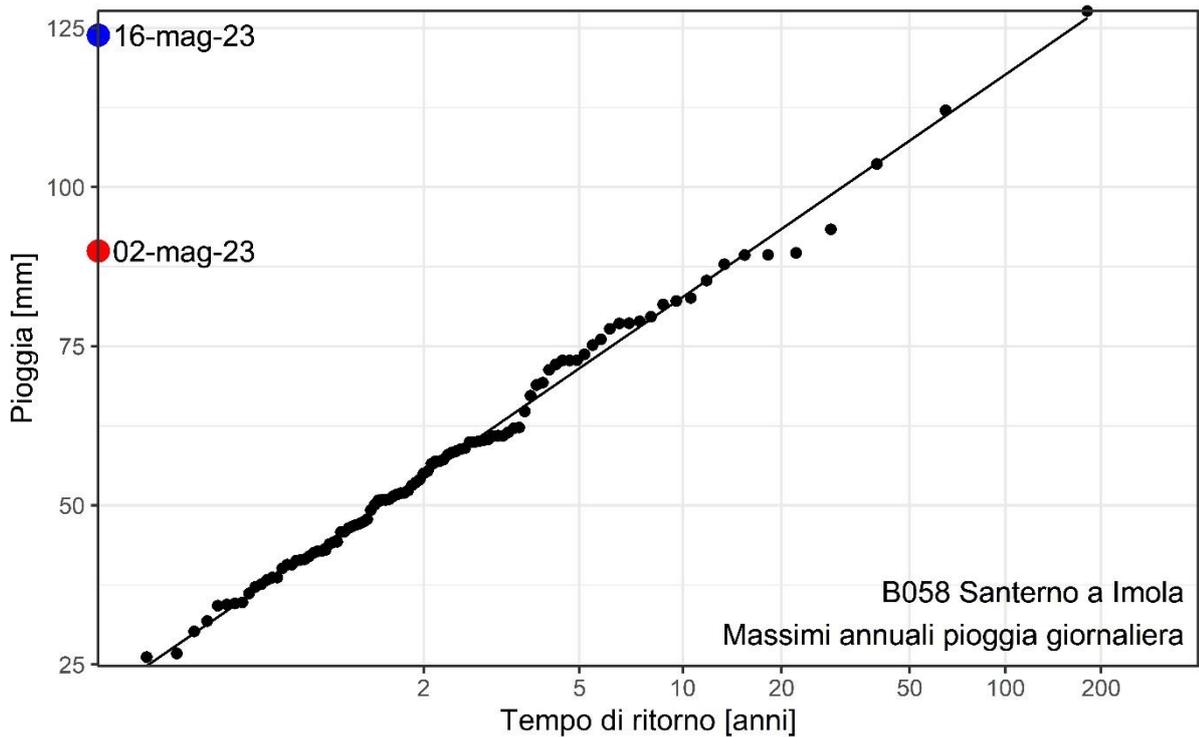


Figura 39 - Bacino del Santerno chiuso a Imola. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

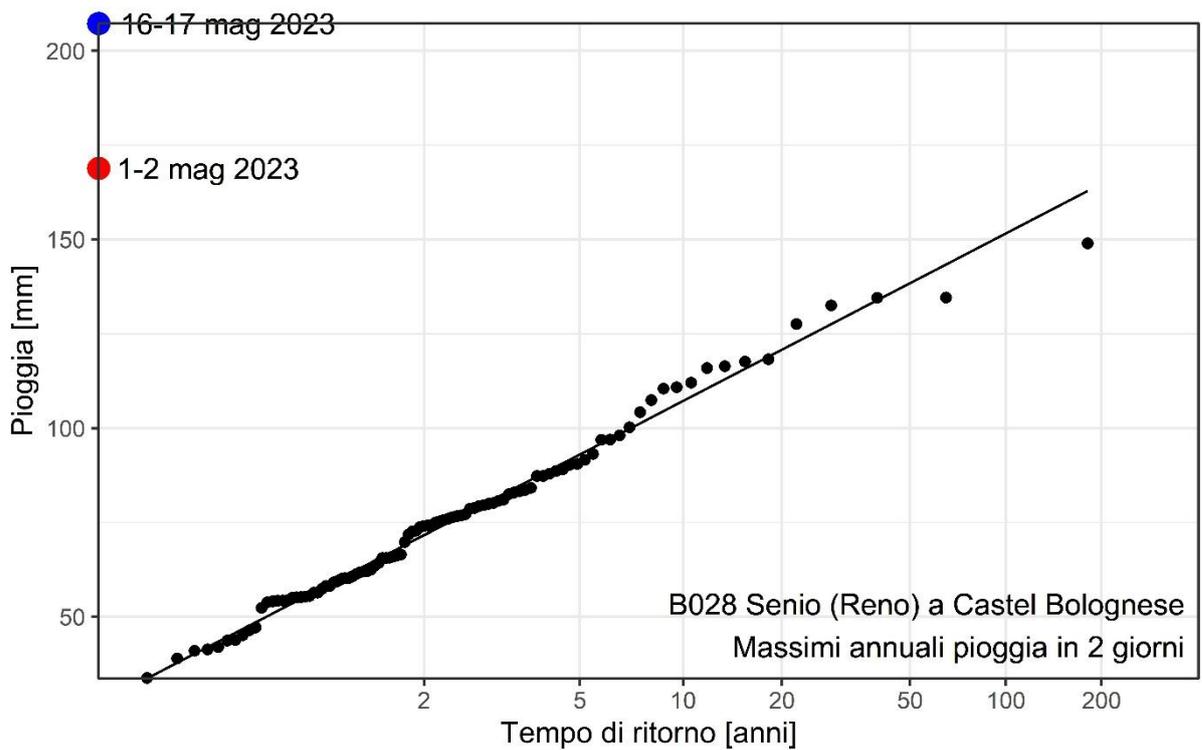
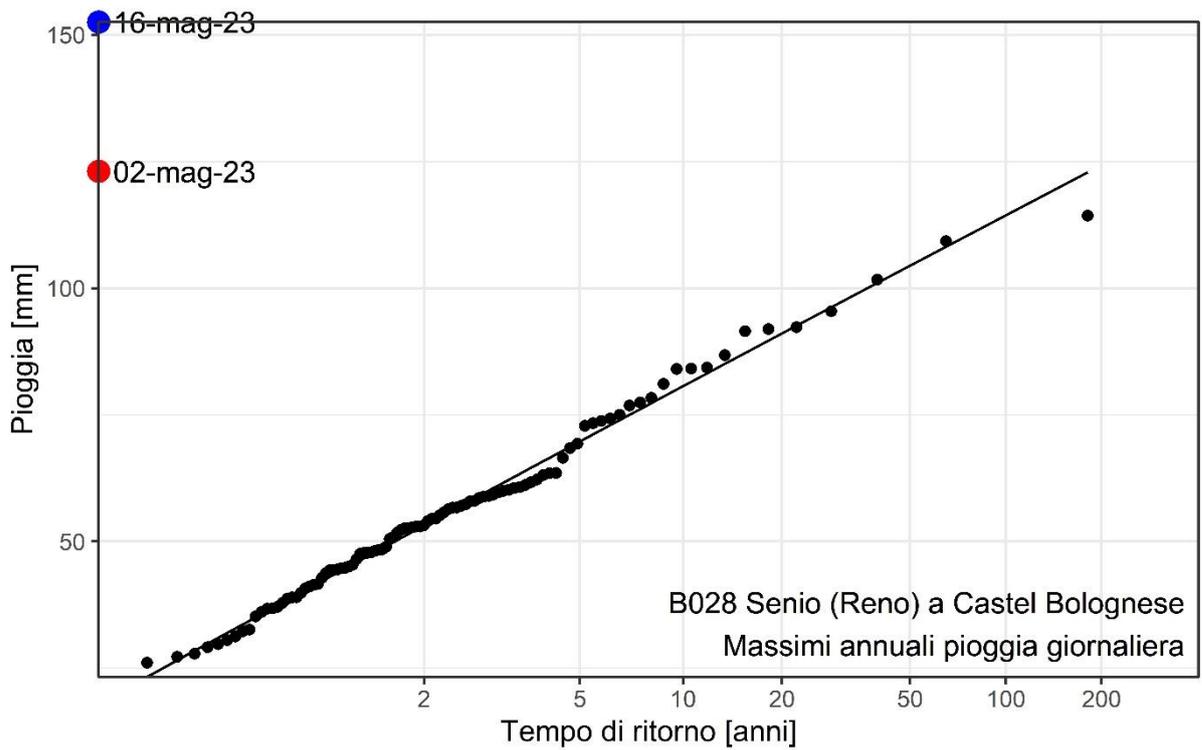


Figura 40 - Bacino del Senio chiuso a Castel Bolognese. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

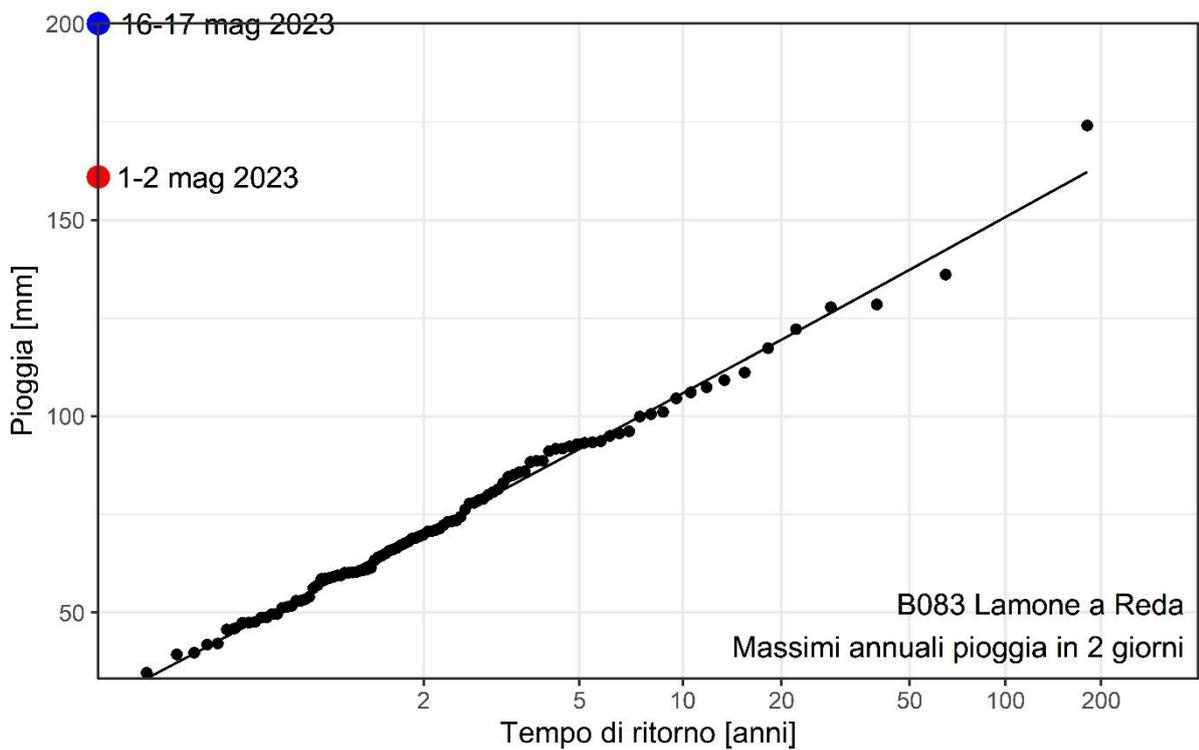
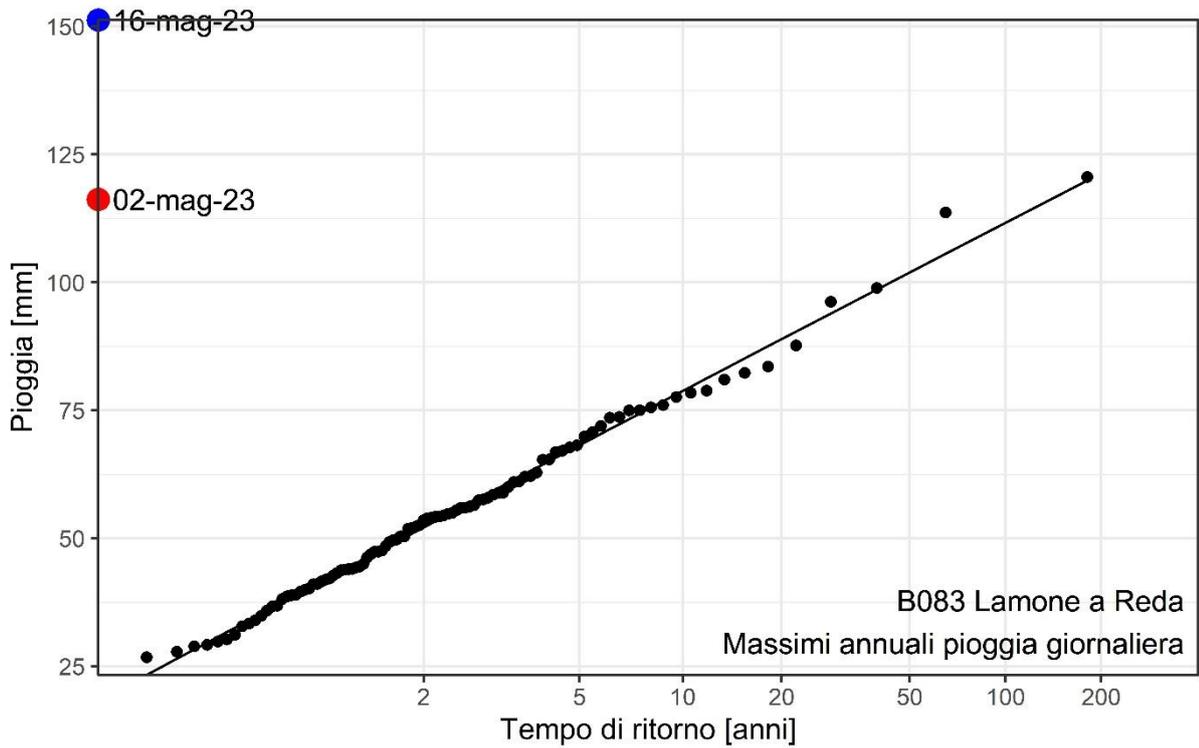


Figura 41 - Bacino del Lamone chiuso a Reda. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

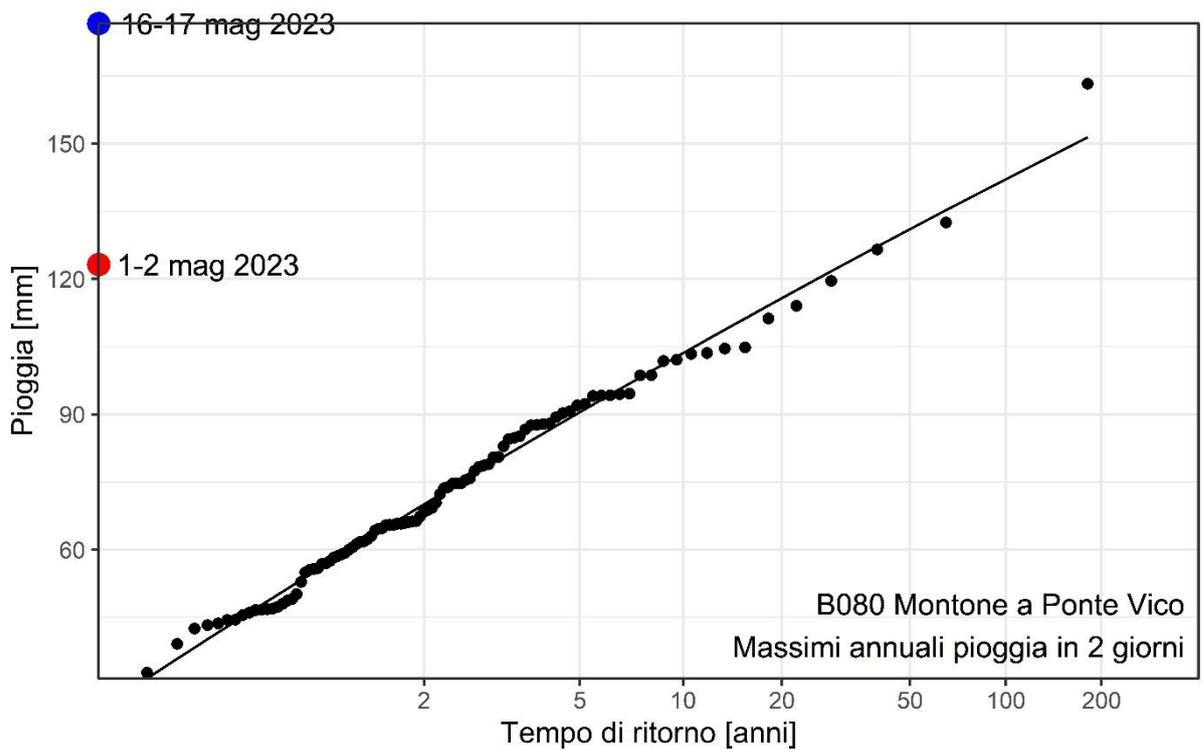
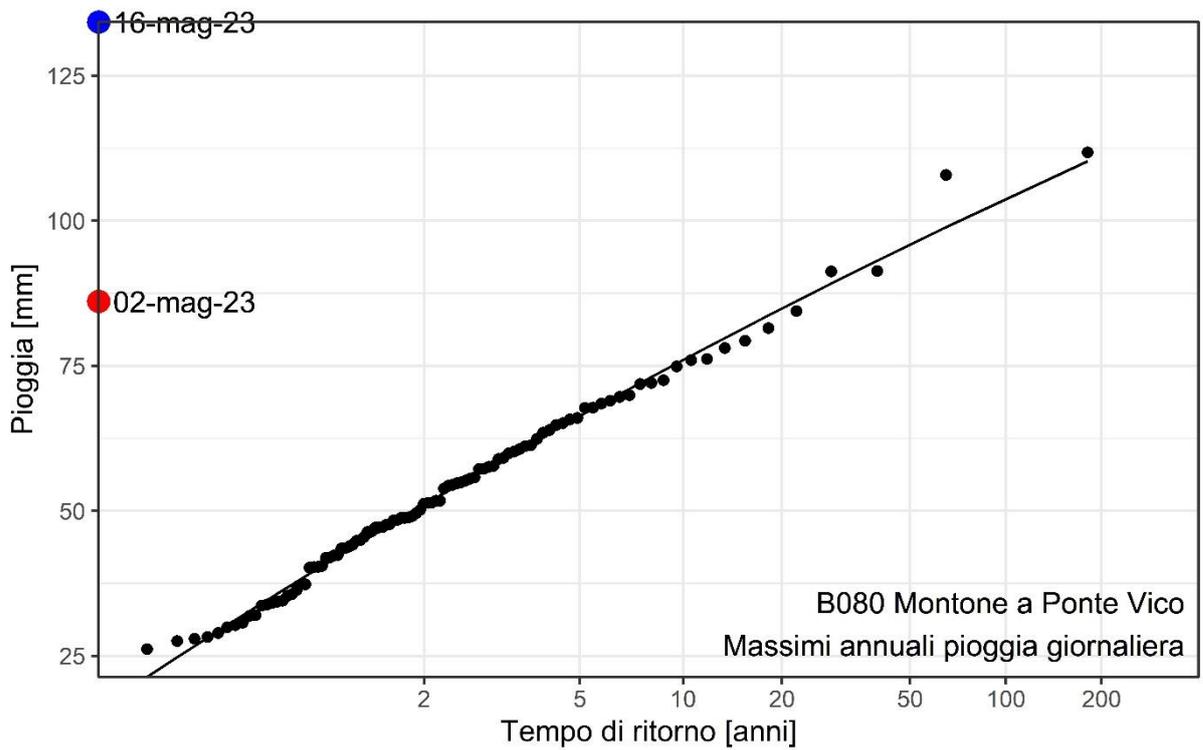


Figura 42 - Bacino del Montone chiuso a Ponte Vico. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

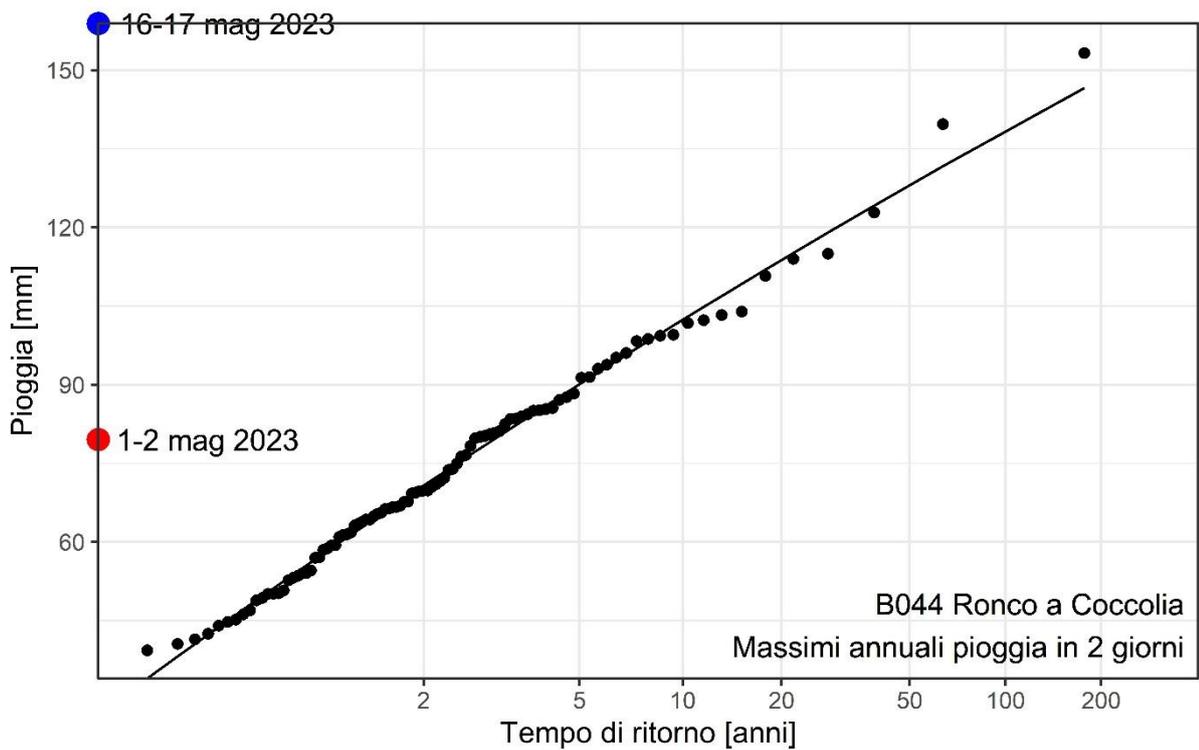
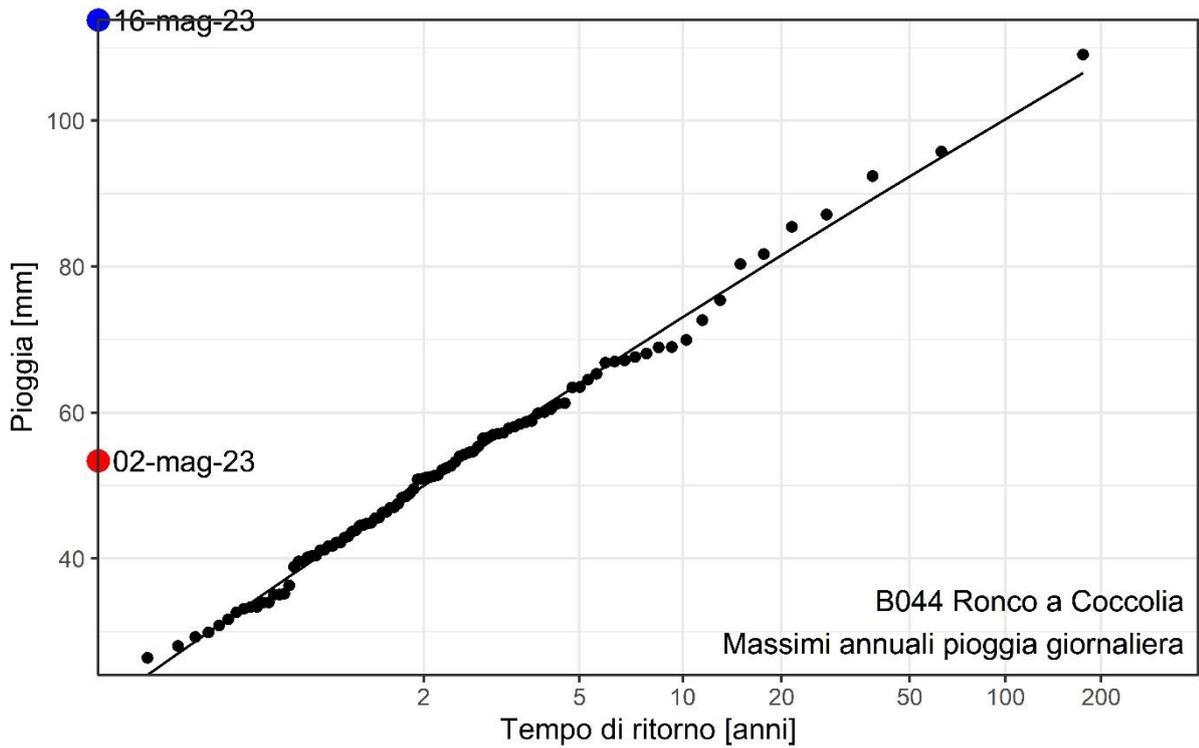


Figura 43 - Bacino del Ronco chiuso a Coccolia. Campioni dei massimi annuali della pioggia media areale giornaliera (in alto) e in due giorni consecutivi (in basso) e relative distribuzioni di probabilità GEV. Valori della pioggia media areale dell'evento del maggio 2023.

Nella Tabella 7 sono riportate le stime del tempo di ritorno che si ottengono dalla distribuzione teorica per le piogge areali massime del mese di maggio 2023 per i 7 bacini campione, sia per la pioggia giornaliera che per quella di 2 giorni consecutivi. Nel caso in cui si ottenevano stime maggiori di 500 anni, ritenendo che in tale campo sia presente una non trascurabile incertezza nella stima, si è ritenuto preferibile, anziché indicare numericamente il valore stimato, segnalare il superamento della soglia dei 500 anni, distinguendo tra superamenti relativamente contenuti (>500 anni) e superamenti più marcati (>>500 anni).

Tabella 7 – Stime del tempo di ritorno dei valori massimi giornalieri e in 2 giorni consecutivi delle altezze di pioggia medie areali dell’evento del maggio 2023.

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>T Pio1g [anni]</i>	<i>T Pio 2gg [anni]</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	334	102
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	78	65
B058	Santerno a Imola	416.2	151	515
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	>> 500	>>500
B083	Lamone a Reda	520.2	>> 500	>>500
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	>> 500	>>500
B044	Ronco a Coccolia	549.6	340	427

Le stime del tempo di ritorno della pioggia media areale dell’evento non sono state condotte soltanto per i 7 bacini campione ma per tutti i bacini e sottobacini, sempre applicando il modello GEV. I risultati sono sintetizzati in forma grafica nella Figura 44 e nella Figura 45.

Nella Figura 44 sono rappresentate le stime del tempo di ritorno del valore massimo giornaliero dell’altezza di pioggia media areale sui vari bacini e sottobacini, verificatasi nel corso del maggio 2023; tali stime sono state ottenute dalle distribuzioni di probabilità GEV, di cui si è detto in precedenza. La scala di colori impiegata permette un’agevole individuazione della classe di valori delle stime del tempo di ritorno relative a ciascun bacino. Si ricorda che, anche in tal caso, la campitura relativa al bacino sotteso da una certa sezione idrometrica va intesa come da estendere a tutto il bacino a monte, anche se nei sottobacini a monte si rinvenivano colorazioni differenti. Ad esempio, in Figura 44 si nota che i sottobacini presenti nella parte più a monte del bacino del Lamone e in quello del Ronco hanno colorazioni più chiare rispetto al bacino a valle; in particolare nel caso del bacino del Ronco si notano a monte il bacino del Bidente di Ridracoli chiuso a Ridracoli (B002) e quello del Bidente del Bidente di Corniolo chiuso a Campigna (B001), che presentano una colorazione bianca quindi con stime del tempo di ritorno inferiori a 10 anni. Più a valle si trova la stazione di Meldola, per il cui bacino sotteso la Figura 44 indica una stima del tempo di ritorno compresa tra 100 e 200 anni (precisamente 156 anni), e ancora più a valle quella di Coccolia, per il cui bacino sotteso si ha una stima del tempo di ritorno nella classe 200-500 anni (precisamente 340 anni, v. anche Tabella 7). L’esempio fatto serve a precisare che i 156 anni di stima del tempo di ritorno del bacino del Ronco a Meldola sono stati valutati considerando l’intero bacino sotteso quindi comprendendo anche i sottobacini B001 e B002; pertanto, la colorazione 160-180 mm, che si rinviene per il Ronco a Meldola, va considerata estesa anche a tali sottobacini. Come pure i 340 anni stimati per il bacino del Ronco a Coccolia non si riferiscono al solo interbacino compreso tra Meldola e Coccolia ma a tutto il bacino a monte della sezione di Coccolia.

Nella Figura 45 sono rappresentate le stime del tempo di ritorno del valore massimo della pioggia in due giorni consecutivi dell’altezza di pioggia media areale sui vari bacini e sottobacini, verificatasi nel corso del maggio 2023; tali stime sono state ottenute dalle distribuzioni di probabilità GEV, di cui si è detto in precedenza. Anche tale rappresentazione evidenzia come i bacini dal Sillaro a nord al Savio a sud l’evento

abbia caratteristiche di eccezionalità intensità; particolarmente spiccate, per i bacini del Senio, del Lamone, del Montone e del Ronco.

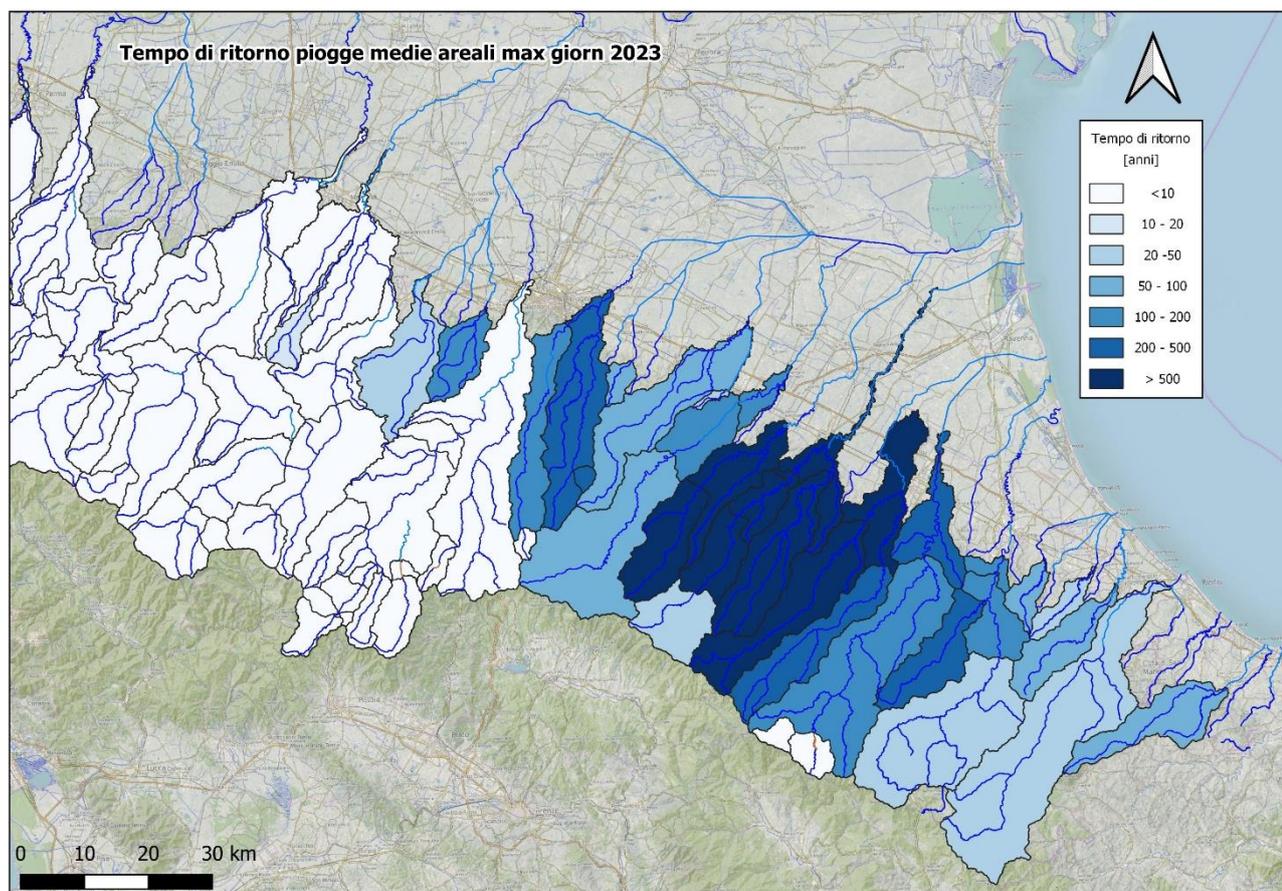


Figura 44 - Stima del tempo di ritorno del massimo giornaliero dell'altezza di pioggia media areale dell'evento del maggio 2023 per i vari bacini.

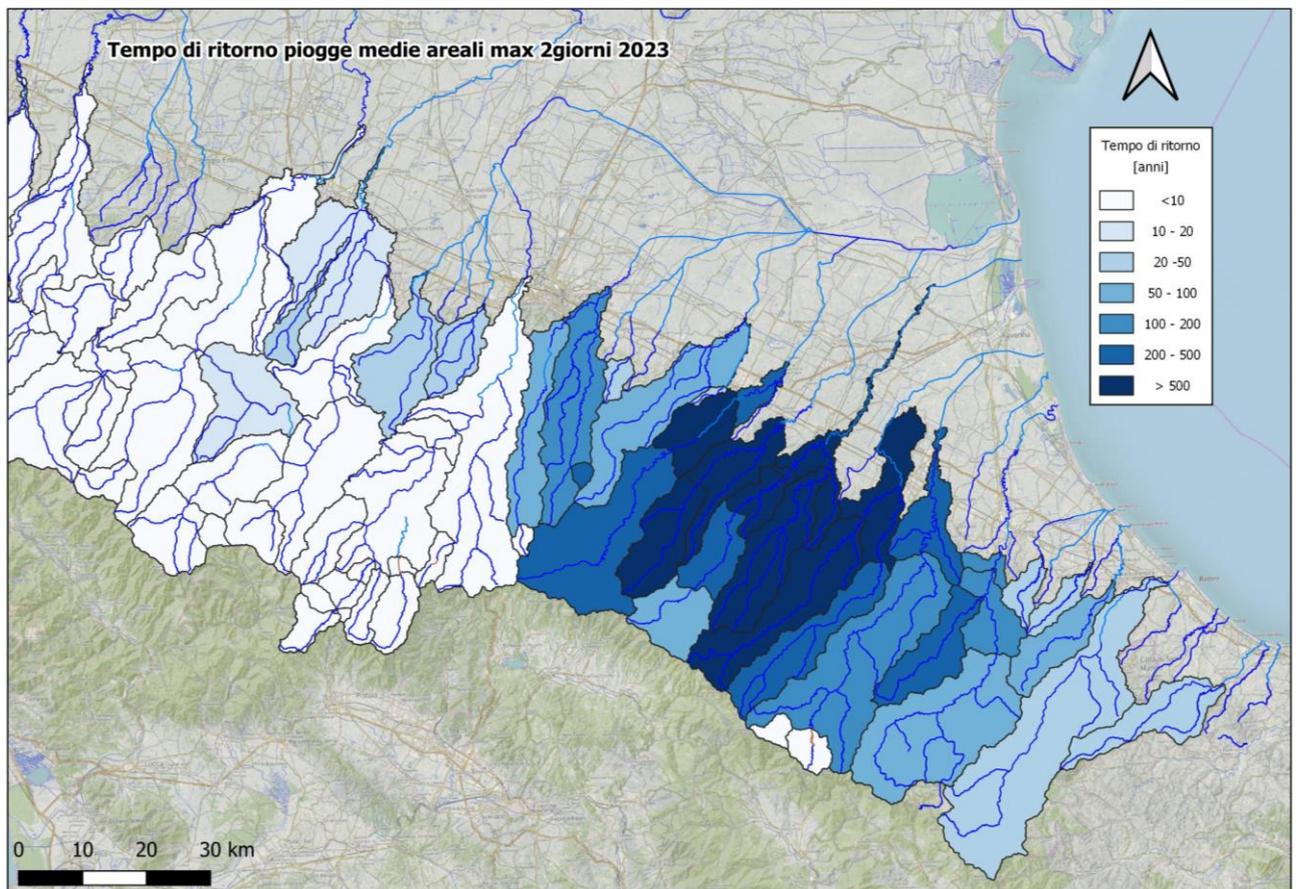


Figura 45 - Stima del tempo di ritorno del massimo in due giorni consecutivi dell'altezza di pioggia media areale dell'evento del maggio 2023 per i vari bacini.

3.4.4 L'analisi statistica dei valori estremi di durate inferiori al giorno (1991-2023)

L'estensione dei sette bacini idrografici rappresentativi nei quali si sono verificati gli eventi di piena del maggio 2023 è compresa tra circa 250 e 550 km². Queste estensioni implicano tempi caratteristici di risposta, o corrvazioni, normalmente inferiori a circa 12 ore. E' dunque importante verificare il tempo di ritorno degli eventi di precipitazione per durate degli eventi massimi annuali compresi tra 1 ora e 24 ore. Inevitabilmente quest'analisi, basandosi su poco più che 30 anni di osservazioni, soffre di maggiori limitazioni, in termini di incertezza di stima, rispetto alle analisi a scala giornaliera, che è stato possibile condurre su più di 100 anni di dati. Tali analisi potranno tuttavia fornire indicazioni utili alla determinazione dei tempi di ritorno delle portate associate agli eventi estremi in questione.

Dalla Figura 46 alla Figura 52 sono rappresentate le distribuzioni di probabilità cumulata del tipo GEV, adattate secondo le modalità descritte nelle sezioni precedenti ad aggregazioni sub-giornaliere dei dati disponibili per gli anni 1991-2023 (ovvero includendo l'evento estremo del maggio 2023). Sono state esplorate tutte le aggregazioni normalmente considerate, di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Qui vengono riportati i risultati relativi alle durate di 1, 12 e 24 ore, in quanto più significativi.

Si trova infatti che in nessuno dei 7 bacini di studio gli eventi di precipitazione del maggio 2023 per durate inferiori a 12 ore sono associati a tempi di ritorno di qualche importanza. Ciò è vero in quasi tutti i casi anche per la durata di 12 ore, per la quale solo nel caso del bacino del Montone a Ponte Vico si osserva un tempo di ritorno significativo e prossimo a 200 anni (Figura 51). L'analisi evidenzia, peraltro, che neppure gli eventi di durata 24 ore rappresentano valori estremi di grande significatività per la maggior parte dei bacini. Infatti, solo per due dei bacini studiati, il Senio a Castel Bolognese (Figura 49) e il Lamone a Reda (Figura 50), l'evento del 16 maggio 2023 risulta associato a tempi di ritorno superiori a 100 anni. Il ridotto valore dei tempi di ritorno associati agli eventi del maggio 2023, nel confronto con le analisi riportate in precedenza per i dati giornalieri, è legato all'insieme di dati utilizzato per l'analisi, costituito da soli 30 anni e, congiuntamente,

all'inclusione di questi stessi eventi nell'adattamento delle distribuzioni di probabilità. E' infatti istruttivo ripetere l'adattamento della distribuzione GEV a insiemi di osservazioni che si limitino agli anni 1991-2022 (Figura 53-74).

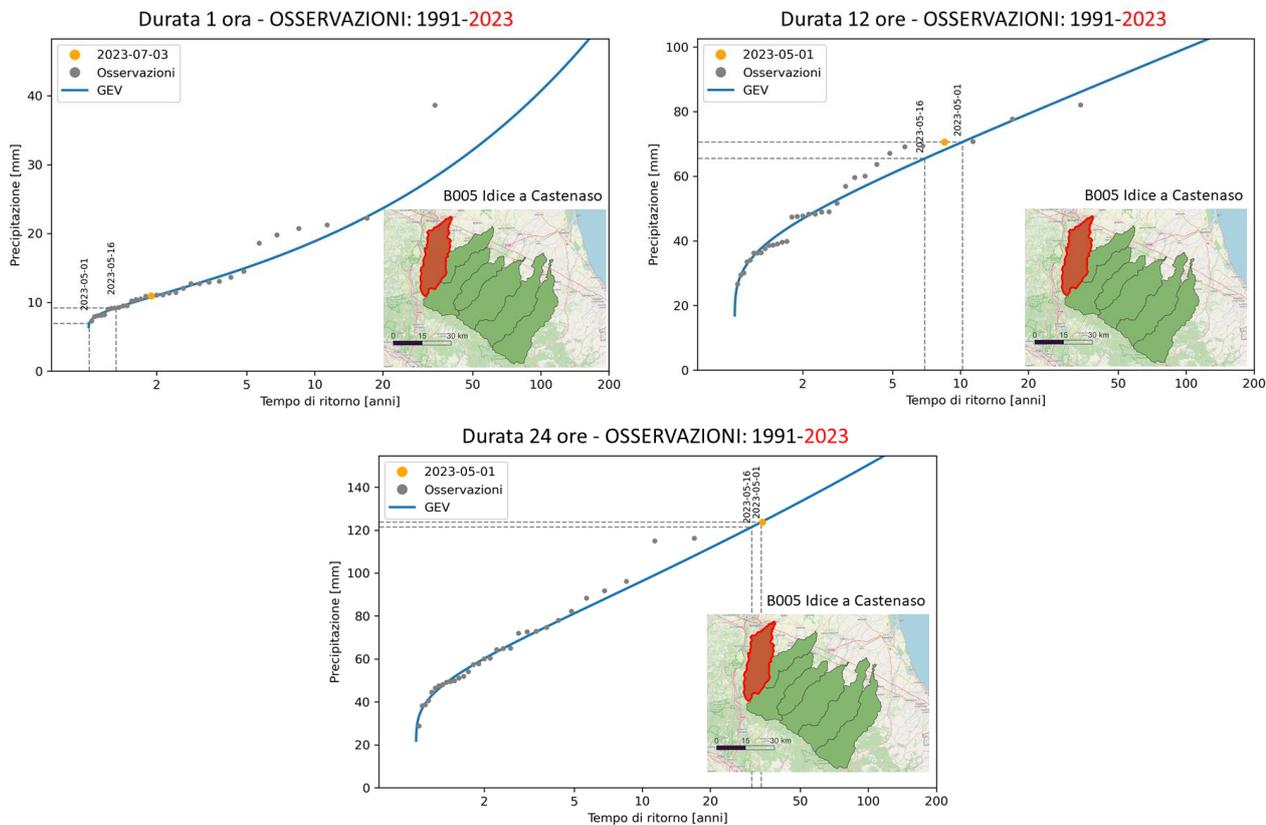


Figura 46 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino dell'Idice chiuso a Castenaso.

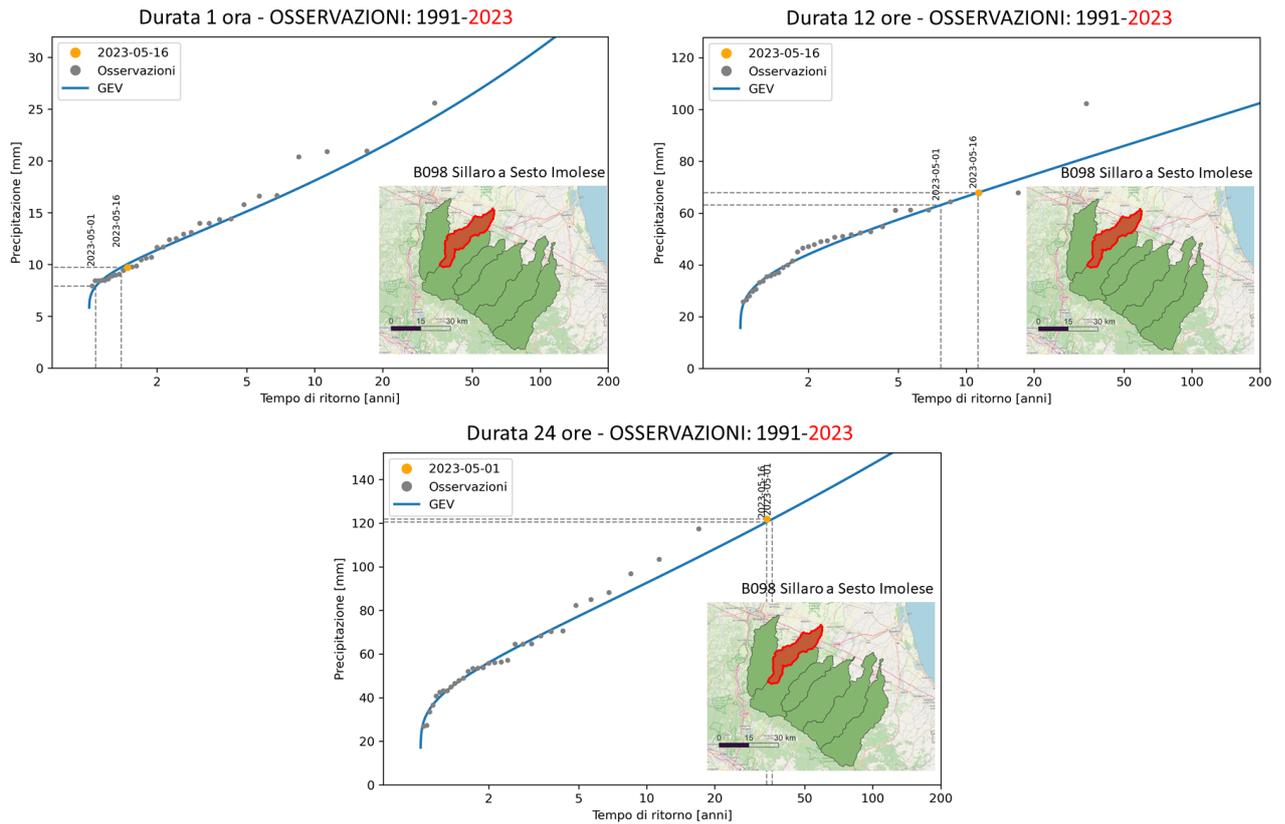


Figura 47 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese.

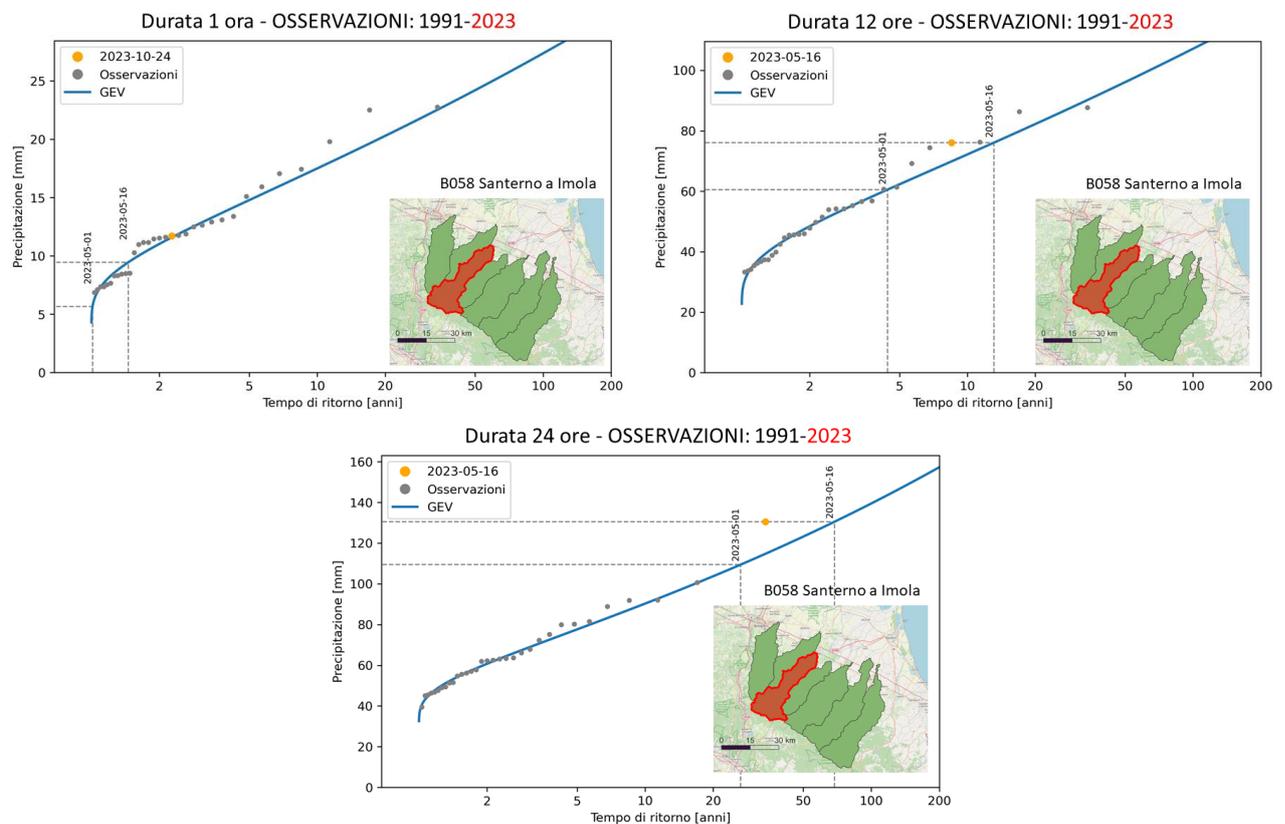


Figura 48 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Santerno chiuso a Imola.

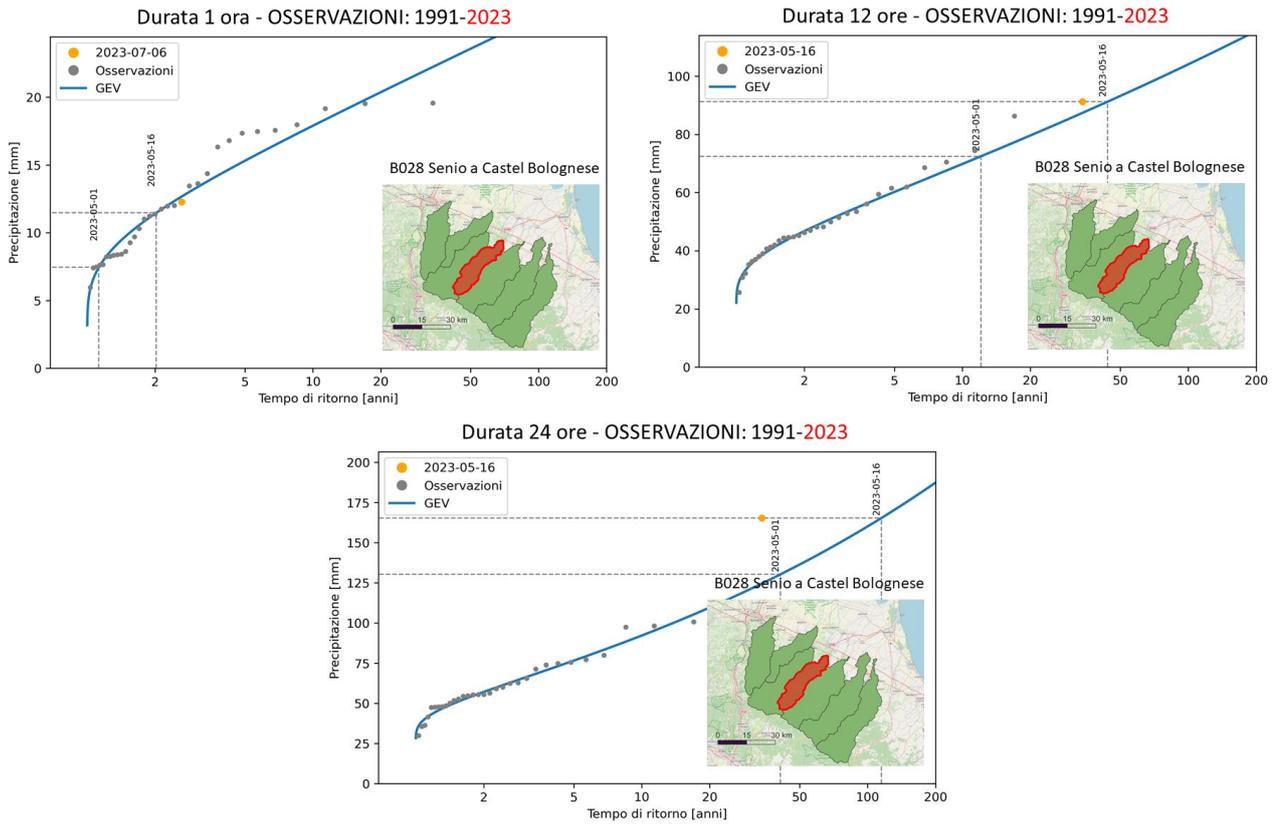


Figura 49 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Senio a chiuso a Castel Bolognese.

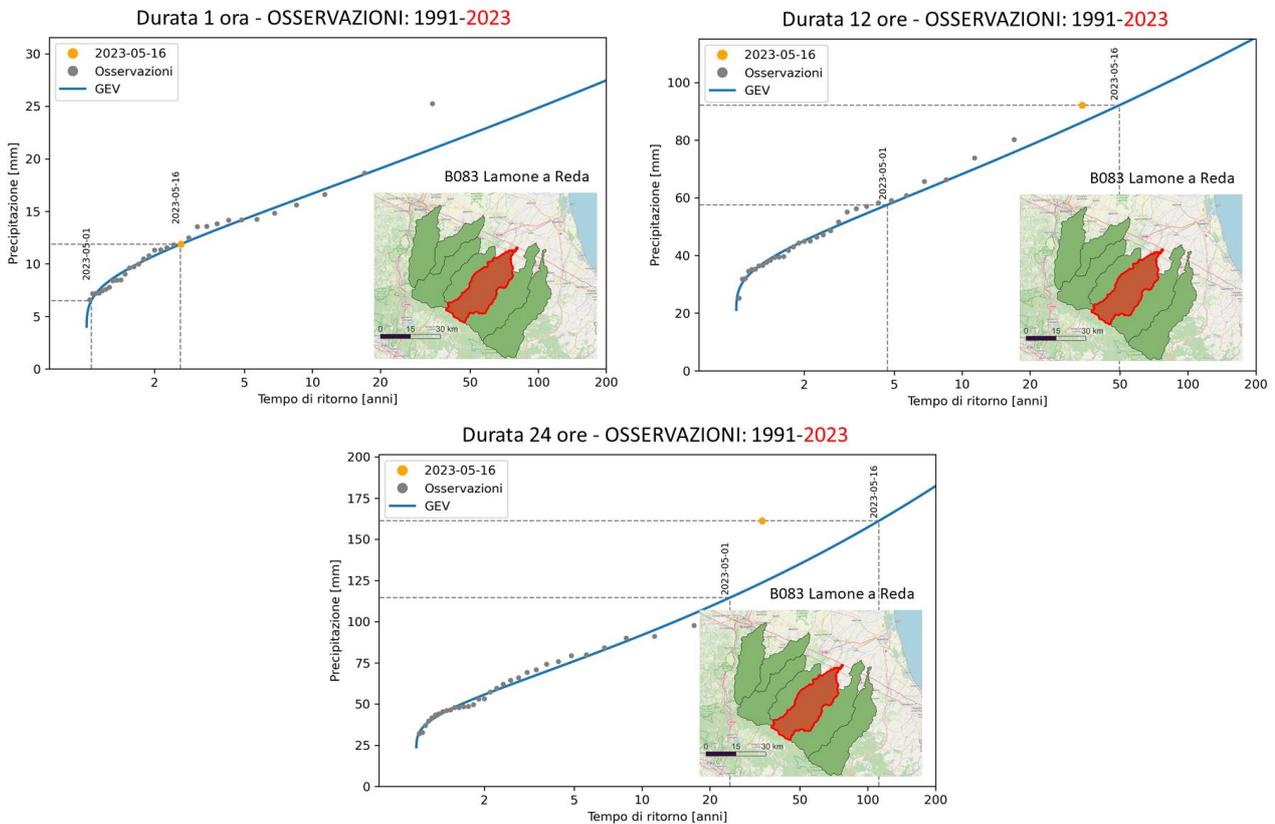


Figura 50 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Lamone chiuso a Reda.

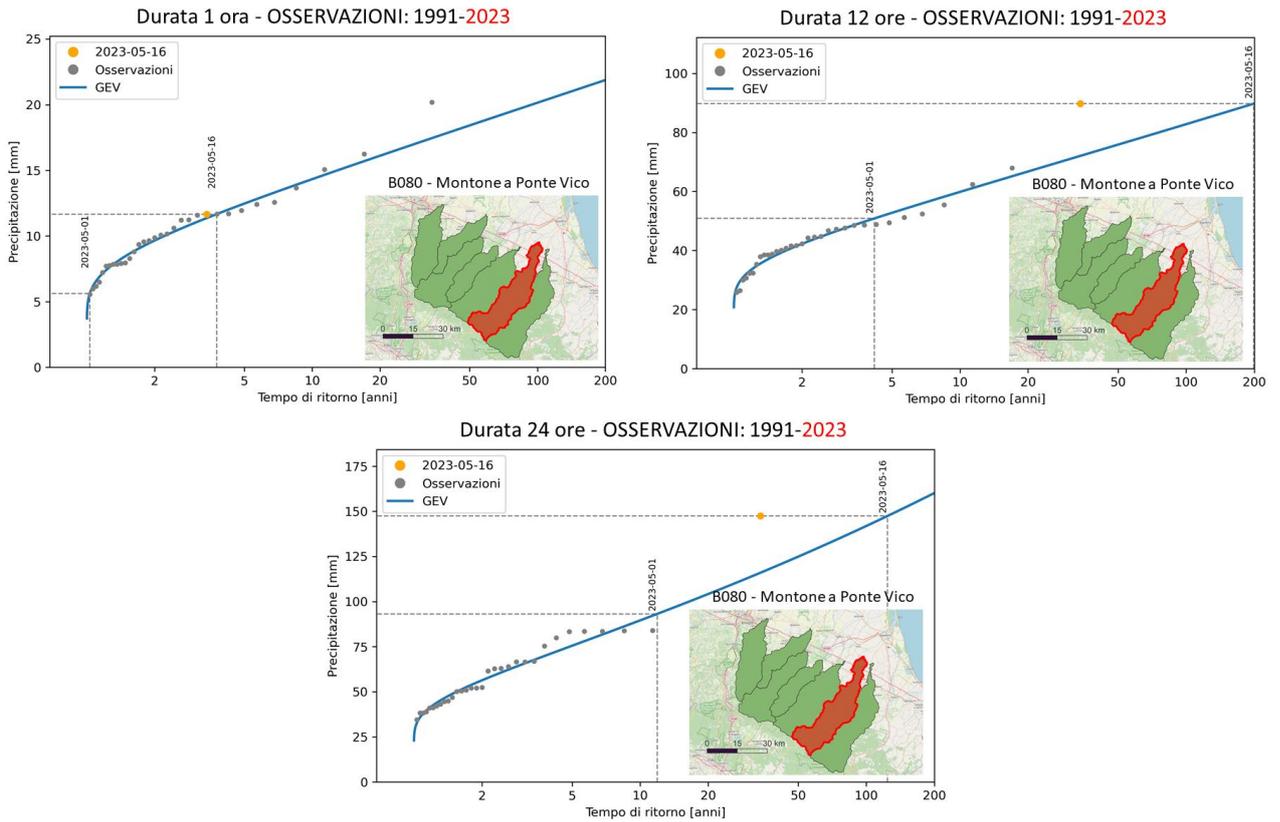


Figura 51 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Montone chiuso a Ponte Vico.

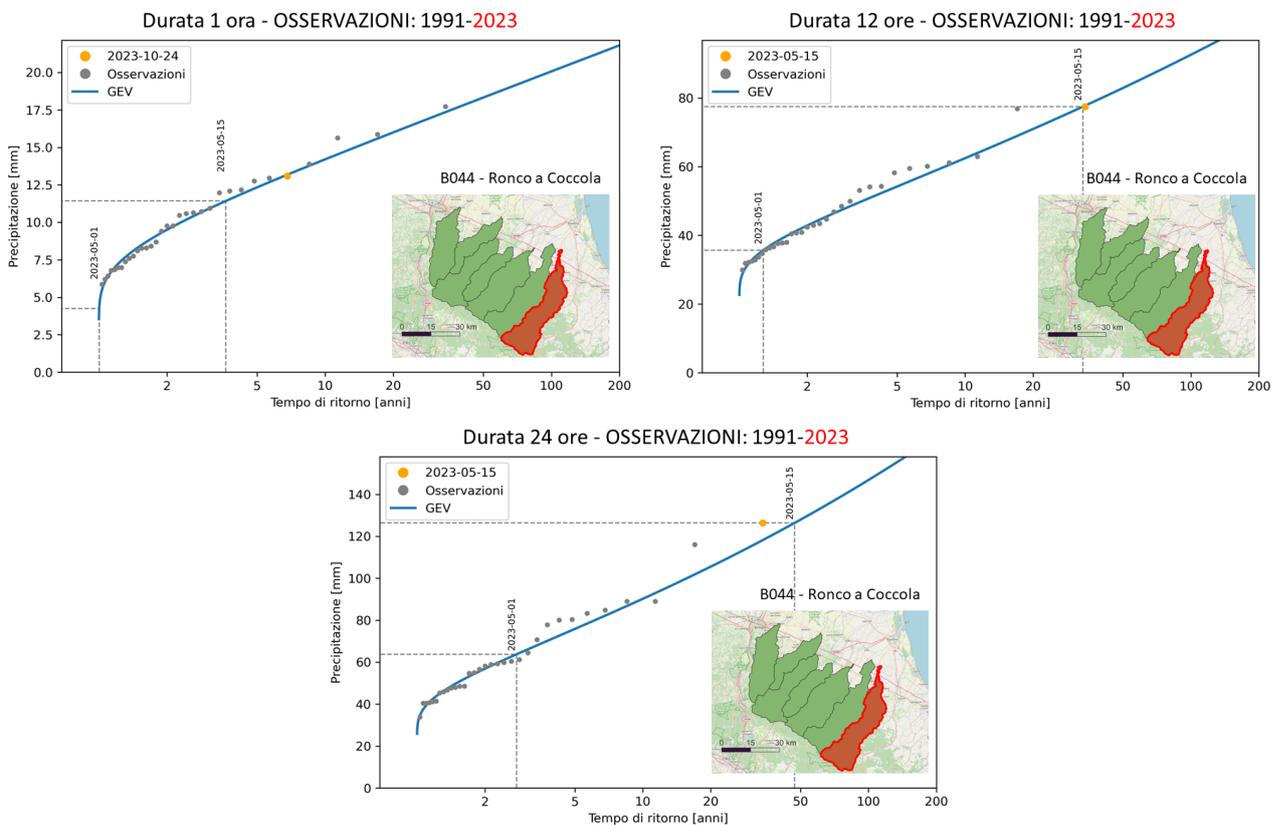


Figura 52 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali della pioggia per il periodo 1991-2023 e per durate di precipitazione di 1 ora, 12 ore e 24 ore nel bacino del Ronco chiuso a Coccola.

L'analisi ha riguardato tutti i 7 bacini oggetto dello studio; di seguito, nelle immagini da Figura 53 a Figura 60, si riportano solo i risultati che mostrano sensibili variazioni rispetto a quelli ottenuti utilizzando le osservazioni 1991-2023. Si tratta dei casi nei quali il tempo di ritorno stimato dell'evento risulta maggiore della durata della serie delle osservazioni e quindi la stima risulta fortemente dipendente dall'esclusione o inclusione nel campione dell'evento massimo storico del 2023.

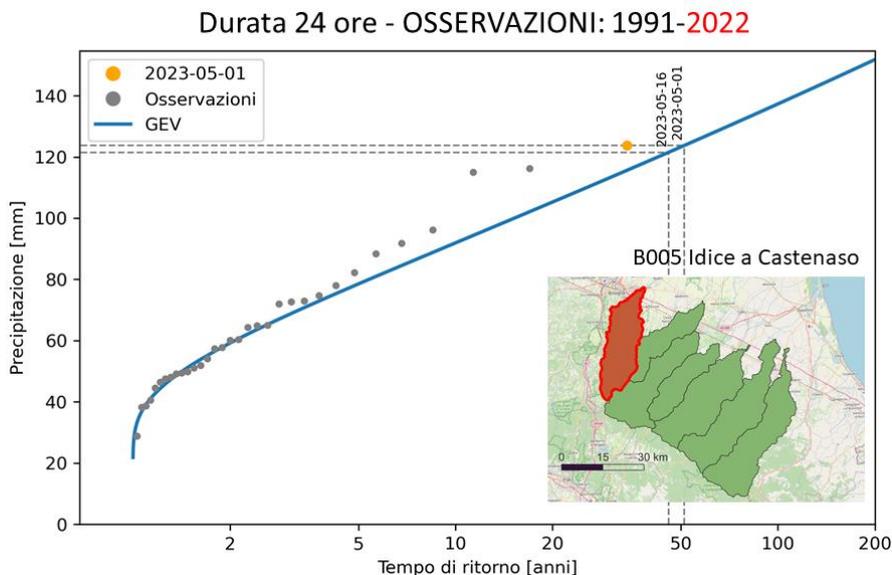


Figura 53 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino dell'Idice a Castenaso.

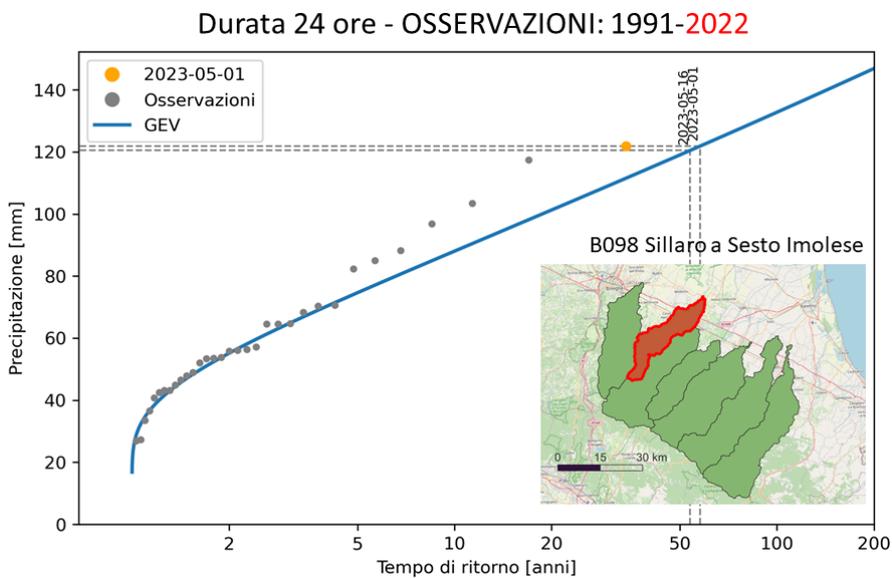


Figura 54 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Sillaro a Sesto Imolese.

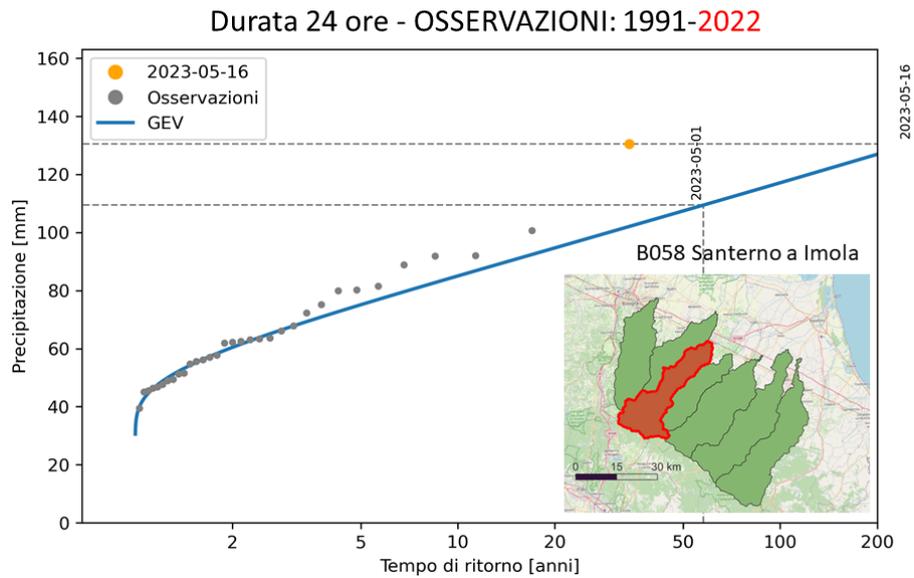


Figura 55 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Santerno a Imola.

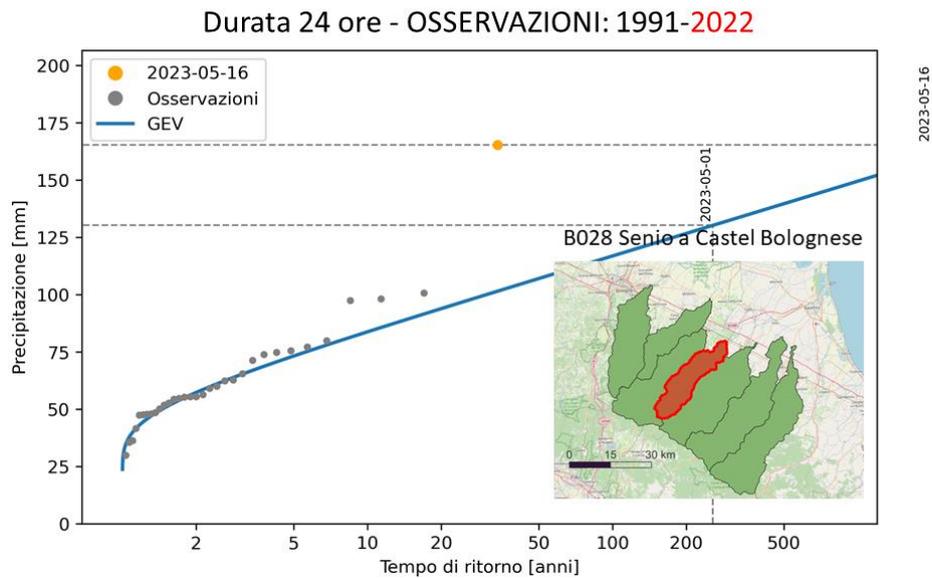


Figura 56 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Senio a Castel Bolognese.

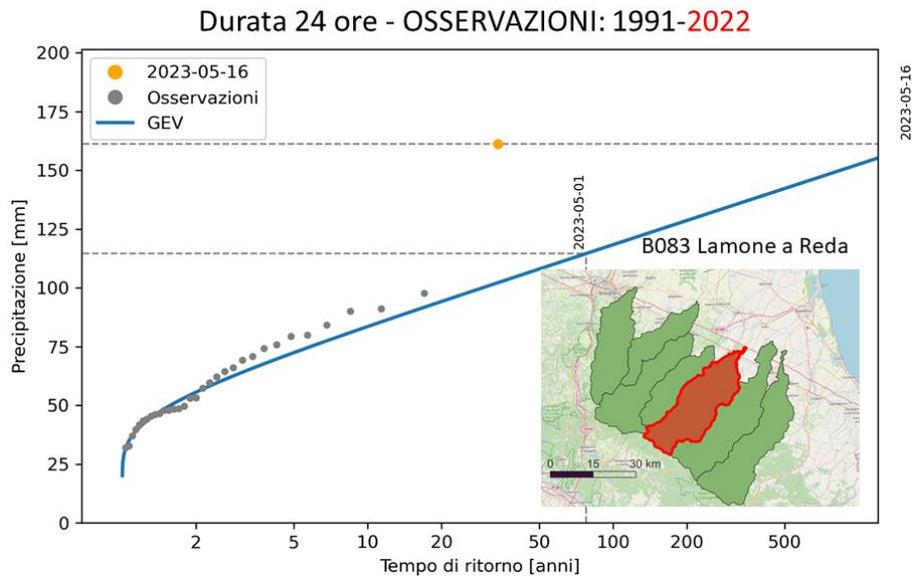


Figura 57 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Lamone a Reda.

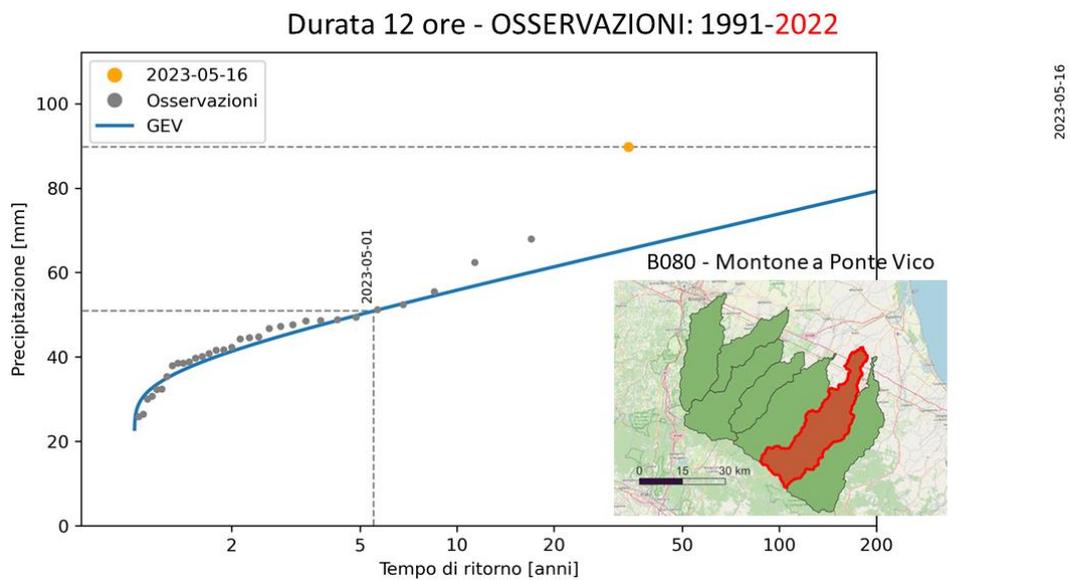


Figura 58 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 12 ore nel bacino del Montone a Ponte Vico.

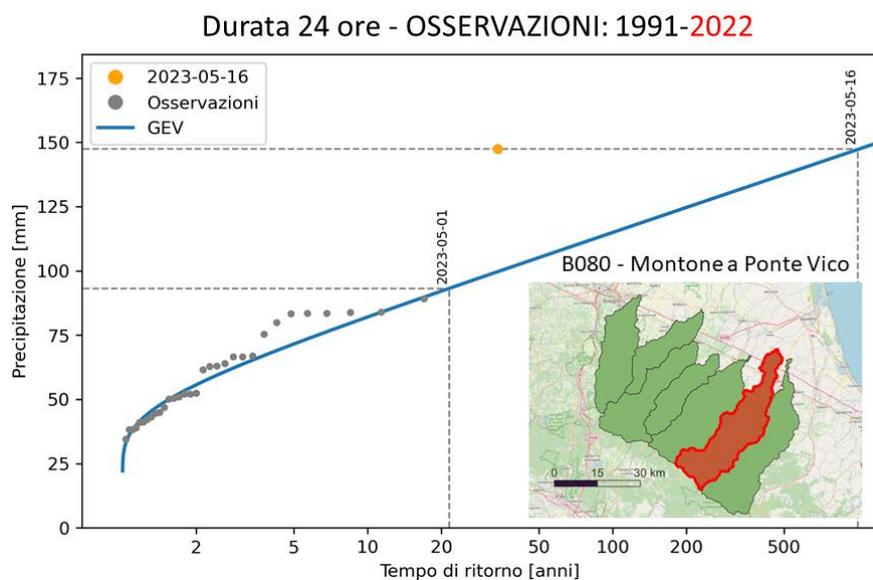


Figura 59 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Montone a Ponte Vico.

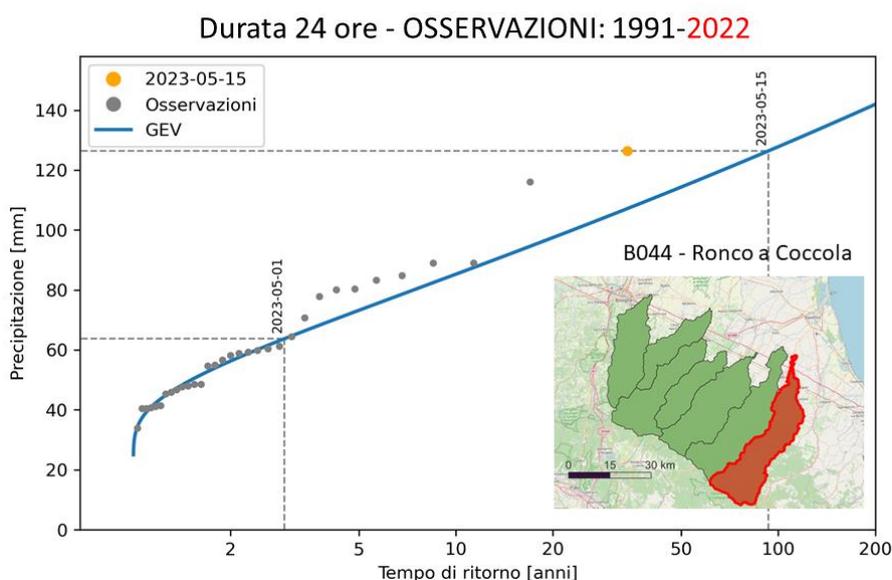


Figura 60 - Analisi della distribuzione di probabilità dei valori massimi annuali per il periodo 1991-2022 e per durate di precipitazione di 24 ore nel bacino del Ronco a Coccola.

Dalle figure precedenti, si osserva che la forte sensibilità alla presenza dell'evento del 2023 si ha per lo più alle scale di 24 ore, con la sola eccezione del Montone a Ponte Vico (v. Figura 58 e Figura 59), per il quale il tempo di ritorno stimato per l'evento del 16 Maggio 2023 dipende fortemente dall'inclusione/esclusione dello stesso dalla statistica anche per la durata di 12 ore, oltre che per quella di 24 ore. Questa variazione generalizzata alla scala delle 24 ore è l'ulteriore testimonianza di come l'evento sia stato maggiormente eccezionale per questa durata (e per durate superiori) rispetto alle durate più brevi. Si può in proposito rimarcare come, se si fosse avuto un evento di precipitazione di elevato tempo di ritorno a durate confrontabili con il tempo di risposta dei bacini (inferiore o uguale a 12 ore), le portate generate sarebbero state ancora superiori. Per il solo Montone, dunque, si può ritenere che l'evento con tempo di ritorno massimo sia probabilmente avvenuto per durate prossime alla durata critica di questo bacino.

La Tabella 8 riporta il confronto tra le stime dei tempi di ritorno dell'evento del maggio 2023 che si ottengono nel caso di inclusione o esclusione dell'evento stesso dal campione in base al quale è svolta la stima della distribuzione. Tale confronto, alla luce della sensibilità della stima dei tempi di ritorno dalla scelta del campione, indica come l'analisi più robusta debba essere ritenuta essere quella basata sui dati giornalieri illustrati in precedenza. Essi sono, infatti, pertinenti alle durate alle quali gli eventi del maggio 2023 risultano avere i maggiori tempi di ritorno, come evidenziato dall'analisi oraria. Inoltre, la possibilità di basare le stime giornalieri su un campione eccezionalmente lungo fornisce garanzie rispetto alla maggiore robustezza delle stime dei tempi di ritorno.

Tabella 8 – Stime del tempo di ritorno dei valori massimi di 24 ore delle altezze di pioggia medie areali dell'evento del maggio 2023 ottenute dalle osservazioni orarie includendo o escludendo l'evento stesso.

<i>Codice</i>	<i>Nome</i>	<i>Area (Kmq)</i>	<i>T con 2023 [anni]</i>	<i>T senza 2023 [anni]</i>
B005	Idice (Reno) a Castenaso	393.1	30	50
B098	Sillaro a Sesto Imolese	247.3	10	30
B058	Santerno a Imola	416.2	70	260
B028	Senio (Reno) a Castel Bolognese	262.5	115	>> 500
B083	Lamone a Reda	520.2	110	>> 500
B080	Montone a Ponte Vico	543.4	125	>> 500
B044	Ronco a Coccolia	549.6	50	95

3.5 Analisi dei dati idrometrici dell'evento

La valutazione degli idrogrammi di piena dell'evento, come in precedenza già accennato, risulta notevolmente complessa. Sono infatti numerosi i casi di esondazioni dai corsi d'acqua, che hanno determinato la sottrazione al deflusso naturale di piena di importanti volumi idrici. Per tale motivo il riferimento agli idrogrammi osservati è, nel caso della parte valliva dei corsi d'acqua, di scarso significato; essi, essendo influenzati dalle esondazioni, non possono considerarsi rappresentativi di quello che sarebbe stato l'effettivo andamento dell'onda di piena naturale in assenza di esondazioni.

Peraltro, la valutazione dei volumi esondati da ciascun corso d'acqua a partire dalla conoscenza dell'estensione e dei tiranti idrici degli allagamenti verificatisi sul territorio si presenta molto complessa, viste le complesse interazioni avvenute fra le esondazioni dei vari corsi d'acqua e gli importanti effetti esercitati dalla rete secondaria di scolo. Si ricorda che il volume complessivamente esondato è stato stimato in ben 350 milioni di mc. Rimarrebbe, come più percorribile alternativa, la possibilità di ricostruire l'andamento delle onde di piena ricorrendo alla modellistica afflussi-deflussi; tali elaborazioni erano fuori dalla finalità del mandato della presente Commissione ma meriterebbero certamente di essere fatte, pur nella consapevolezza delle inevitabili incertezze che tale approccio comporta.

Importanti elementi di conoscenza, aggiuntiva rispetto alle analisi condotte sulle piogge areali, si possono avere analizzando i pochi idrogrammi di piena registrati in sezioni per le quali si disponga della scala di deflusso e nelle quali il deflusso nel corso dell'evento si possa ritenere non influenzato, o al più solo debolmente influenzato, dalle esondazioni. Della difficoltà di individuare sezioni aventi tali caratteristiche ci si rende conto osservando con attenzione la Figura 61, nella quale è riportata l'ubicazione delle sezioni fluviali in corrispondenza delle quali si sono verificate esondazioni significative durante gli eventi dell'1-3 maggio

(rosso) e del 15-17 maggio 2023 (blue) e l'ubicazione delle stazioni di misura idrometrica dotate di scala di deflusso (triangoli verdi).

Fra tutte le sezioni per le quali era disponibile la scala delle portate (si è fatto riferimento alle scale del 2022, messe a disposizione da Arpae), escludendo quelle poste troppo a monte perché ritenute meno significative, si sono selezionate quelle di Casola Val Senio sul Senio, che sottende un bacino di area $S=136$ Km², e quella di Castrocaro sul Montone, con bacino sotteso pari a 237 km². Per quest'ultima sezione, si è in realtà avuta un'esondazione poco a valle, ma, da quanto risulta dalla reportistica consultata, con fuoriuscita d'acqua relativamente contenuta rispetto alle altre esondazioni occorse.

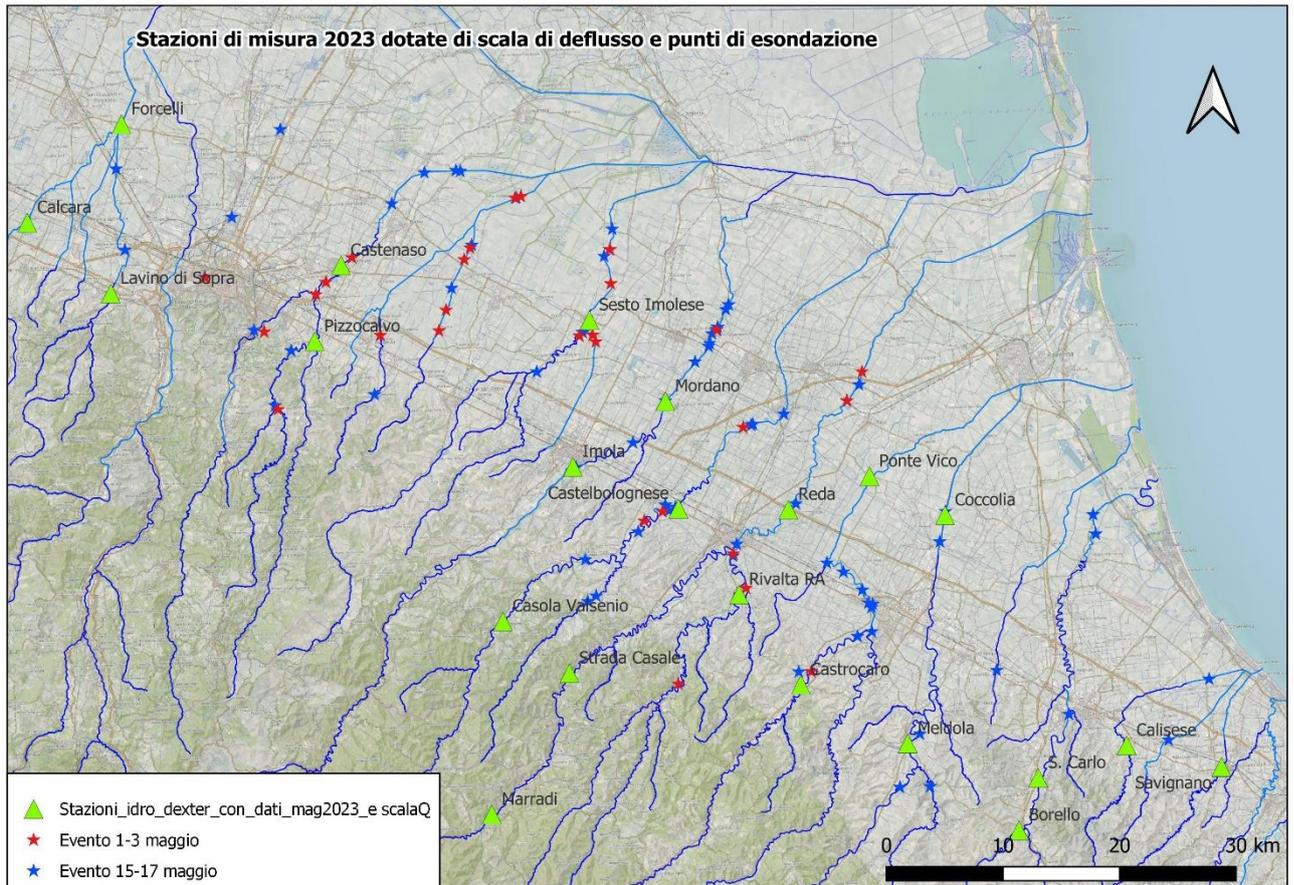


Figura 61 - Ubicazione delle sezioni fluviali in corrispondenza delle quali si sono verificate esondazioni durante gli eventi dell'1-3 maggio (rosso) e del 15-17 maggio 2023 (blue); ubicazione delle stazioni di misura idrometrica dotate di scala di deflusso (triangoli verdi).

Nella Figura 62, che si riferisce al Senio chiuso a Casola Val Senio, è riportato lo ietogramma a scala oraria della pioggia media areale sul bacino sotteso, valutato attraverso una media pesata degli ietogrammi orari registrati nelle stazioni presenti nel bacino e nelle immediate vicinanze, nonché l'idrogramma di portata nella sezione di chiusura del bacino. La Figura 63 fornisce le analoghe informazioni per il Montone a Castrocaro.

Per i due bacini sono stati calcolati i valori dell'altezza di pioggia media areale complessivamente caduta nel primo (1-3 maggio) e nel secondo evento (15-17 maggio) meteorico del maggio 2023, utilizzando le osservazioni delle piogge puntuali disponibili; da queste ultime è stato valutato il valore del volume di pioggia piovuto. Le relative informazioni sono riportate nella Tabella 9. Dagli idrogrammi sono stati invece valutati i volumi di piena defluiti, estendendo convenientemente gli intervalli temporali utilizzati per la valutazione di detti volumi (1-5 maggio e 15-19 maggio). Infine, per ognuno dei due eventi, è stato calcolato il coefficiente di deflusso, definito come il rapporto tra il volume defluito e quello piovuto nell'evento.

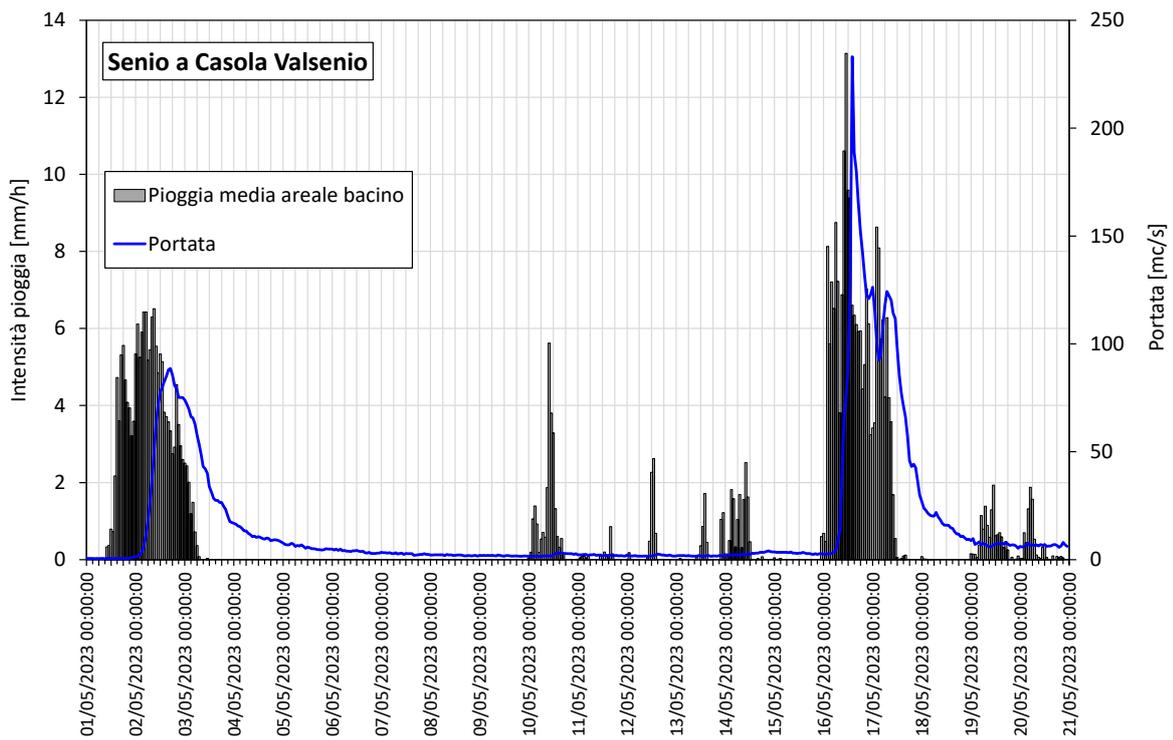


Figura 62 – Fiume Senio chiuso a Casola Val Senio; ietogramma a scala oraria della pioggia media areale caduta sul bacino sotteso dalla sezione di chiusura del bacino e idrogramma di portata, a scala oraria, in tale sezione.

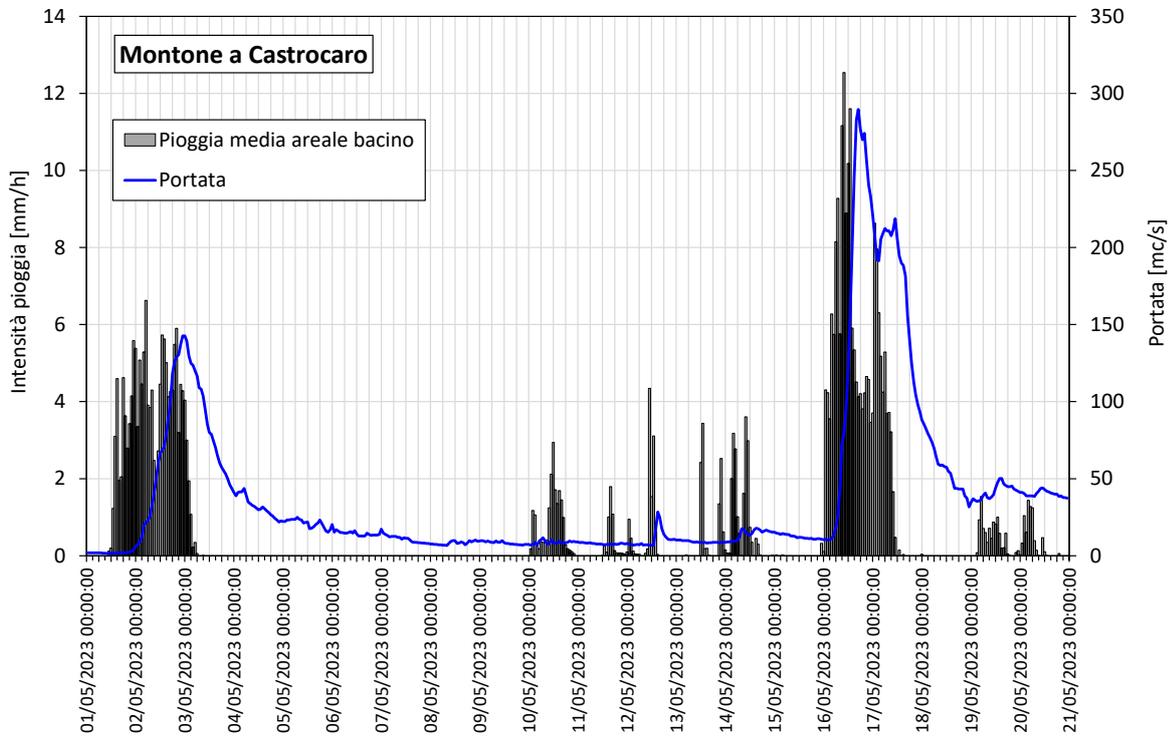


Figura 63 - Fiume Montone chiuso a Castrocaro; ietogramma a scala oraria della pioggia media areale caduta sul bacino sotteso dalla sezione di chiusura del bacino e idrogramma di portata, a scala oraria, in tale sezione.

I valori dei volumi di piena e dei coefficienti di deflusso sono riportati anch'essi nella Tabella 9.

Tabella 9 – Grandezze idrologiche caratteristiche dei due eventi di piena del maggio 2023 per il Senio a Casola Val Senio e per il Montone a Castrocaro.

<i>Grandezza</i>	<i>Senio a Casola Val Senio</i>	<i>Montone a Castrocaro</i>
<i>Primo evento del maggio 2023</i>		
Pioggia 1-3 maggio [mm]	167.41	154.19
W pioggia 1-3 maggio [Mmc]	22.77	36.47
W Deflusso 1-5 maggio [Mmc]	9.70	18.12
Coefficiente di deflusso 1° evento	0.42	0.50
<i>Secondo evento del maggio 2023</i>		
Pioggia 15-17 maggio [mm]	211.94	201.25
W pioggia 15-17 maggio [Mmc]	28.83	47.60
W Deflusso 15-19 maggio [Mmc]	16.89	36.86
Coefficiente di deflusso 2° evento	0.59	0.77

Dalla Tabella 9 si può constatare il netto incremento che si ha per il coefficiente di deflusso passando dal primo al secondo evento di piena; nel caso del Senio a Casola Val Senio il coefficiente di deflusso passa da 0.42 nel primo evento di pioggia a 0.59 nel secondo, con un incremento del 40% circa; ciò sta ad indicare che, a parità di volume piovuto, il volume defluito si incrementa di circa il 40% passando dal primo al secondo evento. Nel caso del Montone a Castrocaro, il coefficiente di deflusso del primo evento è pari a 0.50 mentre quello del secondo evento è pari a 0.77; l'incremento del coefficiente di deflusso tra il primo e il secondo evento è in questo caso pari al 54% circa. Il valore assunto dal coefficiente di deflusso nel secondo evento è da ritenersi estremamente elevato per un bacino extraurbano e semmai più prossimo a valori tipici di bacini urbani.

Nel complesso, dall'analisi effettuata, risulta del tutto evidente l'effetto amplificativo dovuto al succedersi in rapida cadenza temporale dei due eventi meteorici intensi. Il secondo evento di pioggia ha insistito su un bacino nel quale i terreni erano già notevolmente saturati per effetto delle piogge dell'evento precedente, producendo così, a causa di tale circostanza, effetti al suolo notevolmente amplificati.

4 Caratterizzazione dei movimenti gravitativi di versante

Il lavoro, estremamente accurato, di riconoscimento e mappatura degli eventi franosi verificatisi a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023, effettuato dalla Regione Emilia-Romagna, ha permesso di cartografare le frane a scala di elevato dettaglio (fino a 1:1000), con una copertura che probabilmente supera il 90% del totale dei fenomeni franosi avvenuti.

La mappatura è stata realizzata dalla Regione Emilia-Romagna (Direzione Generale Cura del territorio e dell'ambiente, Settore Difesa del Territorio e AGREA - Agenzia Regionale per le erogazioni in agricoltura) mediante il sistematico censimento attraverso l'interpretazione di foto aeree, di immagini satellitari del Programma Copernicus e indagini di campo localizzate.

Si riportano di seguito indicazioni sulle immagini usate per la mappatura dei dissesti:

Pre-evento:

- ortofoto AGEA 2020, link: https://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/AGEA2020_rgb
- ortofoto AGEA 2022 copertura parziale, link: https://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/RER2022_rgb

Post-evento:

- ortofoto RGBI 20 cm/px, prodotte a supporto delle diverse attività inerenti all'emergenza alluvionale del maggio 2023, derivate da fotogrammi da riprese aeree dell'AGEA, realizzate da CGR S.p.A. Le date di ripresa sono relative al periodo maggio - luglio 2023. Sono stati utilizzati servizi di visualizzazione in RGB (colori naturali), in NIR (Infrarosso vicino) ed elaborazioni NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*);
- foto aeree ad alta risoluzione acquisite dalla Guardia di Finanza (GdF) dopo il 17 maggio 2023 per il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, con copertura parziale prevalentemente sulle zone collinari tra i Comuni di Bologna e Imola;
- immagini satellitari Sentinel-2 (Programma europeo Copernicus di Osservazione della Terra), utilizzate con post-elaborazione al fine di rilevare il *Change NDVI*, come indicazione e guida per individuare le aree colpite e poi procedere alla rilevazione puntuale delle aree franate.

La sequenza ordinaria di azioni per mappare le aree in frana è stata la seguente:

1. individuazione delle aree colpite tramite *Change NDVI* su immagini Sentinel-2 a 10 m di risoluzione;
2. fotointerpretazione a scala nominale 1:2000 delle aree interessate da frane tramite utilizzo delle ortofoto CGR in via prioritaria e GdF in via secondaria;
3. sono state mappate solo le frane interessate da attivazioni nel maggio 2023, escludendo tutte le altre aree, comprese le aree evidentemente in frana ma già presenti nelle immagini precedenti.

La fotointerpretazione, in ambiente GIS, si è avvalsa del confronto continuo con le immagini più recenti disponibili precedenti agli eventi (CGR 2020 in linea generale).

Tale metodologia è stata integrata localmente con informazioni ricavate da rilievi *in situ* svolti da tecnici della Regione e dei Centri di Competenza del Dipartimento della Protezione Civile, anche mediante rilievi fotogrammetrici e scansioni laser di dettaglio con droni.

La mappatura che mostra la distribuzione spaziale delle frane avvenute a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023 in Emilia-Romagna è illustrata in Figura 64. Ciascun poligono prodotto racchiude l'intera area in frana dal ciglio di distacco alla parte terminale del deposito.

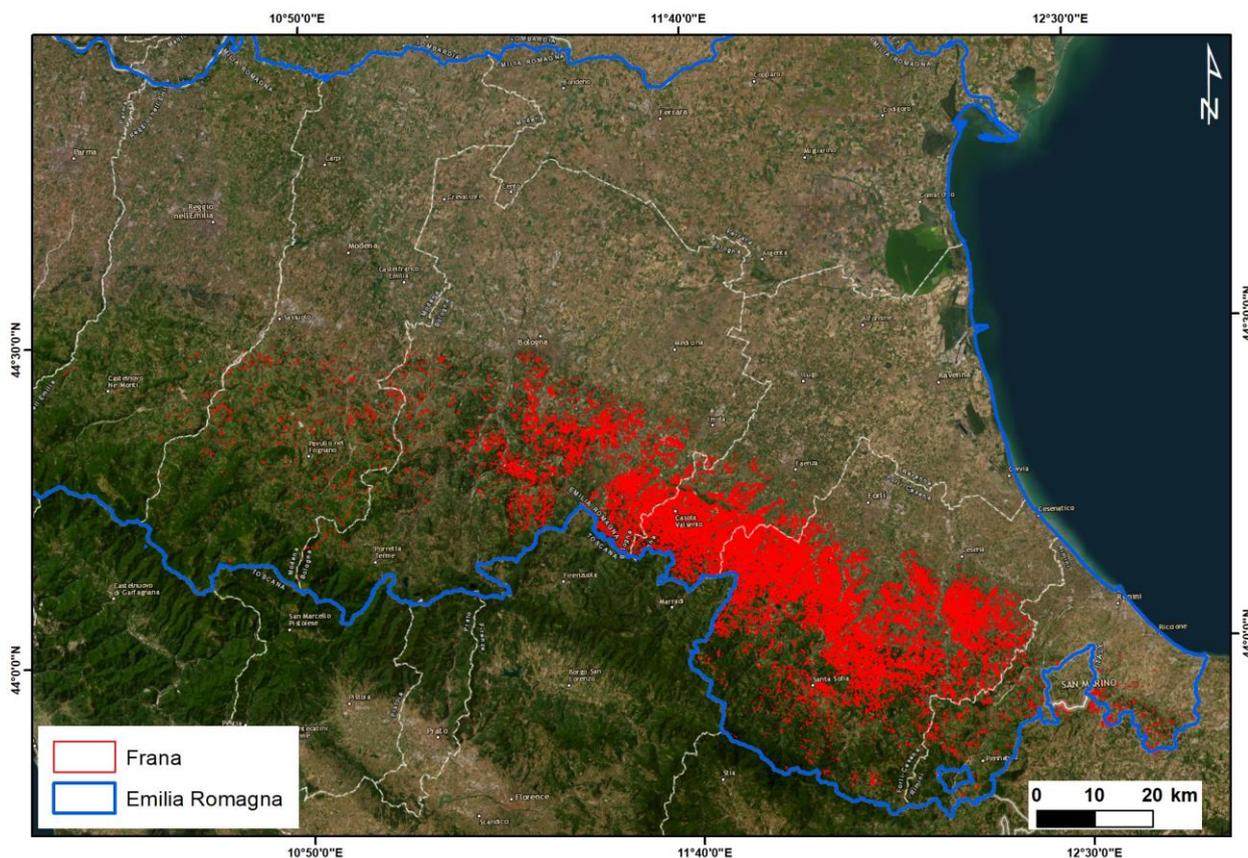


Figura 64 – Distribuzione delle frane censite sulla Regione Emilia-Romagna (Fonte: Regione Emilia-Romagna). Nota: la mappa non comprende le frane nelle Regioni Toscana e Marche.

4.1 Tipologie di frana

Nell'area di interesse sono state riconosciute diverse tipologie di dissesti: movimenti di massa e trasporto in massa, questi ultimi rappresentati da colate di detrito non incanalate e incanalate.

In linea di massima si possono individuare le seguenti tre principali tipologie:

- **scivolamenti rapidi in terra o detrito**, di dimensioni medio-piccole, avvenuti su versanti ripidi, generalmente boscati, e sulle scarpate stradali;
- **colate in terra o detrito (canalizzate o non canalizzate)** di dimensioni molto variabili (da piccole a grandi) avvenuti su versanti ripidi e con spessore della coltre interessata limitato a decimetri o pochi metri; in molti casi i fenomeni di colata di terra o detrito sono stati canalizzati in alvei del reticolo minore e si sono sviluppati per lunghezze da decine a centinaia di metri; il materiale trasportato, costituito da fango, detriti e legname asportato dai versanti, ha causato notevolissimi danni a vie di comunicazioni e a edifici;
- **scivolamenti in roccia su piano di strato** avvenuti su versanti, generalmente poco inclinati a franapoggio, che hanno coinvolto aree anche molto estese (> 1 ha e in vari casi > 10 ha).

Queste tre tipologie di frana sono state le più rappresentate e sono state caratterizzate da movimento rapido e molto rapido. Sono inoltre avvenuti scivolamenti più profondi, sia rotazionali che traslativi, alcuni fenomeni di crollo, e frane complesse, ovvero fenomeni misti costituiti da tipologie concomitanti.

Le tipologie di movimento dominanti risultano essere gli scivolamenti, in accordo con le caratteristiche litologiche e litotecniche del territorio appenninico, dominato da alternanze tra rocce lapidee (arenarie e calcareniti in prevalenza) e peliti o peliti marnose, conseguenti all'origine torbidaica di gran parte delle unità geologiche dell'Appennino settentrionale.

Le colate di fango, di terra o detrito sono la seconda tipologia in ordine di quantità e si impostano sulle litologie prevalentemente argillose, affioranti nella parte medio-bassa dell'Appennino emiliano (prevalentemente appartenenti ai Domini liguri e subliguri) e nella bassa collina romagnola (successione neogenico-quadernaria del margine padano).

Gli scivolamenti in roccia e le frane complesse si sono impostate in corrispondenza dei Flysch liguri, caratterizzati da numerose e grandi frane profonde, impostate su alternanze arenitico-pelitiche frequentemente fratturate e favorevoli allo sviluppo di frane costituite da associazione tra scivolamento rotazionale (nella area prossima al coronamento) e colamento.

Si evidenzia che nella mappatura non sono stati perimetrati/classificati i fenomeni di tipo erosivo, né diffuso né incanalato.

Si elencano di seguito tutte le tipologie di frana (identificate con le sigle A-B-C-F-R-SCST-SCSTI-CMPL-CR-INC) che sono state individuate e censite nel database dalla Regione Emilia-Romagna, riportando il modello interpretativo schematizzato, una breve descrizione e una documentazione fotografica di esempio.

4.1.1 Scorrimenti rapidi di terra e/o detrito (tipologia A)

Si tratta di scorrimenti superficiali di detrito, costituito in prevalenza da sabbie, limi e dalla coltre superficiale di suolo, comprensiva della vegetazione, a volte con parziale evoluzione in colata se la topografia lo consente. Formano superfici di denudamento generalmente planari (Figura 65).

A differenza di uno scorrimento classico, il deposito di frana non trasla in blocco ma "fluisce" lungo il versante passando tra la vegetazione e crea accumuli al piede di materiale completamente rimaneggiato.

Le frane di questa tipologia interessano versanti ripidi e acclivi, comuni sulle sponde dei corsi d'acqua o a monte di carreggiate stradali.

Presentano caratteristiche intermedie tra scorrimenti e flussi. In letteratura sono stati chiamate *flow slides*, *debris avalanches*, *soil avalanches*, *debris slides*.

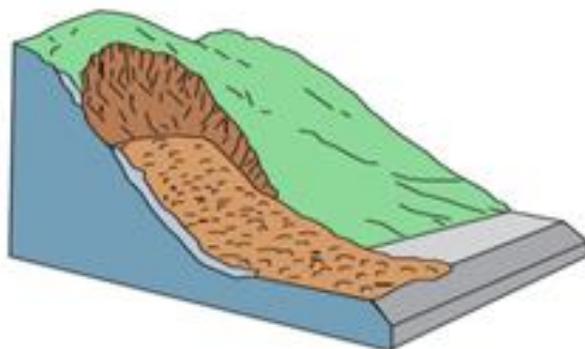


Figura 65 – Schema di scorrimento rapido di terra e/o detrito (debris avalanche o soil avalanche).

La velocità del movimento può essere elevata fino a metri/secondo e il loro sviluppo sul versante è generalmente limitato (da pochi m a circa 20/30 m) anche se può localmente essere più esteso. Tendono ad avere un rapporto L/W (Lunghezza/Larghezza) prossimo o leggermente superiore all'unità.

Queste frane creano spesso estese superfici denudate. In quelle più grandi è evidente la presenza di zone di innesco multiple, ma sono presenti anche come fenomeni singoli.

Le aree cartografate comprendono l'intero fenomeno franoso, dal coronamento al piede, compresa l'eventuale zona di scorrimento senza deposito. Il poligono mappato può comprendere anche la vegetazione sotto la quale si presume ci sia deposito di frana, anche se non visibile. In caso di frane coalescenti, a volte è stata effettuata una divisione sulla base della morfologia e delle scarpate di distacco.

Possono assumere caratteristiche morfologiche tendenti a quelle di B e C descritte nel seguito, essendo possibile una progressiva evoluzione delle stesse in tali altre tipologie. In questa categoria sono stati mappati i fenomeni che non hanno sviluppato meccanismo di colata in modo prevalente rispetto allo scorrimento.

Nella Figura 66 sono illustrati scorrimenti sempre più evoluti verso forme di colata di tipo B e C descritte di seguito.

Questi scorrimenti in terra di dimensioni medio-piccole su versanti ripidi, anche generalmente boscati, hanno spesso impattato le strade a mezza costa (Figura 67).



Figura 66 - Foto con esempi di scorrimenti rapidi di terra o detrito avvenuti a maggio 2023. Fonte: Regione Emilia-Romagna.

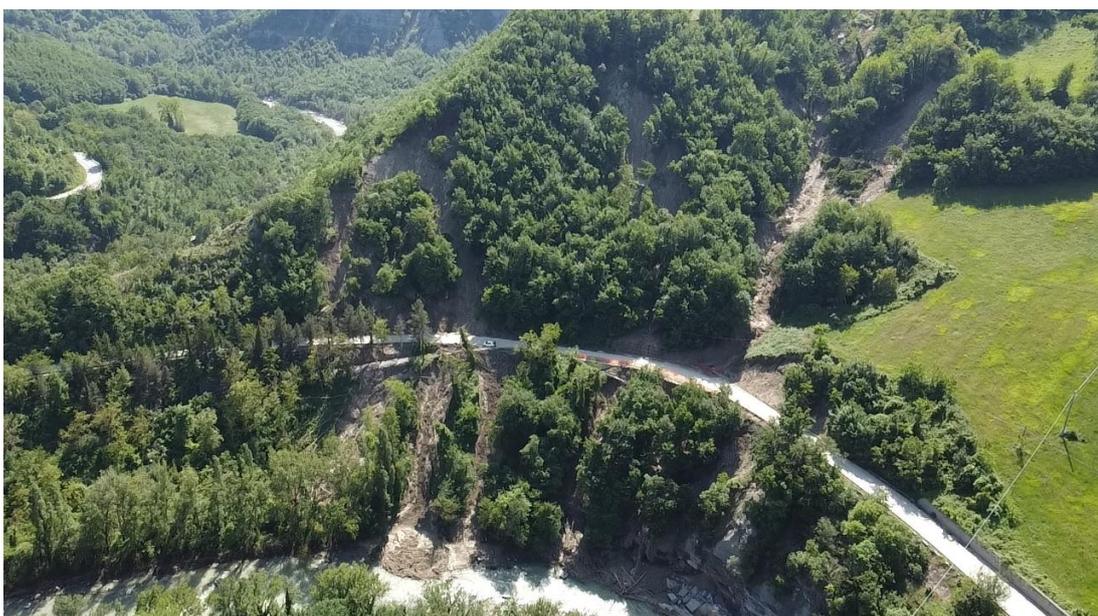


Figura 67 - Scorrimenti in terra che hanno interessato la SP 610 (BO), il cui accumulo è stato parzialmente rimosso dalla sede stradale. Fonte: Regione Emilia-Romagna.

4.1.2 Colate di detrito non canalizzate (tipologia B)

Si tratta di colate superficiali caratterizzate da flusso su versante planare. Nella letteratura scientifica sono denominate *unchannelized debris flows*. Il deposito non ha quasi mai una forma lobata e il tratto di flusso è rettilineo e di larghezza quasi costante. Il materiale coinvolto, analogamente alle frane di tipologia A è costituito in prevalenza da sabbie, limi e dalla coltre superficiale di suolo, comprensiva della vegetazione. Spesso si trova una zolla di vegetazione al piede della colata. La zona di innesco è tipicamente singola (Figura 68).

La velocità del movimento è stata verosimilmente elevata, fino a metri/secondo e il loro sviluppo sul versante è variabile da poche decine a qualche centinaio di metri, in particolare su campi a seminativo o frutteto, ove l'attrito del terreno o della vegetazione è più esiguo. Il rapporto L/W è quindi molto maggiore di 1.

Quando sono poco allungate possono essere state classificate come A, di cui possono essere considerate una possibile evoluzione in caso di versanti maggiormente sviluppati. Sono inoltre simili a C, con le quali condividono materiali e meccanismo, differendo da esse essenzialmente per la morfologia del versante nel quale si sono sviluppate o propagate.

Le aree cartografate comprendono l'intero fenomeno franoso, dal coronamento al piede, compresa l'eventuale zona di scorrimento senza deposito.

Nelle immagini seguenti di Figura 69 sono illustrate colate sempre più evolute a partire dalla prima, di transizione con le frane di tipo A.

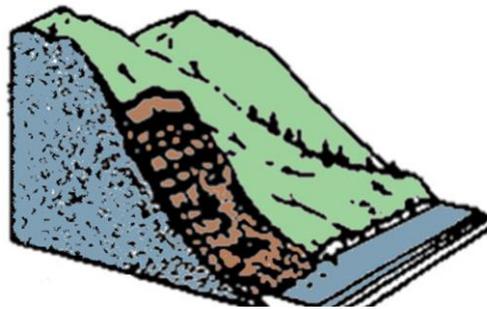


Figura 68 - Schema di colata di detrito non canalizzata (*unchannelized debris flow*)



Figura 69 - Foto con esempi di colate di detrito non canalizzate avvenuti a maggio 2023. Fonte: Regione Emilia-Romagna.

4.1.3 Colate di detrito canalizzate (tipologia C)

Si tratta di fenomeni di trasporto in massa, noti in letteratura scientifica come *channeled debris flows*. Sono simili a B, con le quali condividono il materiale coinvolto, costituito in prevalenza da sabbie, limi e dalla coltre superficiale di suolo comprensiva della vegetazione, e il meccanismo evolutivo, differendo da esse essenzialmente per la morfologia del versante nel quale si sono sviluppate che in questo caso si presenta caratterizzata dalla presenza di linee di impluvio lungo le quali le colate si sono incanalate e propagate.

La forma tende maggiormente a essere quella tipica delle colate di detrito, con un'area sorgente a catino, un canale relativamente stretto e, eventualmente, una zona di deposito lobata. A volte è presente un canale prodotto dal flusso stesso per mobilitazione di depositi presenti lungo il percorso (Figura 70).

La velocità del movimento è elevata, verosimilmente fino a metri/secondo e il loro sviluppo sul versante può essere esteso per centinaia di metri, in particolare quando il materiale detritico si è innestato in un rio, seguendone il corso. Pertanto, il rapporto L/W è molto maggiore di 1 e in alcuni casi maggiore di 10.

Nella zona sorgente alcune delle frane che hanno contribuito ad alimentare la colata possono essere classificate singolarmente come A, di cui le C possono essere considerate una evoluzione possibile in caso in cui il materiale si mobilizzi ulteriormente lungo un impluvio.

Le aree cartografate comprendono l'intero fenomeno franoso, dal coronamento al piede, compresa l'eventuale zona di scorrimento senza deposito (Figura 71).

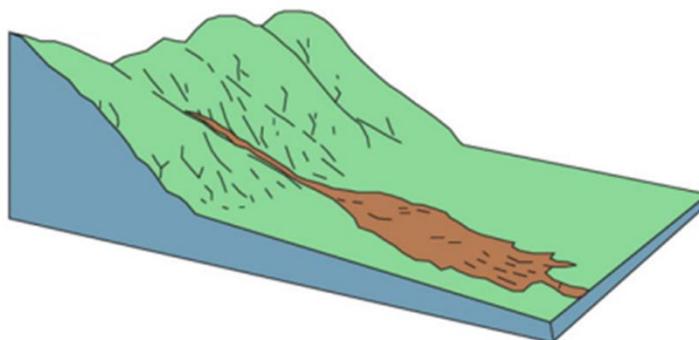


Figura 70 - Schema di colata di detrito canalizzata (*channelized debris flow*)



Figura 71 - Foto di esempi di colata di detrito canalizzate. Fonte: Regione Emilia-Romagna

4.1.4 Colate di terra e/o fango (tipologia F)

Sono in tutto simili alle Colate detritiche di tipo C da un punto di vista morfologico, ma differiscono per il materiale coinvolto, costituito esclusivamente da argilla o limo, e per il meccanismo di movimento, tipico dei terreni coesivi. Nella letteratura scientifica sono denominate *earth flows* o *mud flows*.

Sono tipicamente sviluppate lungo calanchi argillosi nelle formazioni litologicamente omogenee quali le Argille Azzurre del Pliocene e parte della Formazione a Colombacci del Messiniano (Figura 72). La forma è quella tipica delle colate, con un'area sorgente a catino, un canale relativamente stretto, e una zona di deposito lobata.

La velocità del movimento si ritiene sia stata da moderata a rapida (da alcuni metri al mese fino a pochi metri al minuto). Lo sviluppo sul versante si è esteso fino a lunghezze di centinaia di metri, in particolare quando il materiale detritico si è innestato in un rio, seguendone il corso. Anche in questo caso il rapporto L/W è molto maggiore di 1.

Le aree cartografate comprendono l'intero fenomeno franoso, dal coronamento al piede, compresa l'eventuale zona di scorrimento senza deposito (Figura 73).



Figura 72 - Foto di colata di terra sviluppata lungo un versante calanchivo. Fonte: Regione Emilia-Romagna.



Figura 73 - Esempio di colate in terra presso Roncofreddo (FC). Sono visibili decine di punti di innesco, tra il versante in primo piano e quelli in secondo. Fonte: Regione Emilia-Romagna

4.1.5 Scorrimenti traslativi e/o rotazionali (tipologia R)

Si tratta di scivolamenti traslativi e/o rotazionali in terra o detrito, in cui il deposito non si è fluidificato ed è rimasto essenzialmente integro, anche se sono possibili ovviamente anche transizioni con vere e proprie colate di terra, fango o detrito (Figura 74, Figura 75).

Queste tipologie di frane sono denominate nella letteratura scientifica come *earth/debris slides* oppure *earth/debris slumps*.

Sono di solito frane di dimensioni piuttosto grandi, spesso evidenziate da fratture perimetrali. Il rapporto L/W varia da minore di 1 a leggermente maggiore di 1.

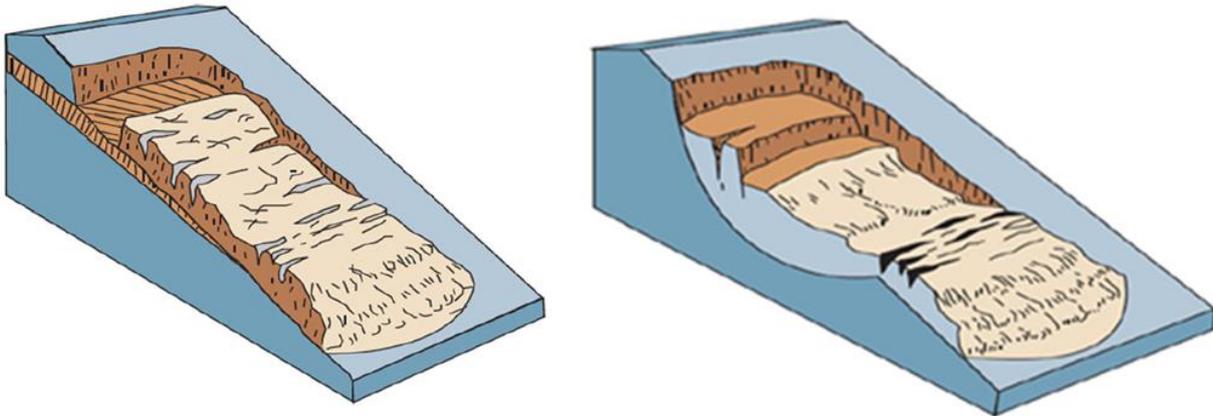


Figura 74 - Schema di scorrimento traslativo e rotazionale (*earth or debris slides* e *earth or debris slumps*).



Figura 75 - Foto di esempi di scorrimenti traslativo e rotazionale. Fonte: Regione Emilia-Romagna

4.1.6 Scivolamenti in roccia su piano di strato (tipologia SCST e SCSTI)

Si tratta di una tipologia di frana caratteristica dei versanti a franapoggio nella Formazione della Marnoso Arenacea (Figura 76). Gli scivolamenti in roccia rappresentano le frane più grandi attivate nel territorio a seguito degli eventi del maggio 2023, raggiungendo singolarmente anche superfici superiori a 30 ha.

Nella letteratura scientifica queste frane sono denominate *rock slides*.

Le aree cartografate comprendono l'intero fenomeno franoso, dal coronamento al piede, compresa la zona di scorrimento senza deposito.

I gradi evolutivi degli scorrimenti in roccia sono variabili, passando da un movimento testimoniato esclusivamente da fratture perimetrali profonde e tendenzialmente rettilinee (SCSTI), a movimenti complessi con la parte basale ormai disarticolata e a volte fluidificata evolutasi in colata di terra (SCST) (Figura 76).



Figura 76 – Foto di scivolamenti in roccia su piano di strato con diverso grado di evoluzione. Fonte: Regione Emilia-Romagna

4.1.7 Frane complesse (tipologia CMPL)

Si tratta di frane costituite da varie tipologie concomitanti, senza che una di esse sia nettamente prevalente. Un esempio fotografico è riportato in Figura 77.

Nella letteratura scientifica queste frane sono denominate *complex landslides*.



Figura 77 - Foto di frana complessa (*complex landslide*). Fonte: Regione Emilia-Romagna

4.1.8 Crolli o scivolamenti/crolli (tipologia CR)

Frane simili a quelle di tipologia A, ove è dominante una componente “aerea” del movimento di crollo lungo pareti particolarmente ripide.

Nella letteratura scientifica queste frane sono denominate *rock falls*.

4.1.9 Frane di attribuzione incerta (tipologia INC)

Frane costituite da varie tipologie concomitanti, di incerta classificazione, senza che una di esse sia nettamente prevalente (Figura 78). Si tratta di frane in attesa di attribuzione definitiva.



Figura 78 - Frana caratterizzata da tipologie concomitanti di scivolamento in roccia scivolamento di terra, colata di terra o di detrito. Fonte: Regione Emilia-Romagna.

4.2 Distribuzione geografica delle frane

In questa sezione si riporta la distribuzione geografica delle frane censite come effetti al suolo a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023 (Figura 79).

Le frane censite sono in totale 65.598 e coprono complessivamente un'area di 72,21 km². Si tratta prevalentemente di frane di modesta estensione, con media pari a 1100,9 m². Quelle con area inferiore a 1000 m² risultano essere 47.556 (il 72,5% del totale), mentre quelle con area superiore a 1 ha (10.000 m²) sono 576 (0,9% del totale). La distribuzione complessiva dell'area delle frane è mostrata nella Figura 80.

Complessivamente sono state coinvolte 6 province su 9: Reggio Emilia, Modena, Bologna, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini. Sono stati coinvolti 115 comuni su un totale di 330, corrispondenti al 34,8%.

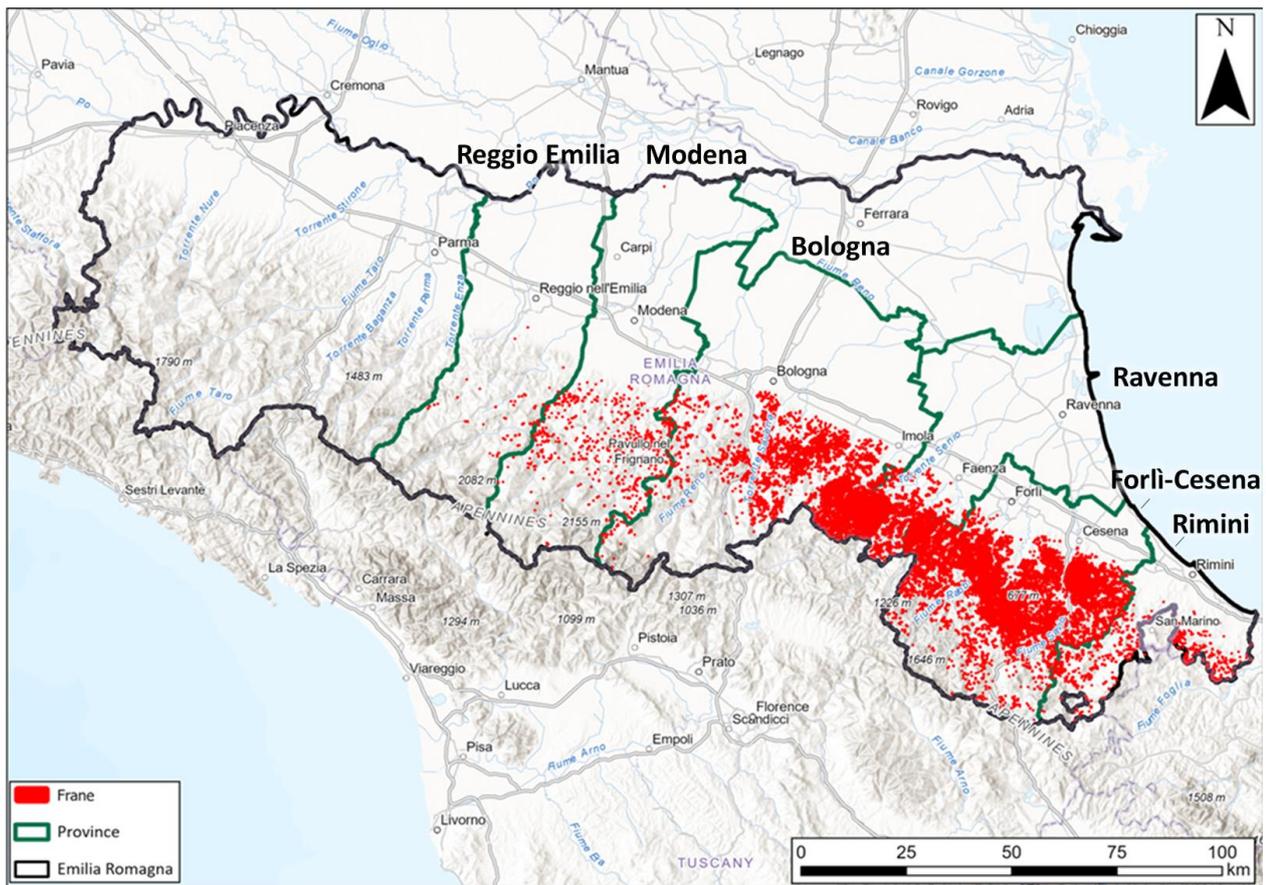


Figura 79 – Distribuzione geografica delle frane inventariate dalla Regione Emilia-Romagna.

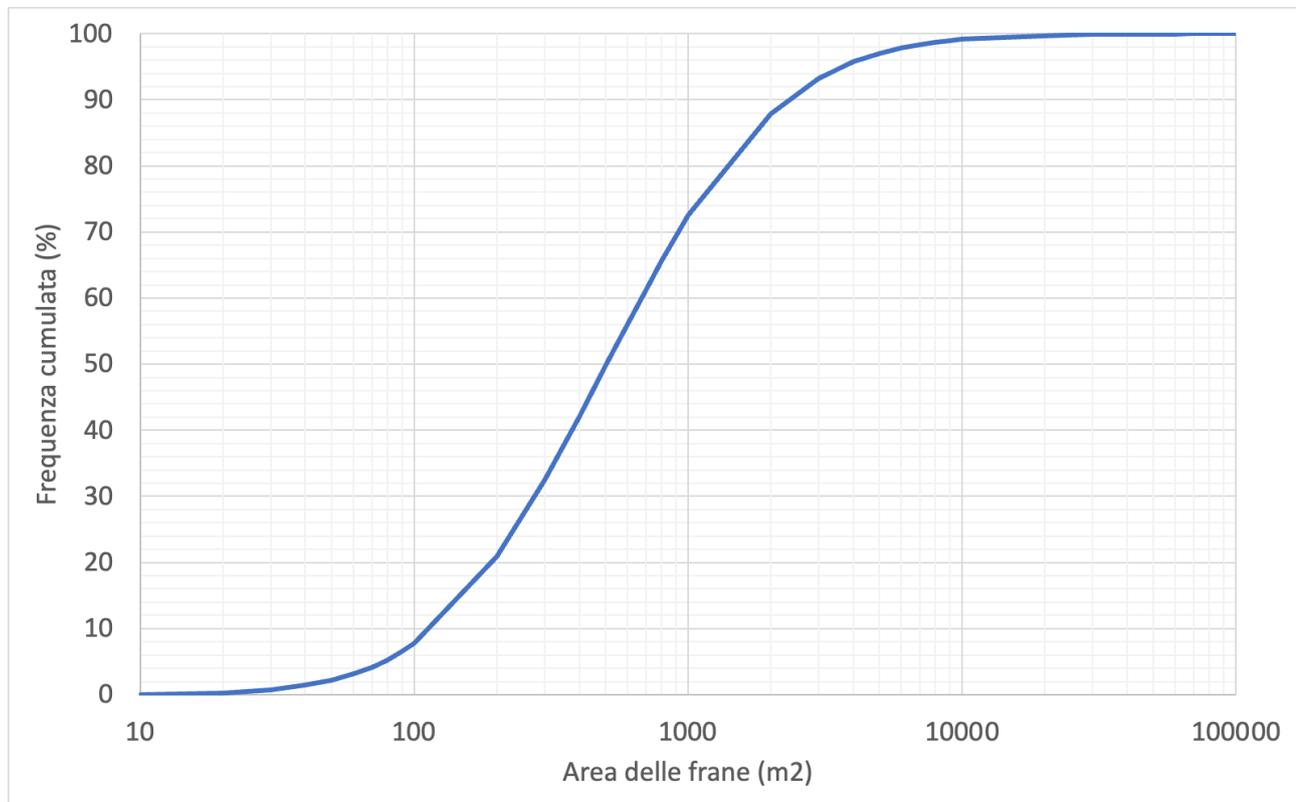


Figura 80 – Distribuzione dell'area (in metri quadri) delle frane inventariate dalla Regione Emilia-Romagna.

La distribuzione dell'area in frana per provincia è mostrata nella Figura 81. La provincia di Forlì-Cesena presenta il valore più alto di area in frana, con 44,64 km². Tale provincia è seguita da quelle di Ravenna e di Bologna con rispettivamente 12,48 km² e 11,99 km².

L'indice di franosità (I.F.) espresso dal rapporto tra l'area in frana, pari a 72,21 km² e l'area totale delle 6 province coinvolte, pari a 13.784 km², risulta pari a 0,52 %. In Figura 82 è mostrata la distribuzione dell'indice di franosità, espresso in valore assoluto, per ogni singola provincia.

La Figura 83 mostra invece la percentuale dell'area in frana complessiva per ogni singola provincia: la provincia di Forlì-Cesena con il 62,3% mostra valore il più alto, seguita da Ravenna e Bologna, con rispettivamente il 17,4% e il 16,7%.

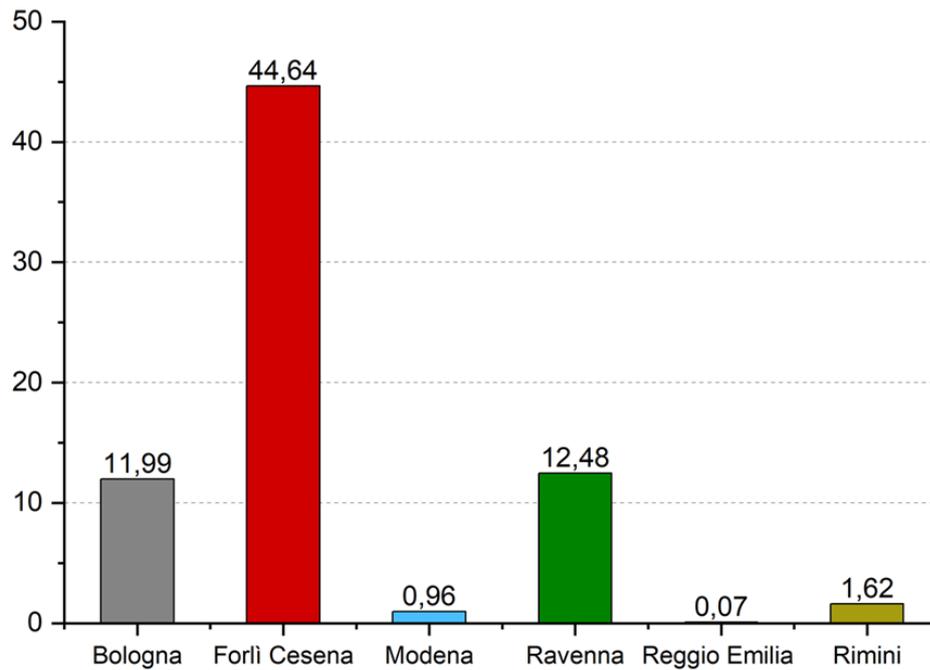


Figura 81 – Distribuzione dell'estensione areale in km² delle frane per provincia.

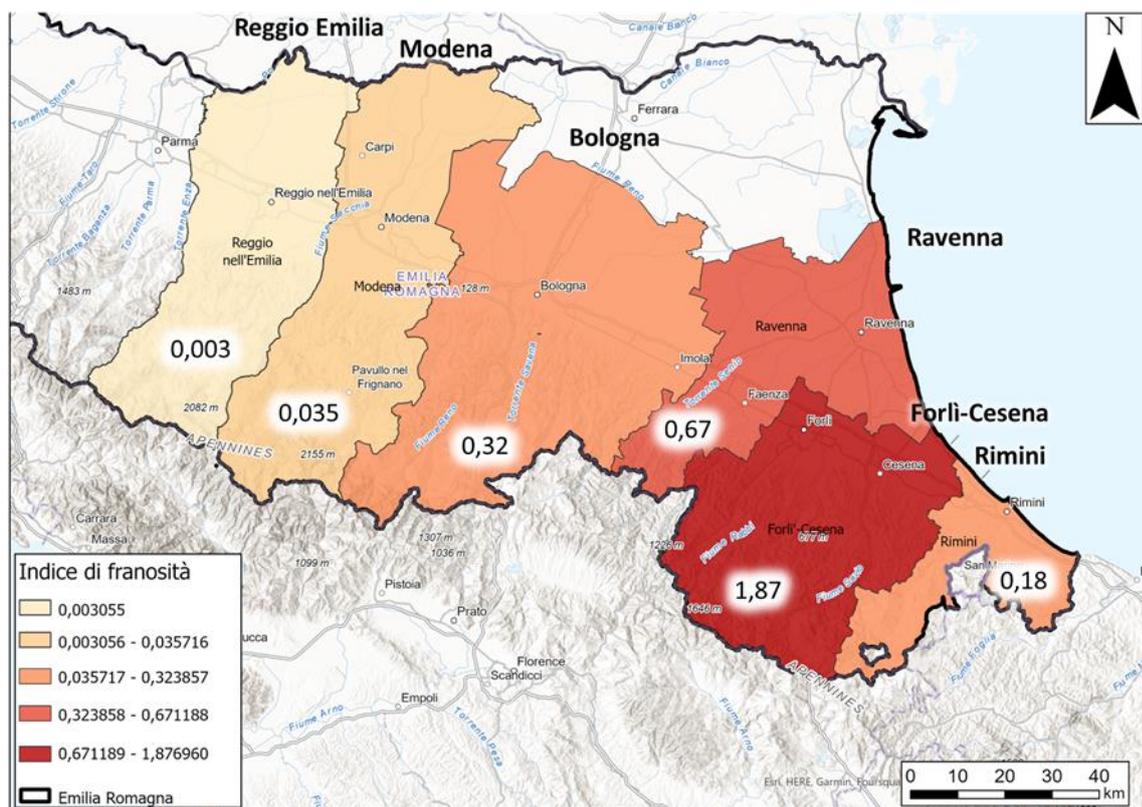


Figura 82 – Distribuzione dell'indice di franosità per provincia.

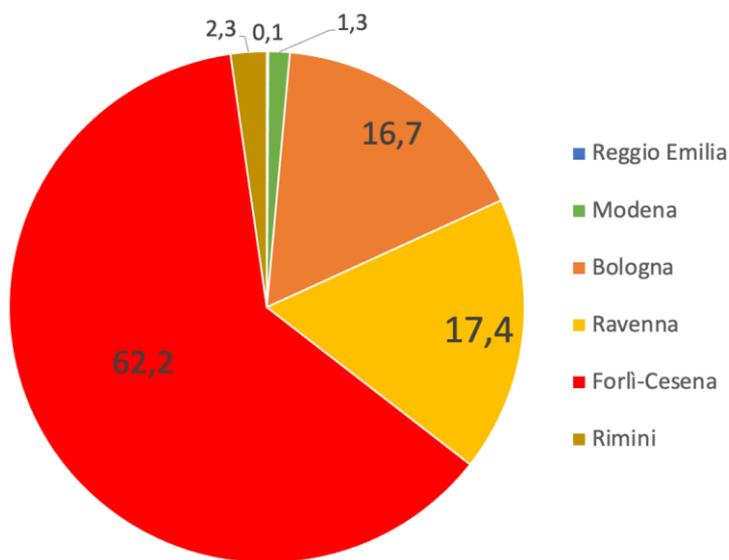


Figura 83 – Distribuzione per provincia della percentuale dell'area in frana complessiva.

4.2.1 Confronto con le isoiete dell'evento

Nella Figura 84 è riportata la distribuzione delle frane censite con le isoiete degli eventi meteorologici del 1-3 maggio 2023 e del 15-17 maggio 2023, costruite, come indicato in precedenza, sulla base dei dati orari registrati ai pluviometri forniti da Arpae.

Si evidenzia, anche in questa occasione, l'eccezionalità di entrambi gli eventi meteorologici, e ancor più della loro concomitanza, sia dal punto di vista della vastissima estensione del territorio coinvolto, sia dal punto di vista delle quantità di pioggia caduta che raggiungono picchi massimi di 210 mm e 240 mm, rispettivamente per il primo evento pluviometrico di 1-3 maggio 2023 e per il secondo evento di 15-17 maggio 2023.

In particolare, l'evento del 15-17 maggio è stato caratterizzato non solo da una maggiore intensità ed estensione, ma anche, a differenza del primo, da condizioni iniziali di totale saturazione dei suoli, data la replica sequenziale dopo pochi giorni dall'evento del 1-3 maggio 2023.

La Figura 85 mostra la distribuzione delle frane con le isoiete dell'evento meteorologico complessivo di maggio 2023 risultante dalla somma dei due eventi sopra considerati.

La maggiore densità delle frane rilevate e mappate è localizzata effettivamente nelle aree dove sono cadute le quantità massime di pioggia nelle province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena (Figura 84) a conferma dello stretto nesso causale tra la forzante meteorologica e gli effetti al suolo verificatisi nel maggio 2023.

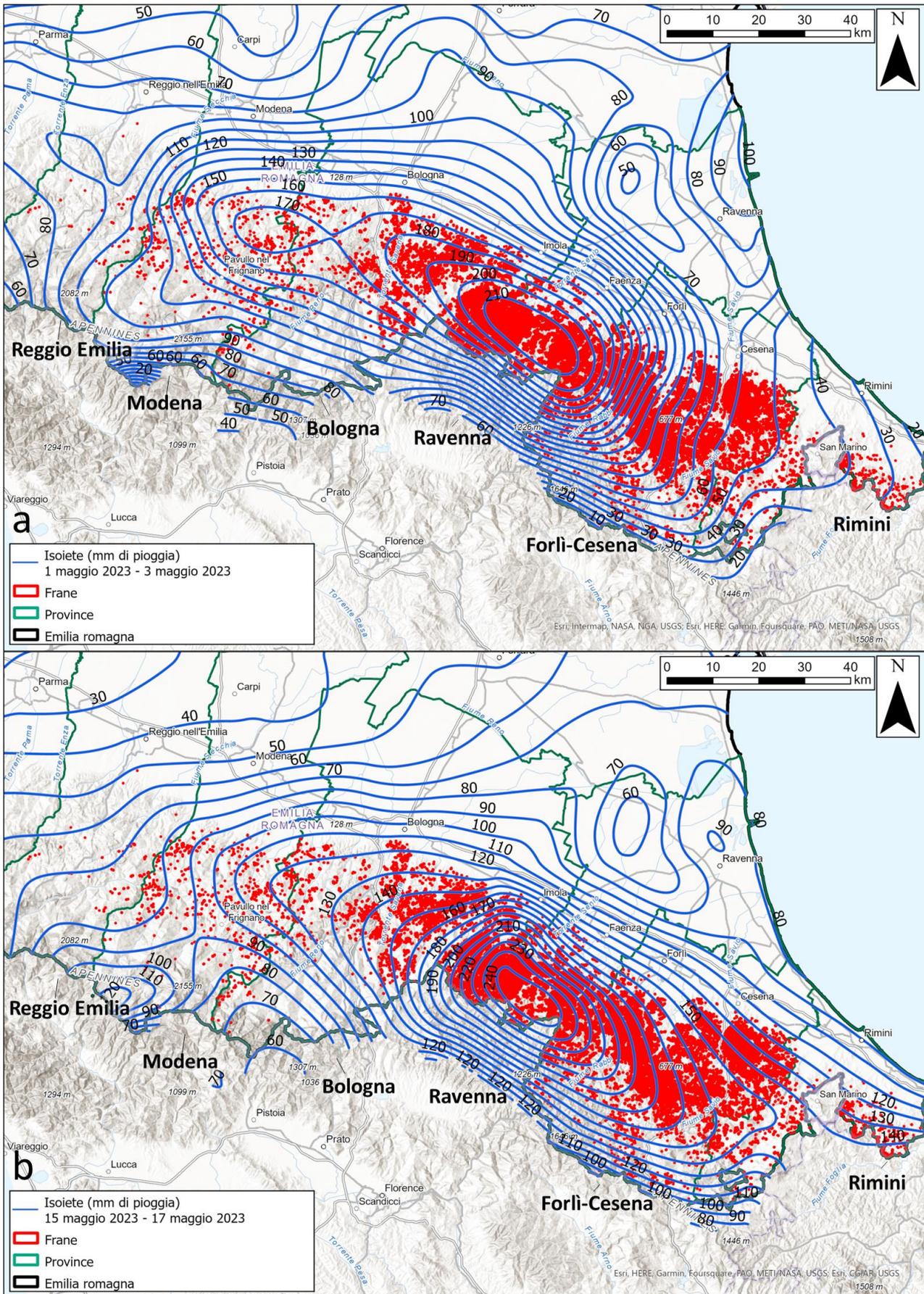


Figura 84 –Mappatura delle frane censite dalla Regione Emilia-Romagna e isoiete degli eventi di (a) 1-3 maggio 2023; (b) 15-17 maggio 2023.

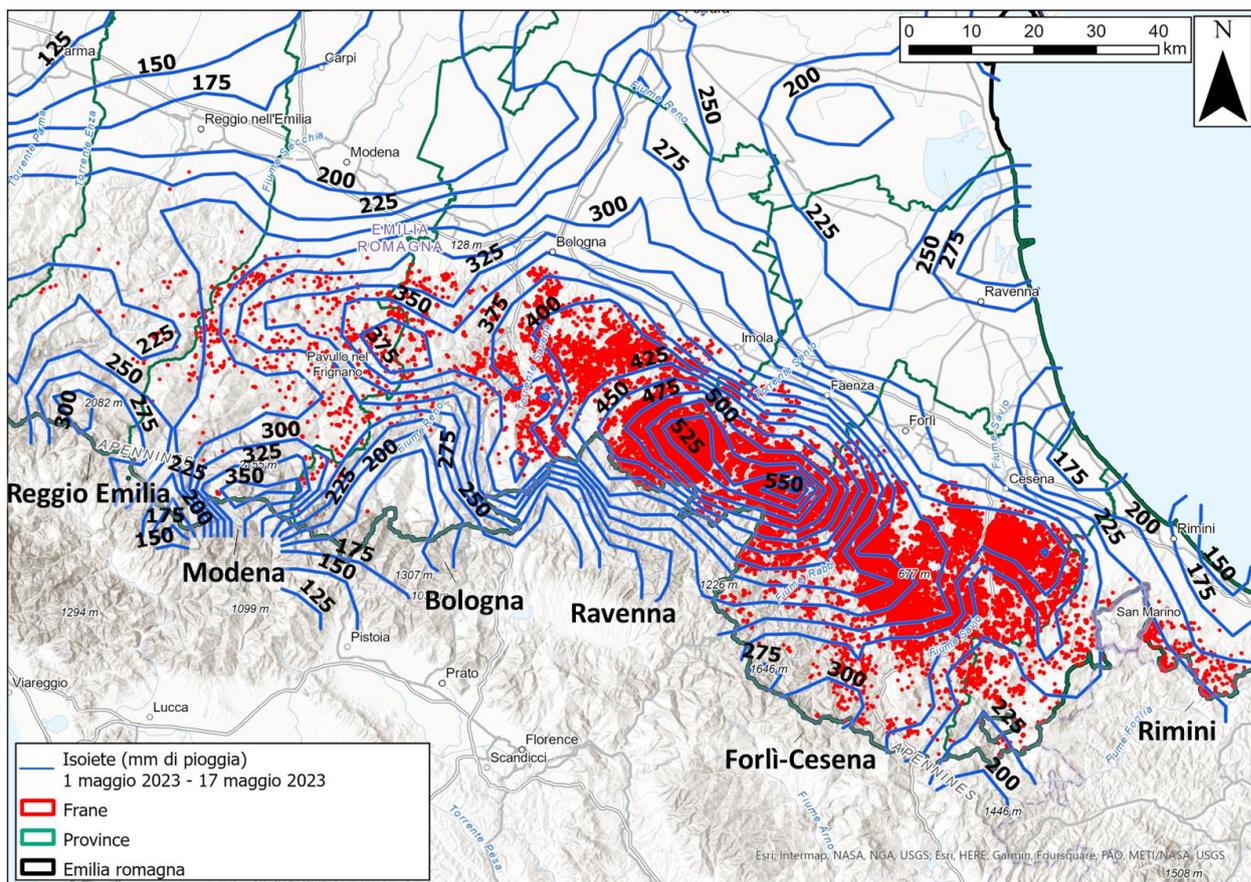


Figura 85 - Mappatura delle frane censite dalla Regione Emilia-Romagna e isoiete dell'evento meteorologico complessivo di maggio 2023.

4.2.2 Confronto con la litologia

La distribuzione delle frane rivela la loro stretta dipendenza dalle formazioni a litologia prevalentemente arenacea e/o strutturalmente complesse. Le aree maggiormente colpite sono caratterizzate da rocce di tipo flyschoidi, costituite da alternanze tra livelli lapidei e livelli pelitici, e argille, argille marnose e argille siltose strutturalmente ordinate, stratificate, con eventuale rara presenza di livelli arenitici.

In Figura 86 è rappresentato il confronto tra le frane innescate dagli eventi meteorologici di maggio 2023 e la litologia, classificata secondo le unità litotecniche della Carta geologica regionale in scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna. I territori caratterizzati da alternanze di livelli permeabili e impermeabili, costituiti principalmente da Flysch, sono stati interessati da dissesti in misura relativamente maggiore rispetto a litologie argillose e sabbiose (v. Figura 87).

Le cause di tali diversi comportamenti sono indicativamente dovute alla maggiore acclività dei versanti e alla diversa permeabilità dei terreni alternati, i quali hanno originato differenti risposte alle precipitazioni.

La Figura 88 mostra l'indice di franosità espresso come rapporto tra la superficie totale delle frane che interessano una data unità litologica e la superficie totale della medesima unità. Essa evidenzia come le "alternanze tra livelli lapidei e livelli pelitici" mostrino la più elevata concentrazione di frane, superando valori dell'1,7%.

Alti valori dell'indice di franosità caratterizzano anche litologie analoghe, quali "alternanze con livelli pelitici prevalenti" e "alternanze con livelli lapidei prevalenti". L'elevato indice che interessa i "gessi" è influenzato dall'esiguità degli affioramenti di questi. Seguono in ordine di valore decrescente dell'indice di franosità "argille, argille marnose e siltose", "conglomerati e brecce", "brecce argillose", "marne" e "sabbie e areniti poco cementate".

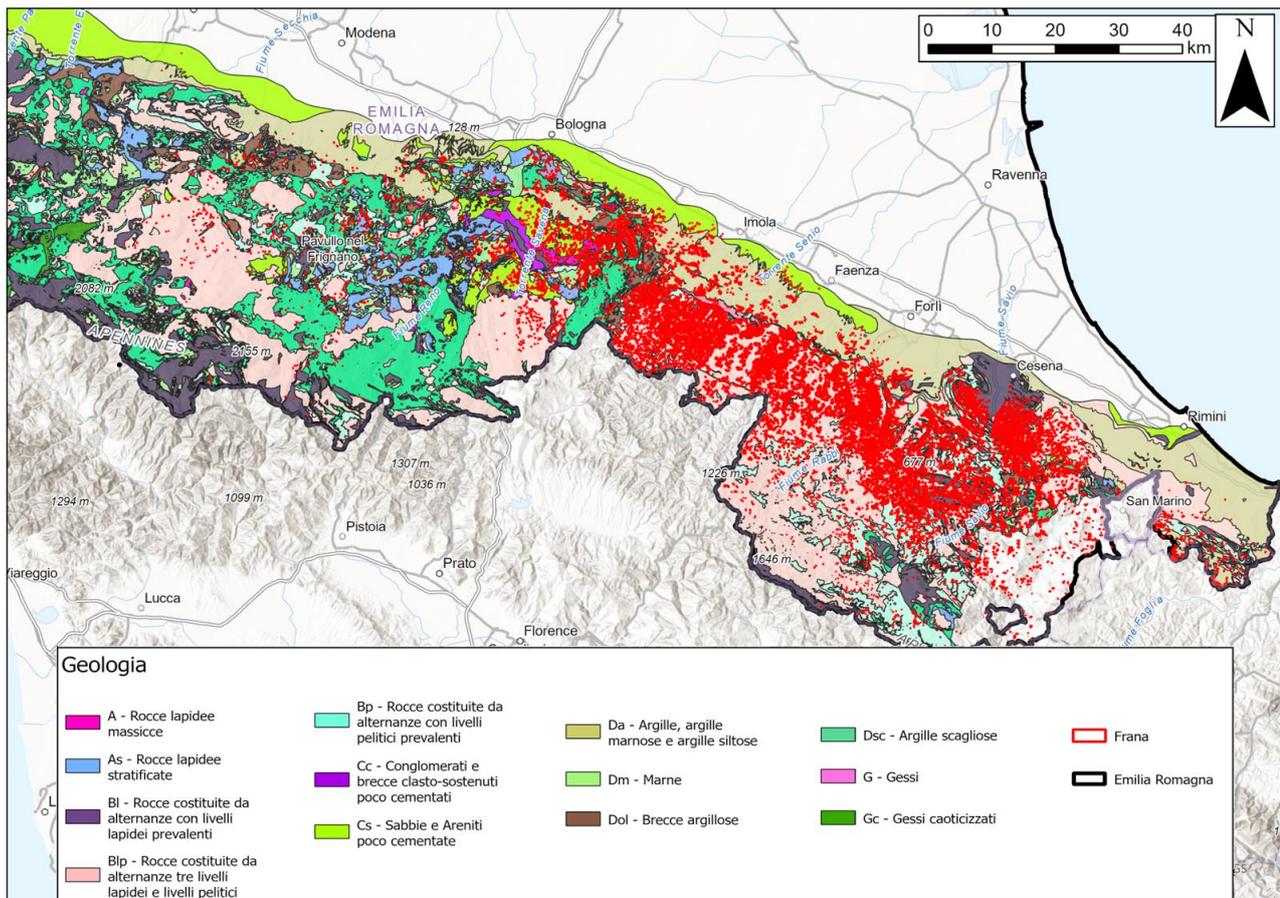


Figura 86 – Confronto tra la mappatura delle frane censite a seguito degli eventi di maggio 2023 e le unità litologiche della Carta geologica regionale scala 1:10.000 della Regione Emilia-Romagna.

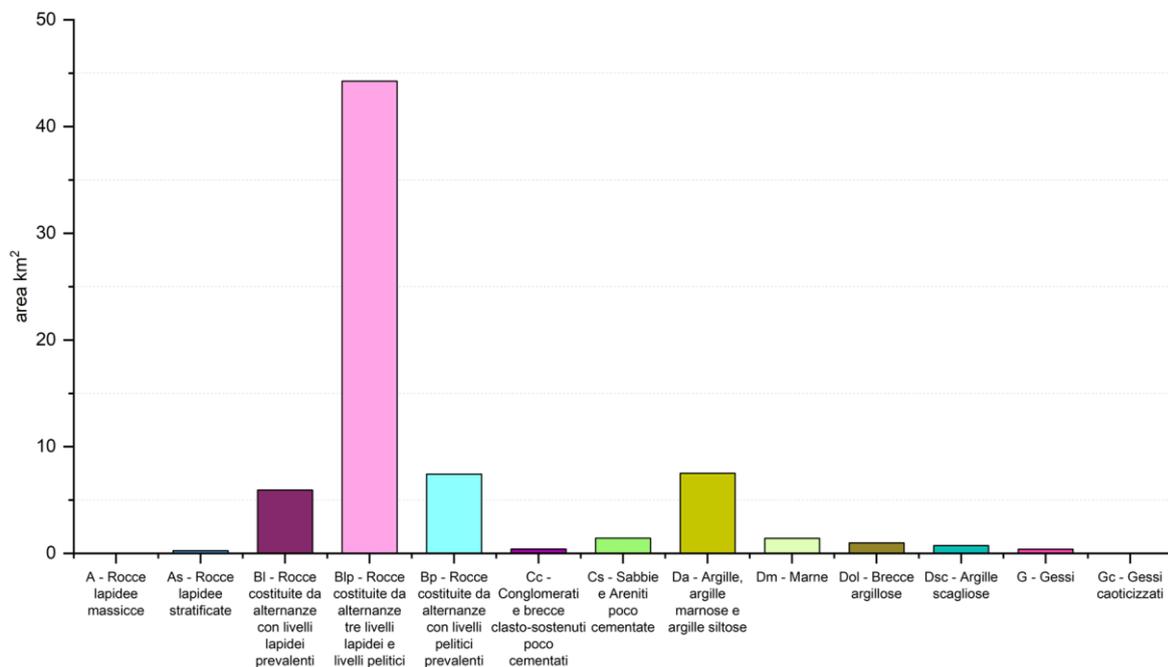


Figura 87 – Distribuzione dell'estensione areale in km2 delle frane in relazione alle unità litologiche affioranti.

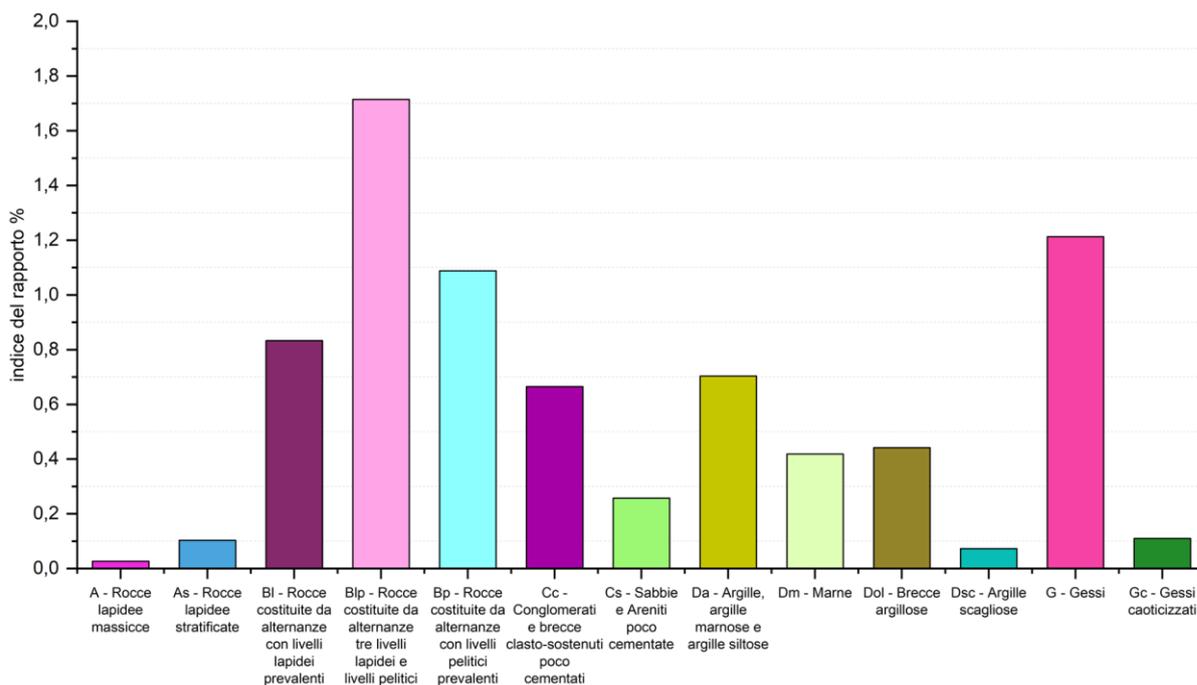


Figura 88 – Indice di franosità espresso come rapporto tra la superficie totale delle frane che interessano una data unità litologica e la superficie totale della medesima unità.

Nella Figura 83 è mostrata la percentuale dell'area in frana complessiva per ogni classe litologica: le rocce costituite da alternanze di livelli lapidei e pelitici, più o meno prevalenti (classi Bl, Blp e Bp), comprendono il 47,5% dell'area in frana complessiva.

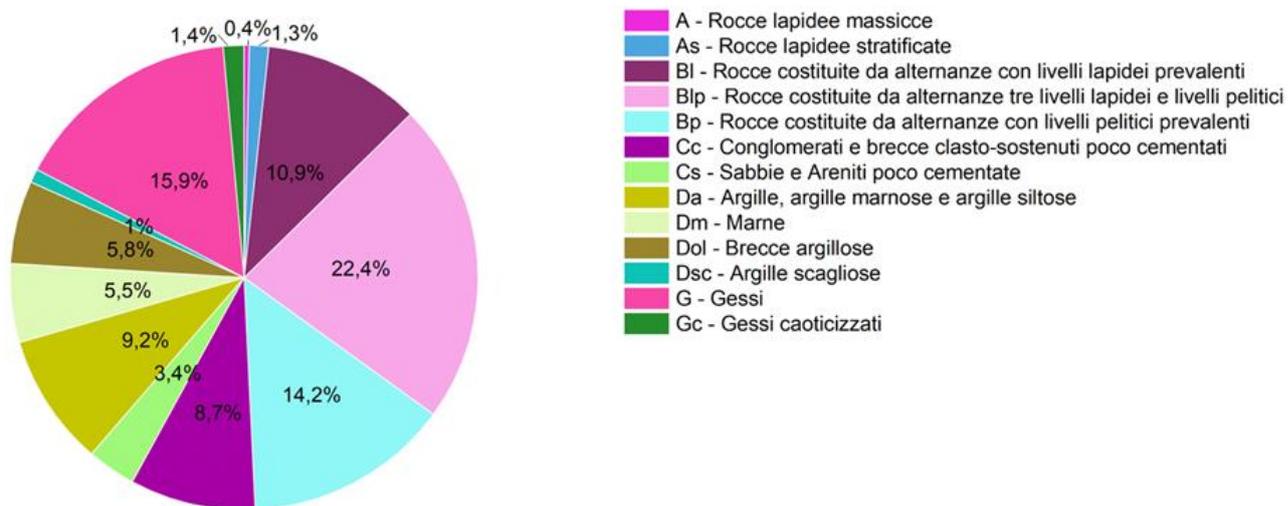


Figura 89 – Percentuale di area in frana normalizzata per ogni singola litologia.

Nella Figura 90 è mostrato a titolo di esempio, un dettaglio del confronto tra unità litologiche affioranti e localizzazione delle frane in corrispondenza del comune di Monterenzio (BO). Le frane all'interno del comune sono maggiormente localizzate nell'area settentrionale, in corrispondenza di litologie quali marne e rocce costituite da alternanze. Procedendo verso Sud, si nota un'evidente diminuzione di frane, laddove sono affioranti principalmente le Argille scagliose tipiche del Dominio Figure.

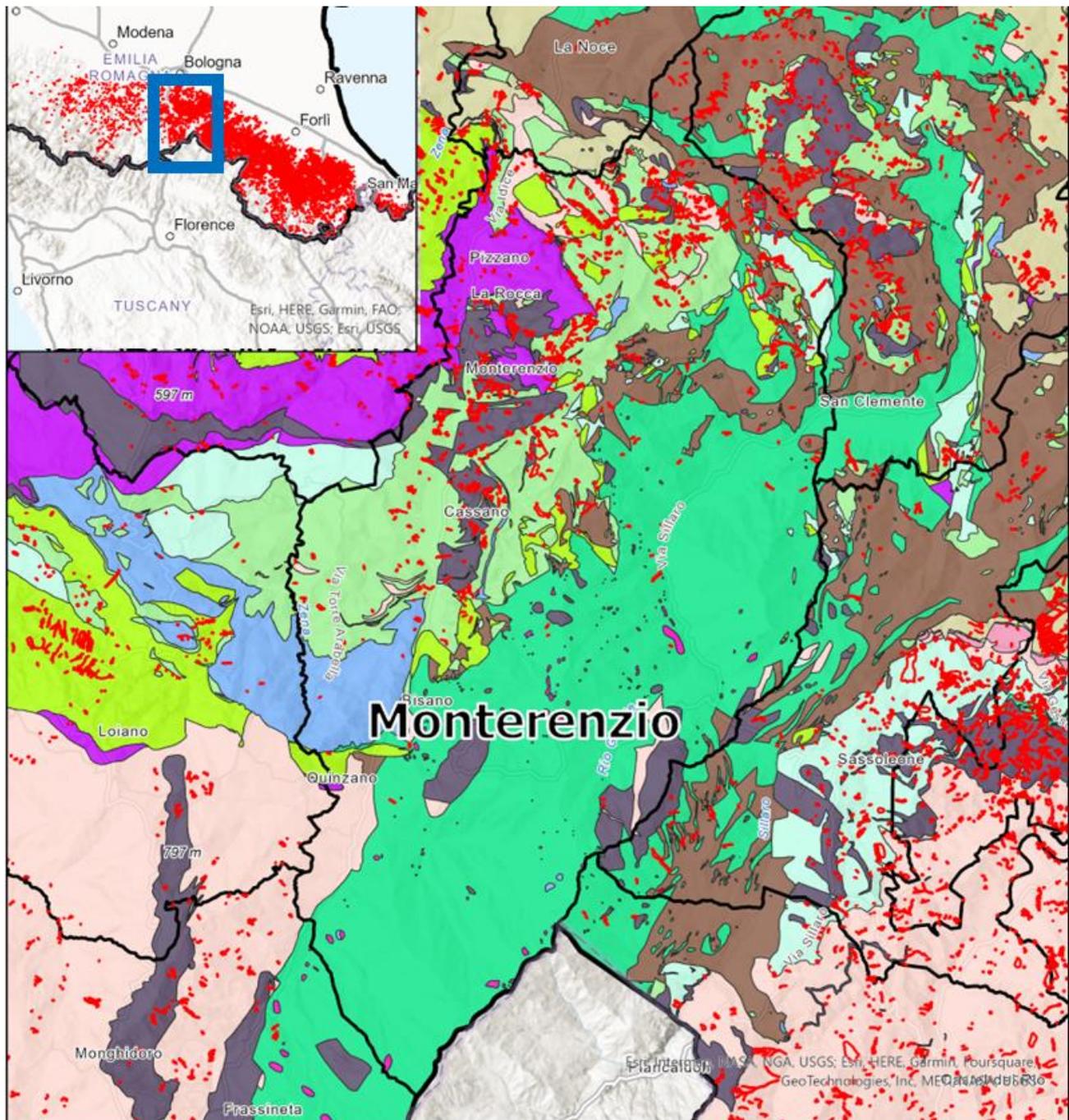


Figura 90 - Confronto litologia e frane censite in corrispondenza del comune di Monterenzio (BO).

4.2.3 Confronto con la mappa inventario regionale delle frane

L'Inventario dei fenomeni franosi regionale disponibile sui geoportali della Regione Emilia-Romagna e dell'ISPRA (IdroGEO) presenta ben 82.389 corpi franosi mappati nelle sei province coinvolte dagli eventi, con un'area in frana totale pari a 2841,28 km². Si tratta di frane di dimensioni ben più considerevoli (area media pari a 34.486,1 m²) rispetto a quelle che si sono verificate nel maggio 2023 (area media pari a 1100,9 m²).

La Figura 91 mostra un estratto della distribuzione delle frane dell'inventario regionale confrontata con quella degli eventi del maggio 2023. È ben evidente l'elevatissima densità di fenomeni franosi di neoformazione e di modeste dimensioni, che ricadono per lo più al di fuori delle vaste aree franose censite sui geoportali sopra citati.

La porzione dell'area complessiva degli eventi di maggio 2023, sulle sei province colpite, che ricade in aree mappate dall'inventario regionale è pari a soli 15,52 km² sui 72,21 km² totali. Ciò significa che solo il 21,5% delle nuove frane sono riattivazioni, totali o parziali, di frane note preesistenti. Il 78,5% delle nuove frane sono quindi da considerarsi in gran parte eventi di neoformazione, ricadendo al di fuori della cartografia esistente (Figura 92).

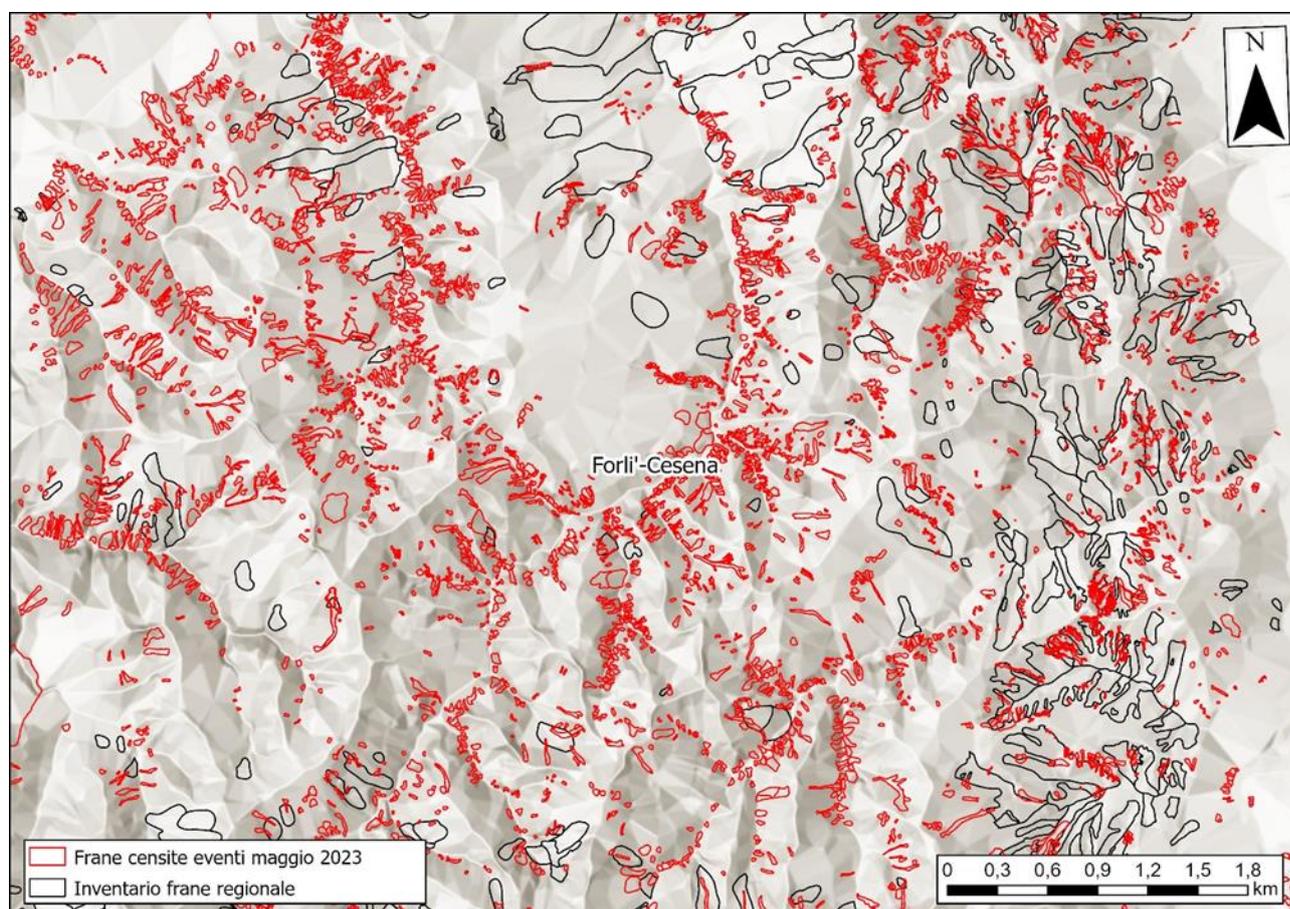


Figura 91 - Estratto della mappatura delle frane censite dalla Regione Emilia-Romagna a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023 sovrapposta all'inventario regionale delle frane della Regione Emilia-Romagna e del portale IdroGEO di ISPRA.

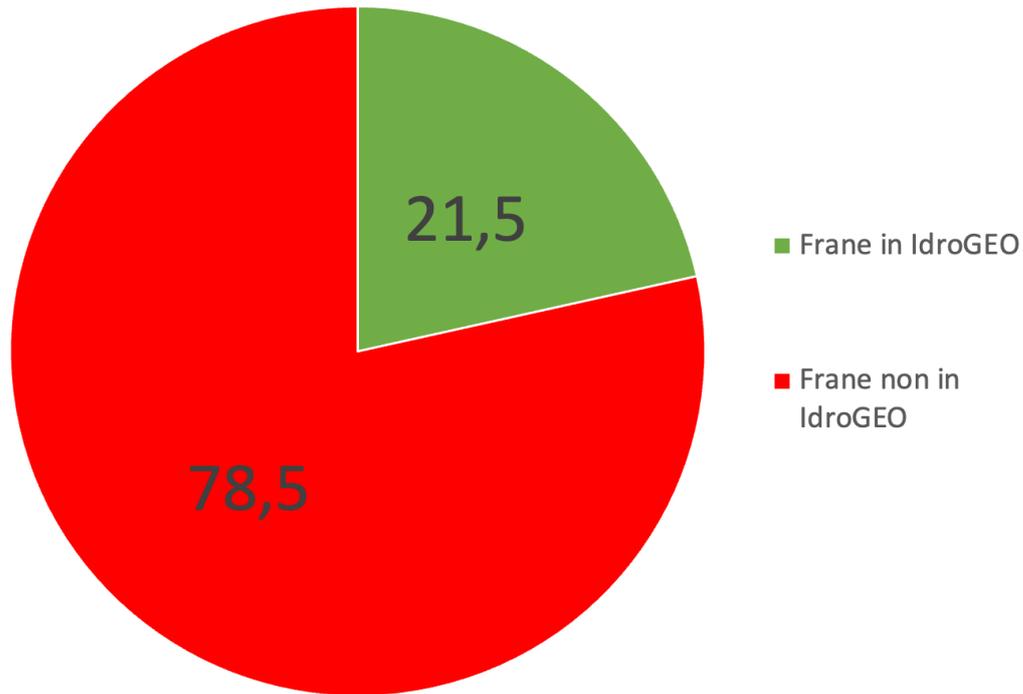


Figura 92 – Distribuzione in percentuale delle aree in frana censite, ricadenti o meno all'interno dell'inventario delle frane della Regione Emilia-Romagna e del portale IdroGEO di ISPRA

4.2.4 Confronto con le aree a pericolosità idrogeologica

Le frane del maggio 2023 sono state intersecate con le aree a diversa pericolosità del Piano di Assetto Idrogeologico PAI dell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po (Figura 93), ottenendo per ogni livello la superficie dei fenomeni rientranti all'interno o intersecanti le varie aree (Figura 94 e Tabella 10).

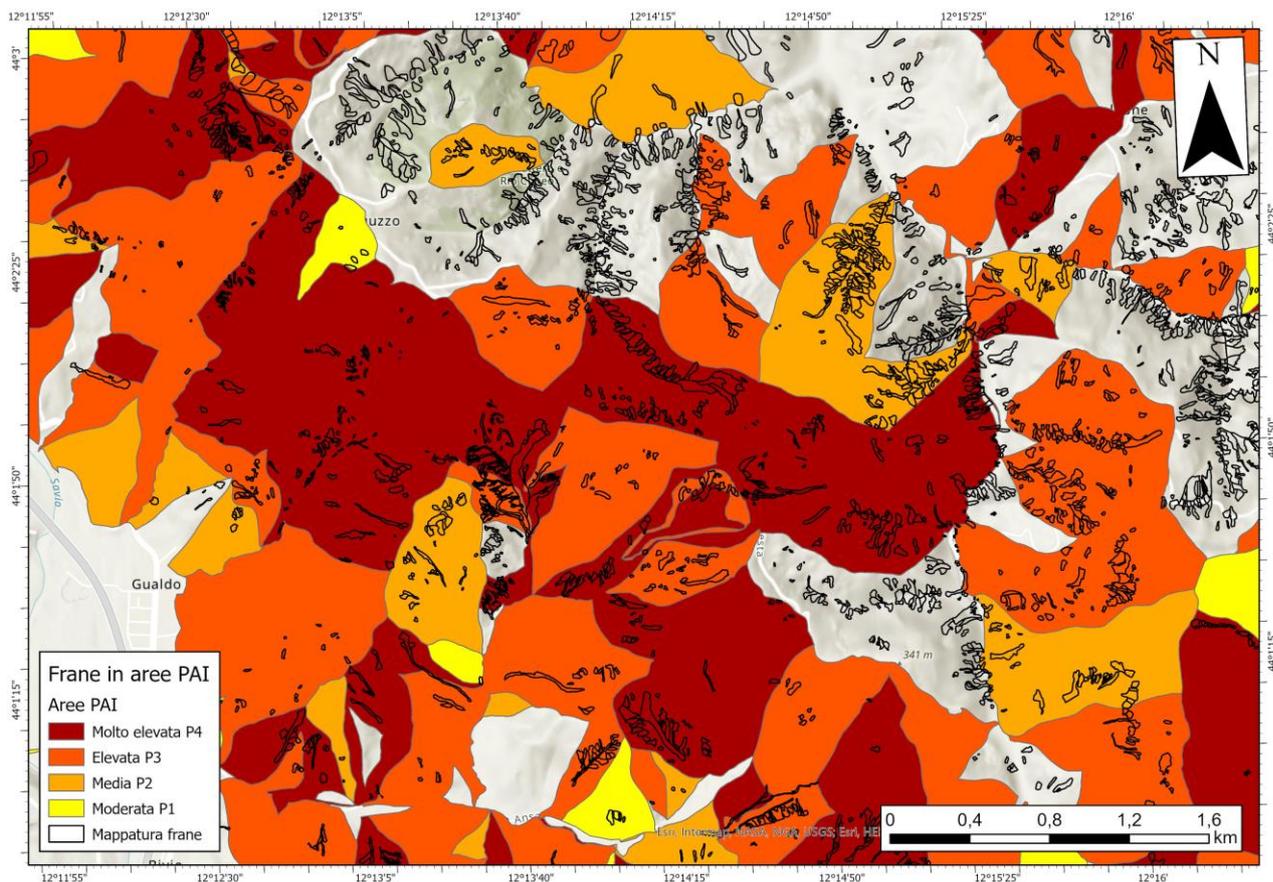


Figura 93 – Estratto della mappatura delle frane censite dalla Regione Emilia-Romagna a seguito degli eventi meteorologici di maggio 2023 sovrapposta alle perimetrazioni della pericolosità idrogeologica del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI).

In totale, l'area totale in frana dell'evento di maggio 2023 che è inclusa o interseca le perimetrazioni di pericolosità nell'ambito del PAI dell'Emilia-Romagna è di 34,15 km², corrispondente al 47,3% dell'intera mappatura, il che significa che ben il 52,7% interessa aree non classificate come pericolose.

Si può altresì notare come il 40,5 % delle frane ricada nelle due classi a pericolosità più alta (P3 e P4), mentre il 6,8% ricade nelle classi P1 e P2 (Figura 95).

Tabella 10 – Area interessata da frane nel maggio 2023 per classe di pericolosità del PAI.

Classe di pericolosità	Area in frana (km ²)	Area in frana (%)
-	38,06	52,7
P1	1,72	2,4
P2	3,17	4,4
P3	18,71	25,9
P4	10,54	14,6
Totale	72,21	100,0

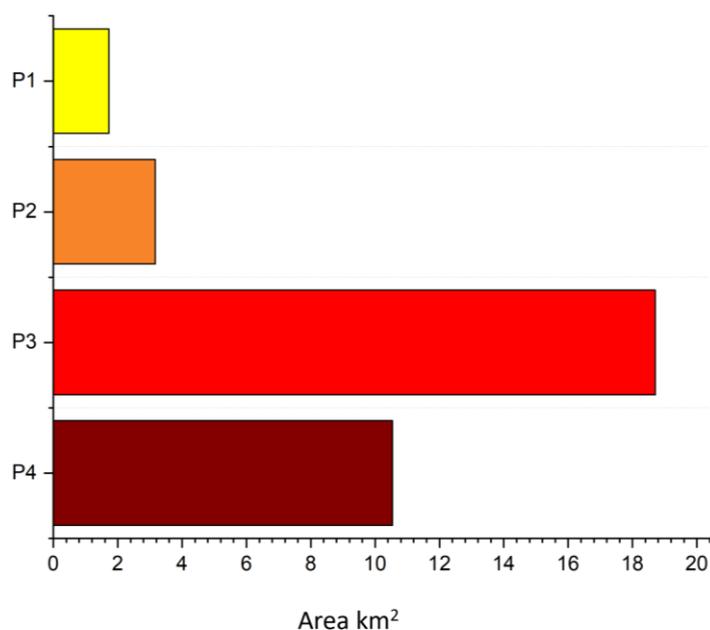


Figura 94 – Estensione areale delle frane del maggio 2023 per classe di pericolosità del PAI.

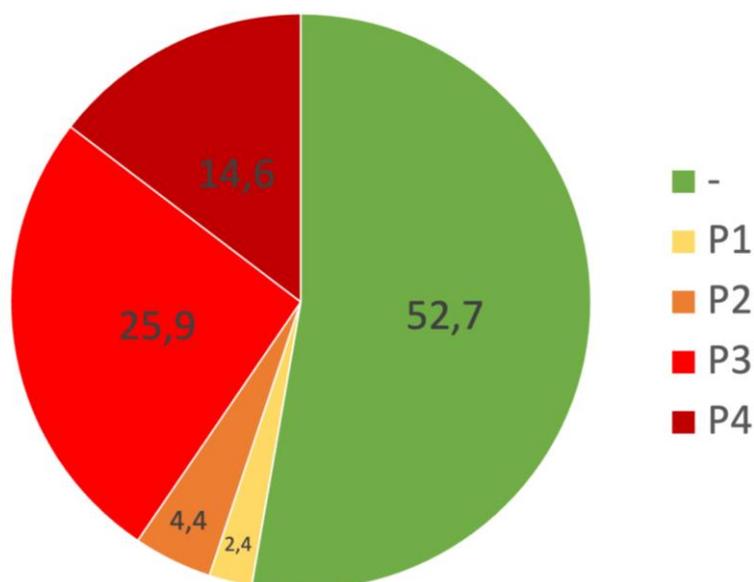


Figura 95 - Percentuali dell'area interessata da frane nel maggio 2023 per classe di pericolosità del PAI.

4.2.5 Confronto con l'uso del suolo

Sono state effettuate delle intersezioni in ambiente GIS tra l'inventario delle frane del maggio 2023 e la mappa dell'uso del suolo Corine Land Cover (CLC - Coordination of Information on the Environment of Land Cover), ovvero il sistema di classificazione e mappatura dell'uso del suolo e della copertura terrestre, sviluppato dall'Unione Europea per monitorare e rappresentare in modo uniforme l'uso del suolo, il cui ultimo aggiornamento è stato fatto nel 2018.

Questa base cartografica classifica il territorio in categorie specifiche, consentendo agli esperti di quantificare e interpretare le variazioni nell'uso del suolo e nella copertura terrestre dell'area analizzata. Le categorie definite nel CLC includono boschi, terreni agricoli, aree urbane, zone umide, corsi d'acqua e molte altre (Figura 96).

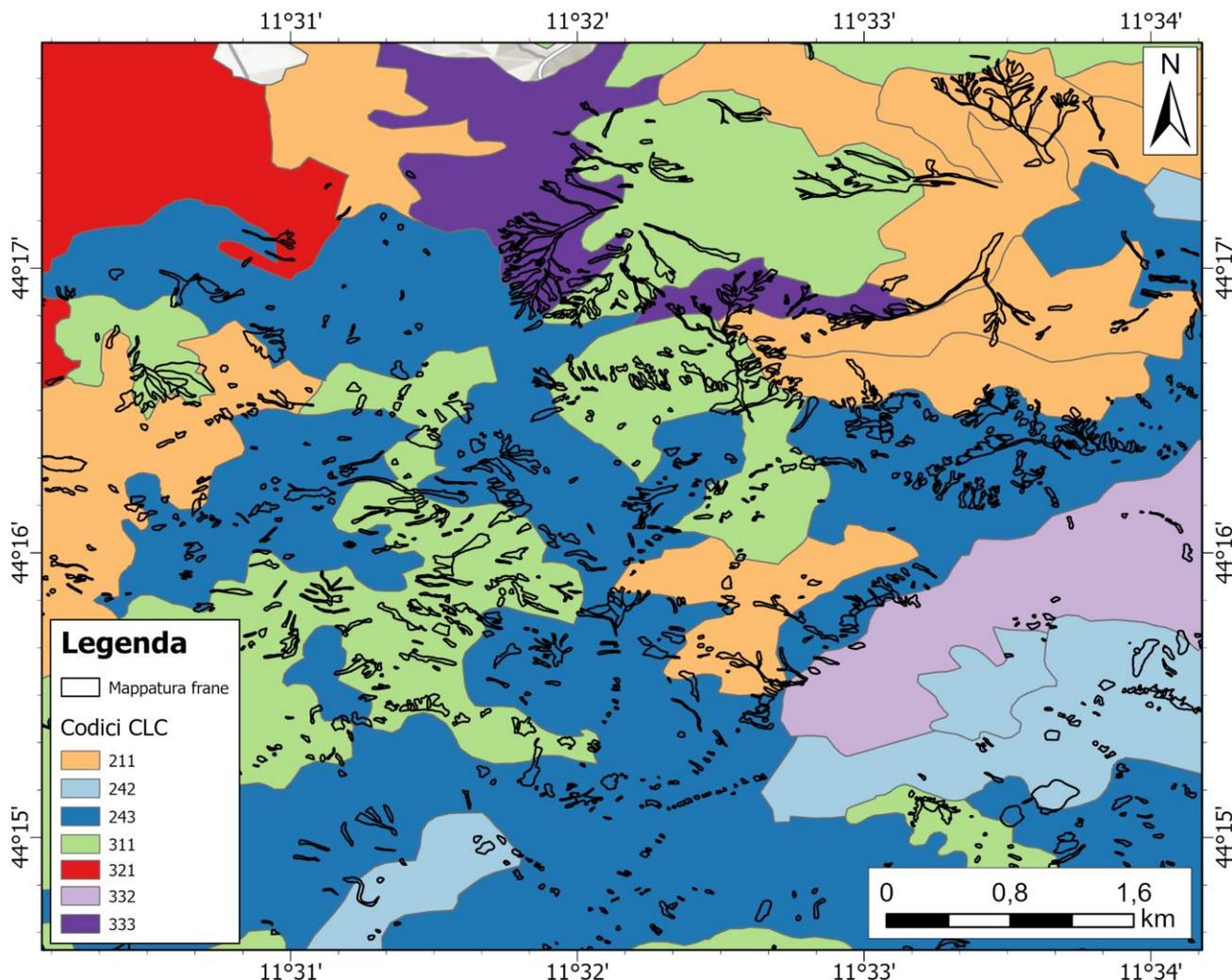


Figura 96 – Estratto della distribuzione delle frane innescatesi a seguito degli eventi di maggio 2023 (poligoni grigi) sulla Carta di Uso del Suolo Corine Land Cover. 211=Seminativi in aree non irrigue; 242= Zone agricole eterogenee - sistemi culturali e particellari complessi; 243= zone agricole eterogenee - Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali (formazioni vegetali naturali, boschi, lande, cespuglieti, bacini d'acqua, rocce nude, ecc.) importanti; 311= Territori boscati e ambienti seminaturali - Boschi di latifoglie; 321= Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea - Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota; 332= Zone aperte con vegetazione rada o assente - Rocce nude, falesie, rupi affioramenti; 333= Aree con vegetazione rada.

L'intersezione evidenzia che la maggioranza delle frane inventariate si è verificata su territori agricoli in aree rurali e su aree boscate, in particolare sulle seguenti categorie di uso del suolo, in ordine decrescente di rilevanza (Figura 97):

- Codice 243: aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali, dove sono avvenute 8839 frane per un totale di 8,21 km²;
- Codice 311: boschi di latifoglie, con 7035 frane per un totale di 7,46 km²;
- Codice 211: seminativi in aree non irrigue - sistemi culturali e particellari complessi, dove sono avvenute 3708 frane per un totale di 3,09 km²;
- Codice 324: aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione, con 2222 frane per un totale di 2,40 km²;
- Codice 242: zone agricole eterogenee, dove sono avvenute 2289 frane per un totale di 1,82 km²;
- Codice 313: bosco misto, dove sono avvenute 1419 frane, per un totale 1,23 km².

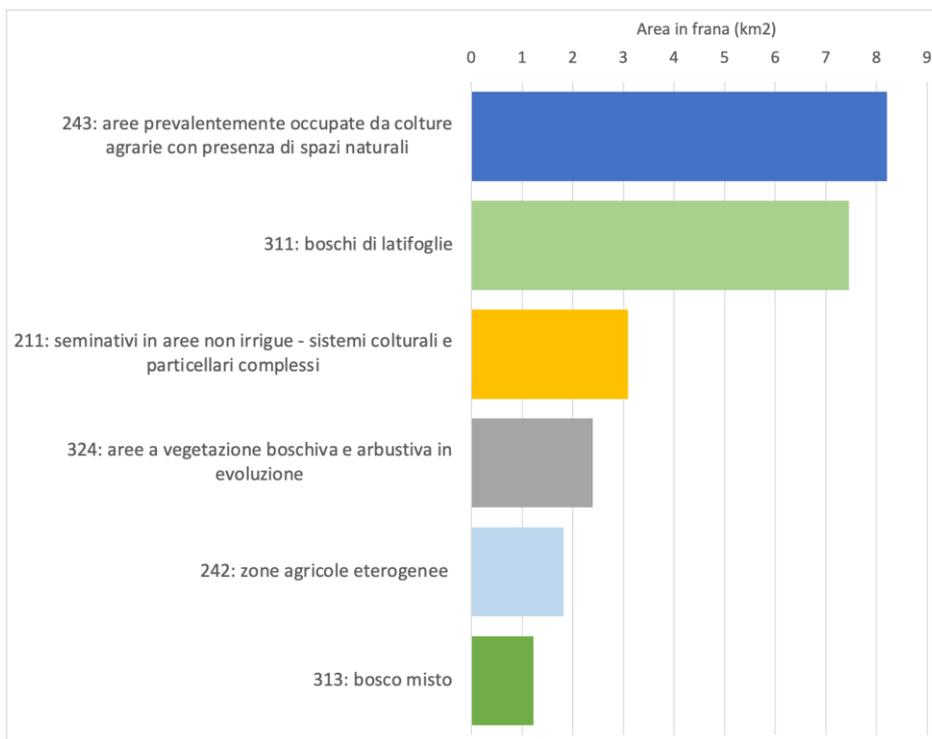


Figura 97 - Distribuzione dell'area in frana per classe di uso del suolo Corine Land Cover.

4.2.6 Impatto sulle strutture e sulle infrastrutture

Per valutare l'impatto delle frane del maggio 2023 è stato effettuato un confronto con le strutture e le infrastrutture delle sei province coinvolte negli eventi. Sono stati considerati edifici e tracciati stradali e ferroviari sul territorio regionale, derivanti dal database GIS della Regione Emilia-Romagna.

Si premette che i dati presentati in questa sezione risultano con molta probabilità sottostimati in quanto derivanti dall'analisi in ambiente GIS delle strutture e delle infrastrutture intersecanti le frane censite. È quindi di fondamentale importanza che gli impatti effettivi siano verificati attraverso ulteriori informazioni, quali segnalazioni di danno e gli interventi urgenti e di somma urgenza programmati o ultimati, che al momento non sono disponibili in maniera completa e organizzata per permettere statistiche.

Nel territorio esaminato sono censiti 1.143.196 edifici (Figura 98) di cui 311 risultano coinvolti dalle frane del maggio 2023. In Figura 99 è mostrata la distribuzione per provincia: quella di Forlì Cesena mostra il più alto numero di strutture coinvolte, pari a 148 unità. Essa è seguita da Ravenna e Bologna con rispettivamente 101 e 55 strutture coinvolte.

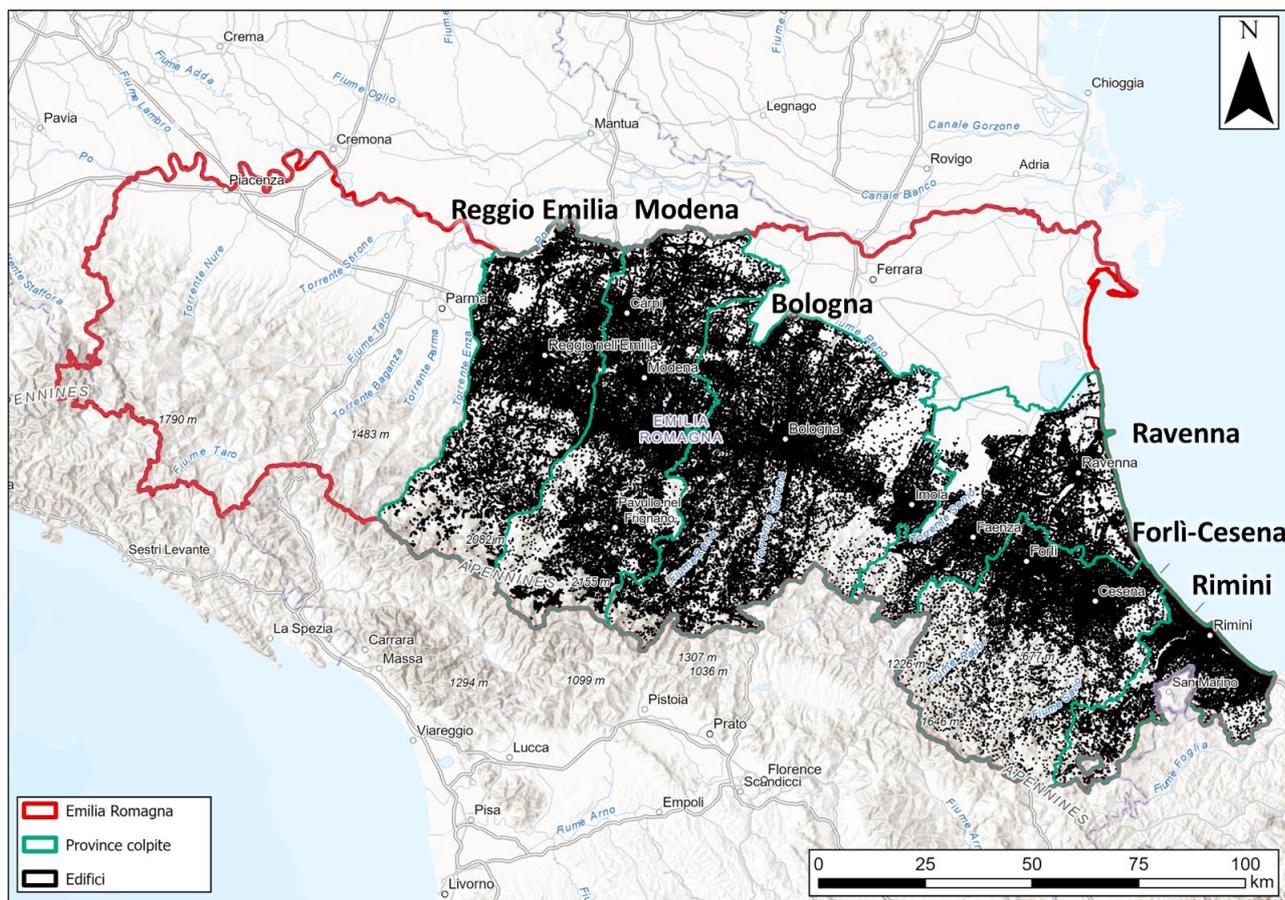


Figura 98 – Distribuzione degli edifici nelle sei province coinvolte negli eventi di maggio 2023. Fonte: database GIS della Regione Emilia-Romagna.

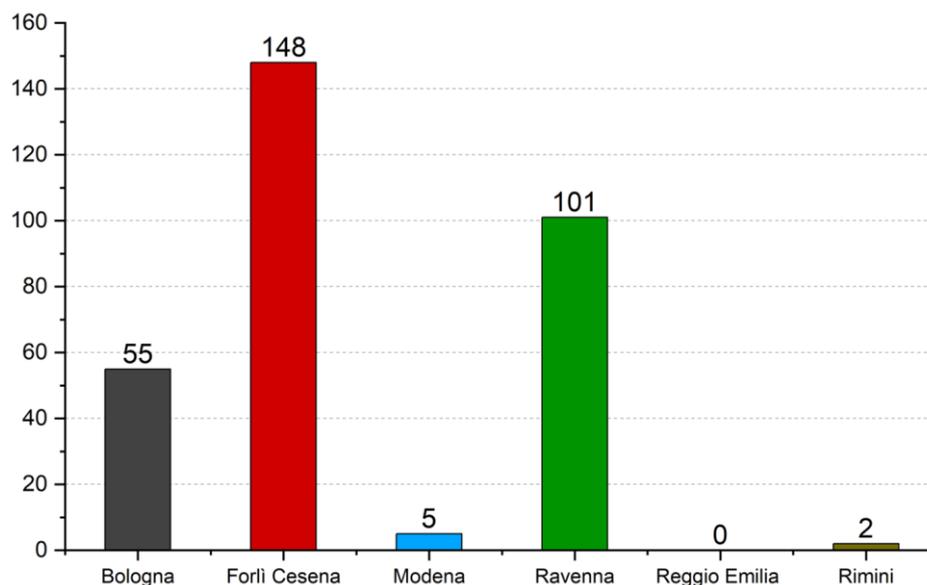


Figura 99 – Numero di edifici coinvolti da dissesto per le sei province coinvolte.

In Figura 100 sono mostrati gli sviluppi lineari dei segmenti stradali nelle sei province, suddivisi in 5 livelli gerarchici: autostrada, strada statale, strada regionale, strada provinciale e strada comunale e locale. All'interno delle strade comunali e locali sono comprese ulteriori suddivisioni: strade comunali, strade forestali, strade private, strade vicinali ad uso pubblico, e livelli gerarchici non assegnati.

In particolare, è stata effettuata, in ambiente GIS, una intersezione tra i poligoni delle frane censite a seguito degli eventi di maggio 2023 e i tracciati stradali considerando un *buffer* di tolleranza pari a 20 metri intorno allo sviluppo lineare.

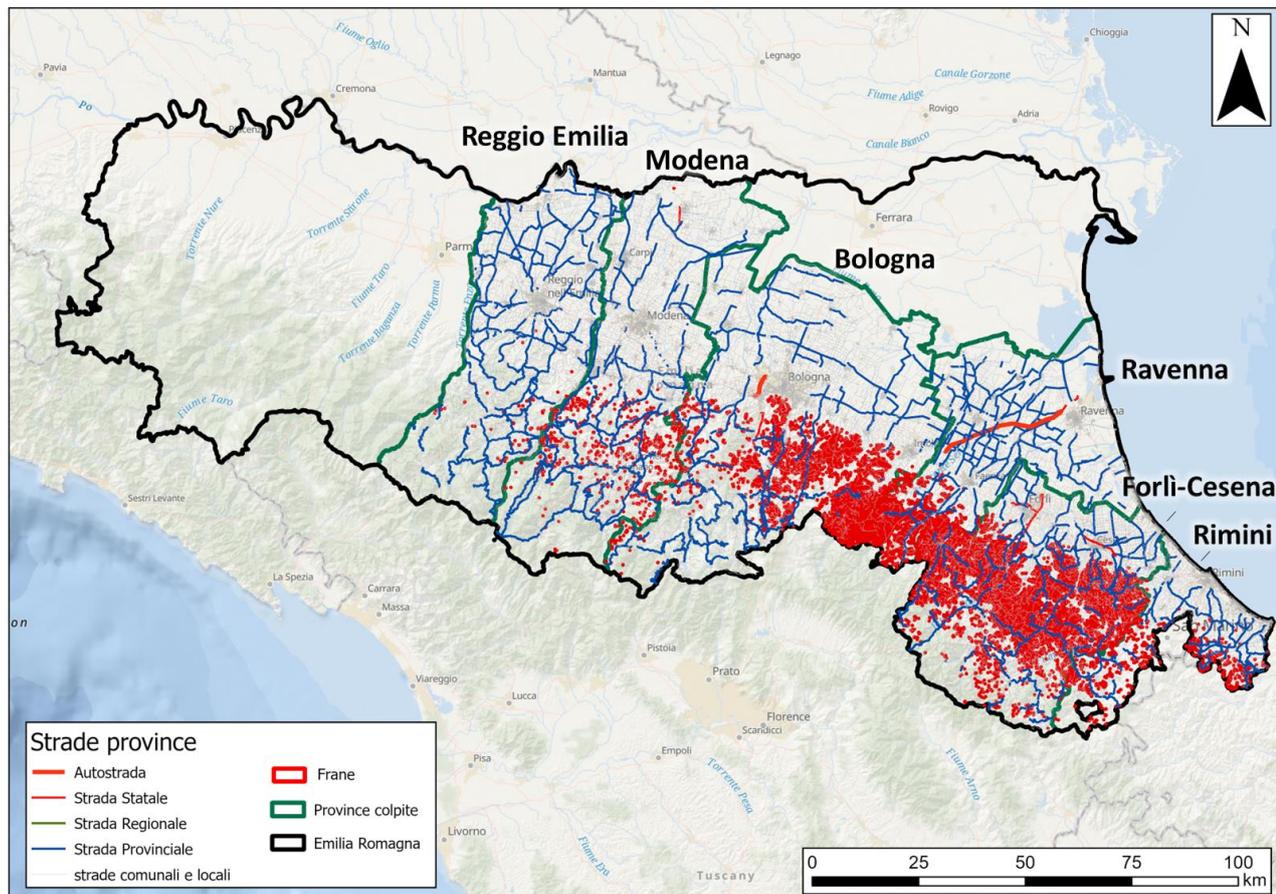


Figura 100 – Distribuzione delle infrastrutture lineari stradali (database GIS della Regione Emilia-Romagna) sulle province coinvolte negli eventi di maggio.

In totale, 1950 infrastrutture stradali sono state coinvolte da dissesto, pari al 3,6% dell'intero tracciato stradale delle 6 province.

L'intersezione mostra che il reticolo stradale minore è stato maggiormente impattato dalle frane innescatesi negli eventi di maggio. In Figura 101 è rappresentata la distribuzione in percentuale delle tipologie di strade coinvolte.

In particolare, le strade comunali e le strade vicinali ad uso pubblico sono quelle maggiormente interessate dalle frane, e costituiscono rispettivamente circa il 36,2% e il 35,7% dei tratti stradali coinvolti, seguite dalle strade private con percentuale del 18,5 % della rete impattata totale.

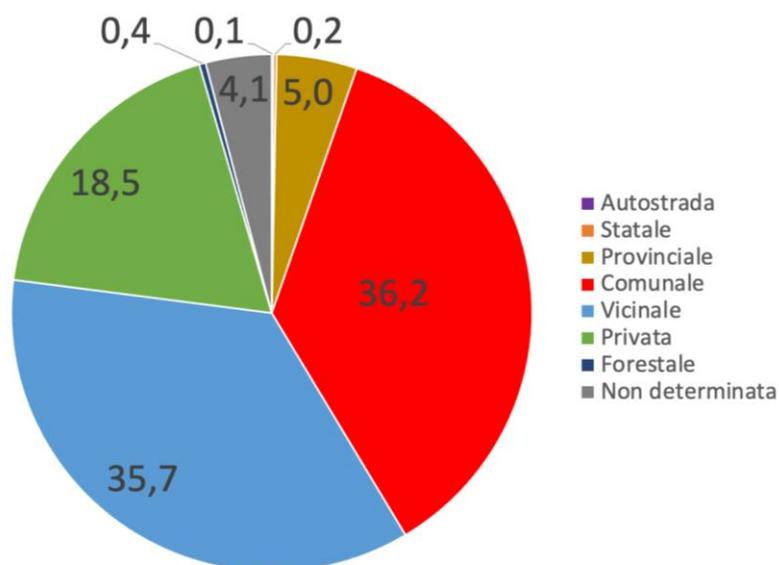


Figura 101 – Distribuzione in percentuale delle tipologie di strade coinvolte da dissesto.

In Figura 102, è mostrato un dettaglio della frazione di Ardiano nel comune di Roncofreddo (FC), oggetto anche di sopralluogo e rilievo con drone da parte del personale del Centro di competenza dell'Università di Firenze (Figura 103), che mostra la distribuzione delle frane del maggio 2023 e il coinvolgimento del tracciato stradale comunale e locale.

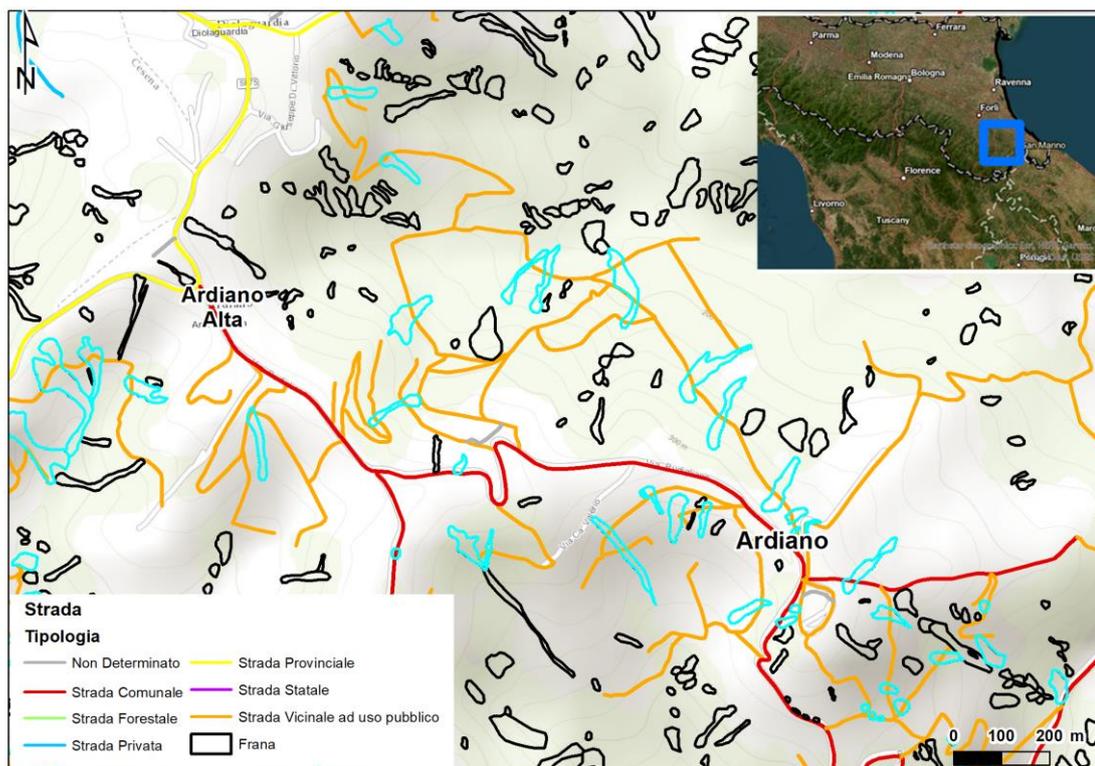


Figura 102 - Estratto della mappa della distribuzione delle strade in corrispondenza dell'abitato Ardiano (FC). In linea azzurra le frane che interagiscono con la rete stradale.



Figura 103 - Rilievo con drone presso Ardiano nel comune di Roncofreddo (FC) effettuato dal Centro di competenza dell'Università di Firenze in data 02/06/2023.

Considerando l'intersezione in ambiente GIS tra frane e tracciato ferroviario, 14 corpi franosi hanno interessato o rasentato in più punti tratti ferroviari, tra Bologna e Firenze, e tra Faenza e Firenze.

La ferrovia Faentina, che collega Firenze a Faenza, è il collegamento che è stato più pesantemente coinvolto, in particolare in provincia di Ravenna (Figura 104).

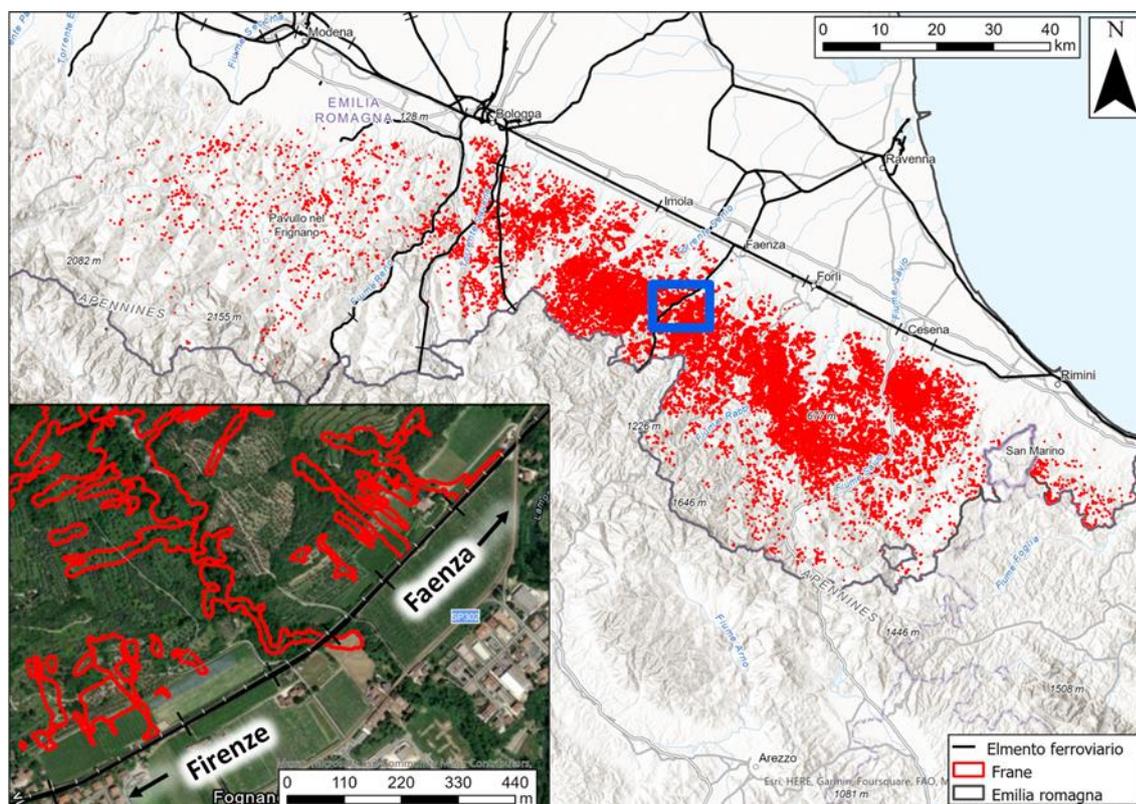


Figura 104 - Distribuzione del tracciato ferroviario (database GIS di regione Emilia-Romagna) della regione.

4.3 Condizioni pluviometriche di innesco delle frane

In questa sezione si presenta il confronto delle misurazioni pluviometriche effettuate tramite la rete regionale, con le soglie pluviometriche di innesco di fenomeni franosi, specificatamente definite per il territorio della regione Emilia-Romagna, al fine di approfondire la correlazione tra la forzante meteorologica e gli effetti al suolo verificatisi nel maggio 2023.

4.3.1 Soglie pluviometriche di innesco

In letteratura, la tecnica più diffusa per la caratterizzazione e la previsione a scala regionale delle condizioni di innesco delle frane pluviointdotte è quella delle soglie pluviometriche. Questa tecnica empirica si basa sull'associazione ad un numero significativo di frane con data di innesco nota delle condizioni pluviometriche registrate al loro innesco. Analizzando tali dati è possibile e identificare, con opportune tecniche statistiche, delle soglie di pioggia che discriminino le situazioni associate all'innesco o meno di fenomeni franosi.

Normalmente, per caratterizzare gli eventi pluviometrici vengono selezionati due parametri di pioggia e nello specifico i più diffusi sono la durata dell'evento pluviometrico (espressa in ore) e la sua intensità media (espressa in mm/ora) (Caine, 1980; Segoni et al, 2018); seguendo questo approccio la soglia viene definita nel grafico intensità durata da una linea che ha la forma di un'equazione di potenza:

$$I = \alpha D^\beta \quad (4)$$

dove I [mm/h] è l'intensità di pioggia, D [h] la sua durata ed α e β sono parametri empirici corrispondenti, rispettivamente, ad intercetta e pendenza della linea retta rappresentata in un grafico bilogartimico.

Nelle applicazioni più recenti, la definizione dei parametri empirici avviene tramite tecniche statistiche che sono tanto più robuste quanto più numeroso è il campione preso in considerazione per le procedure di calibrazione.

Occorre precisare che questa tecnica non consente mai di trovare una soglia che sia il perfetto discriminatore tra le condizioni di pioggia associate all'innesco di frane e le condizioni di pioggia "sicure": tipicamente nella parte alta del diagramma $I-D$ prevarranno le condizioni di franosità e nella parte inferiore condizioni di stabilità, ma in un settore intermedio del grafico le due condizioni coesisteranno.

Per questo, molte soglie di letteratura invece che trovare un discriminatore arbitrario puntano a definire le condizioni minime di innesco delle frane, ovvero definiscono una soglia che sia il limite inferiore di tutte le condizioni di innesco. Ciò avviene a costo di includere al di sopra della soglia un rilevante numero di eventi non franosi, che vengono definiti "falsi allarmi".

Nonostante alcuni autori cerchino di risolvere il problema identificando più soglie parallele (in cui quelle più alte sono caratterizzate da una probabilità diversa di incontrare corretti allarmi e falsi allarmi), è inevitabile che permanga un grado di incertezza non trascurabile.

Per questo motivo, nonostante le soglie pluviometriche siano il modello adottato come base analitica per molti sistemi di allertamento, di solito non è mai previsto un automatismo tra il risultato fornito dalle soglie e il livello di criticità emesso: di solito gli operatori utilizzano le soglie come riferimento ma prendono una decisione in base a una valutazione esperta.

4.3.2 Soglie pluviometriche di innesco per la Regione Emilia-Romagna

Per le analisi sono state prese in considerazione le soglie pluviometriche sviluppate dal Centro per la Protezione Civile dell'Università di Studi di Firenze per la Regione Emilia-Romagna - Agenzia per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile nel corso di convenzioni recentemente concluse (Casagli et al., 2020), in seguito aggiornate nell'ambito di accordi di ricerca con il Dipartimento Nazionale della Protezione Civile (Casagli et al., 2021).

Le soglie in questione si basano su un'evoluzione della tecnica precedentemente descritta delle soglie statistiche intensità vs. durata, basata su una metodologia di analisi semiautomatica (Segoni et al., 2013).

Per fare in modo che le analisi statistiche cogliessero a pieno la variabilità litologica, geomorfologica e climatica del territorio regionale, la definizione delle condizioni di innesco non è stata condotta in modo indifferenziato sull'intera regione, ma sono state realizzate delle soglie sito-specifiche per ognuna delle zone di allerta regionali (Figura 105), come delineate dalla Protezione Civile.

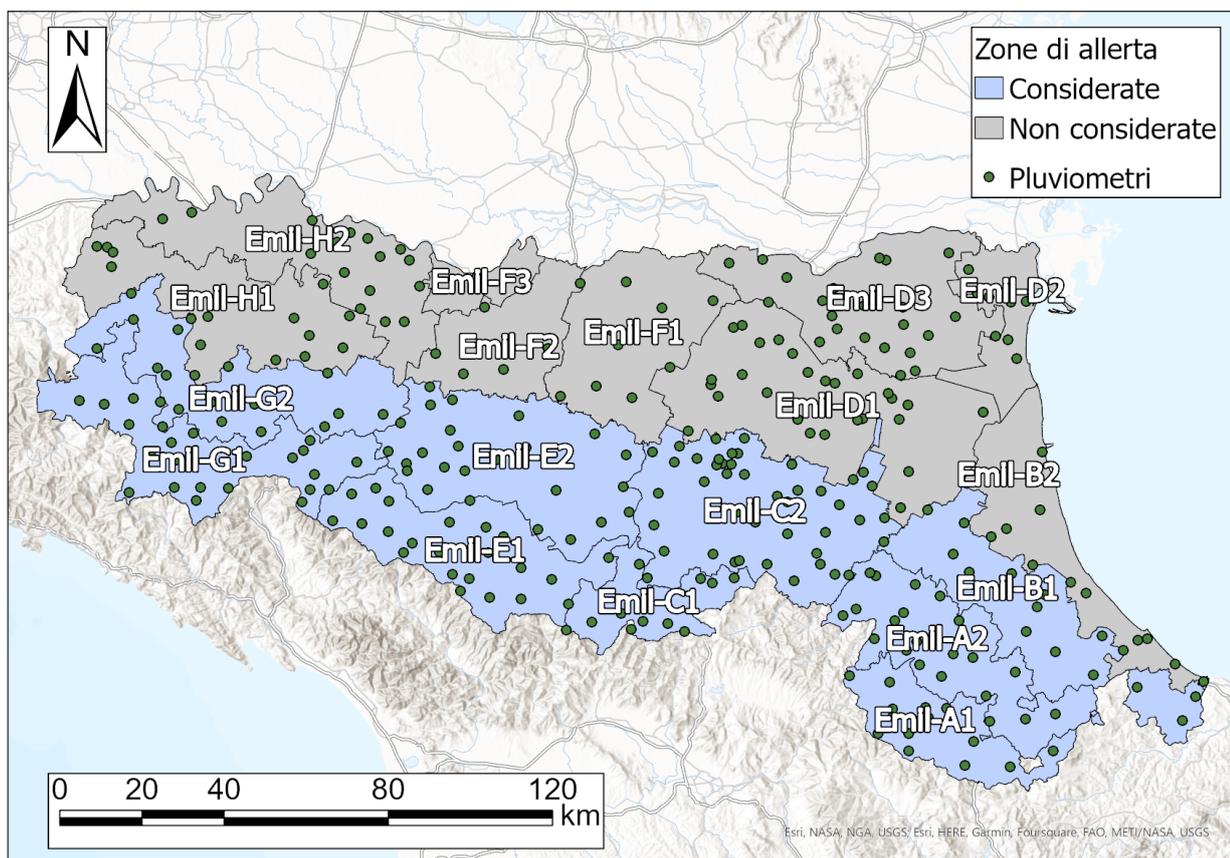


Figura 105 – Suddivisione della Regione Emilia-Romagna in zone d’allerta, secondo i confini e le sigle ufficiali definiti dalla Protezione Civile Regionale. Le soglie sono state definite solo per le zone d’allerta montano-collinari, dove è disponibile uno storico molto consistente di eventi franosi documentati.

In estrema sintesi (per dettagli si veda Segoni et al., 2013), la tecnica di analisi per la definizione delle soglie è basata sul software *MACUMBA* (*MASSive CUMulate Brisk Analyzer*), che analizza in maniera massiva tutti i dati pluviometrici di una zona d’allerta ed opera una sovrapposizione spaziale e temporale con il *dataset* di eventi franosi, distinguendo gli eventi piovosi associati agli inneschi. Tali eventi vengono caratterizzati dal codice in termini di intensità (I) e durata (D), sulla base delle quali vengono definite delle soglie statistiche, calibrate secondo un intervallo di confidenza del 95%, secondo l’equazione 4.

La soglia base così definita separa lo stato di criticità assente con quello di criticità ordinaria (codici colore verde e giallo, rispettivamente) (Figura 106). Al fine di definire delle soglie per la definizione degli stati di criticità moderata ed elevata (codici colore arancio e rosso), la soglia base viene traslata verso l’alto (quindi mantenendo lo stesso valore del parametro β , ma assegnando un valore maggiore del parametro α) secondo i seguenti criteri, visualizzabili anche in Figura 106.

La soglia superiore (separazione tra codice arancio e rosso) viene definita in modo che nel *dataset* di calibrazione il numero di falsi allarmi sia più basso possibile e preferibilmente nullo, dal momento che i falsi allarmi in criticità elevata risultano avere un costo sociale molto elevato e dovrebbero essere evitati il più possibile.

Inoltre, viene verificato che anche i corretti allarmi in codice colore rosso siano corrispondenti a effetti al suolo che, a posteriori, possano essere compatibili col livello di criticità massimo.

La soglia intermedia, di separazione tra criticità ordinaria e moderata (codici colore giallo ed arancio), viene definita per ultima in modo che nella criticità moderata si verifichi un numero “tollerabile” di falsi allarmi. La definizione di “tollerabile” è questione ancora aperta, sia a livello scientifico che operativo: nel sistema preso in considerazione in questa sede, la soglia intermedia è stata calibrata in modo che statisticamente la criticità moderata sia caratterizzata da una quantità di falsi allarmi in media non superiore ad uno all’anno.

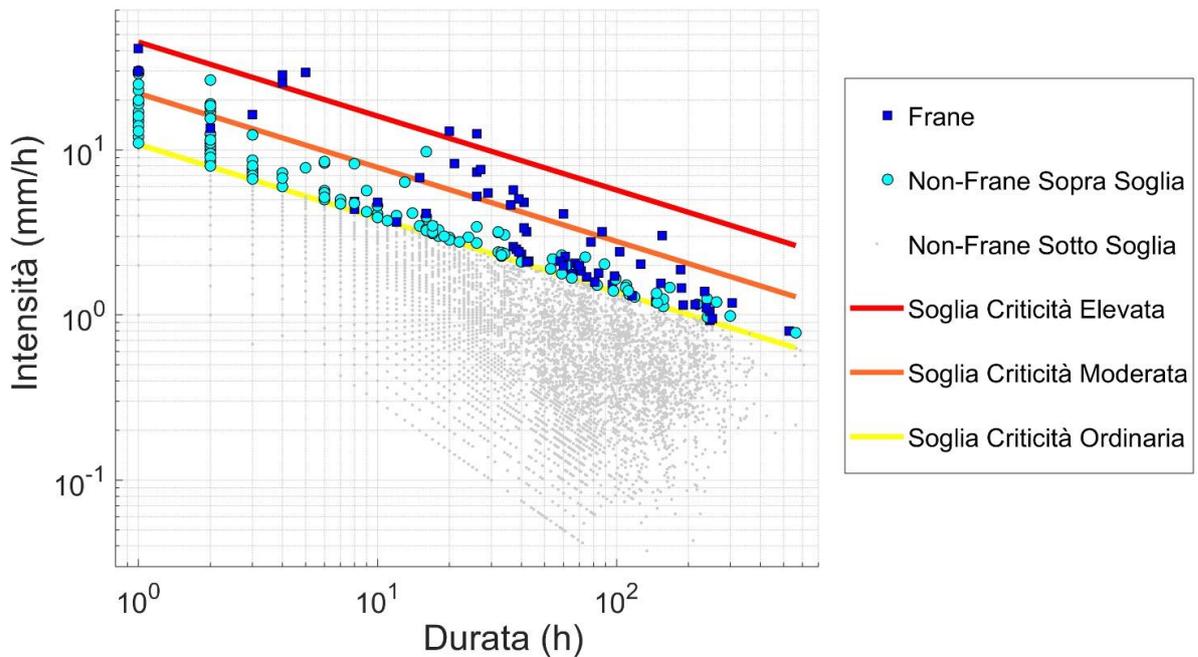


Figura 106 – Esempio di calibrazione su un periodo di 10 anni di un sistema di soglie pluviometriche a criticità crescente, definito considerando sia eventi franosi che non franosi.

L’analisi è stata ripetuta separatamente per ogni zona d’allerta in cui le frane sono un fenomeno geomorfologico atteso (Figura 105), ovvero sono state escluse le zone di pianura. In questo modo, invece di definire un’unica soglia per tutta la regione, sono state definite soglie specificatamente calibrate per le caratteristiche litologiche, geomorfologiche e climatiche di ogni zona d’allerta, permettendo di definire delle correlazioni statistiche molto robuste perché riferite a un contesto ambientale relativamente omogeneo.

Ogni zona d’allerta non è caratterizzata da una singola soglia, ma da un insieme di soglie a criticità crescente, come evidenziato in Figura 106 e Tabella 11.

Tabella 11 – Parametri empirici per la definizione delle soglie pluviometriche di innesco in ognuna delle zone d’allerta montano-collinari della regione Emilia-Romagna. I parametri sono stati quantificati in seguito ad analisi statistica.

Zona d’allerta	α criticità ordinaria	α criticità moderata	α criticità elevata	β (pendenza)
A1	18,50	51	130	-0,82
A2	10,49	50	105	-0,72
B1	6,95	34	80	-0,73
C1	10,40	58	136	-0,92
C2	6,14	20	56	-0,76
E1	8,32	77	150	-0,78
E2	5,49	24	86	-0,79
G1	25,38	90	170	-0,97
G2	6,89	25	95	-0,70

La soglia di criticità ordinaria esprime semplicemente le condizioni minime di innesco di fenomeni franosi: essa è calibrata per prevedere correttamente il 95% delle frane, ma questa efficacia comporta un tasso molto elevato di falsi allarmi, dal momento che queste condizioni di pioggia possono essere associate anche a condizioni di stabilità.

Il livello di criticità moderata, molto superiore al precedente, risolve parzialmente il problema dei falsi allarmi (il livello è calibrato per commetterne in media uno all’anno) ed è quindi associabile ad eventi pluviometrici più estremi, associati con un margine di confidenza maggiore ad eventi franosi.

Il livello di criticità elevata identifica fenomeni piovosi ancora più severi dove in teoria, almeno rispetto al dataset di calibrazione, si arriva ad azzerare il margine di incertezza.

Ne consegue che le soglie proposte sono da considerarsi particolarmente elevate per gli standard di letteratura ed evidenziano condizioni meteorologiche molto estreme, statisticamente connesse a un numero basso di falsi allarmi.

Per completezza e massimo rigore scientifico, occorre specificare che il sistema di soglie sviluppato per la Regione Emilia-Romagna si completerebbe di un ulteriore elemento, ovvero un terzo parametro pluviometrico relativo alla quantità di pioggia totale caduta nel corso dell’evento. Tuttavia, in questa sede questo parametro non è trattato perché del tutto superfluo: esso agisce come una condizione di controllo in caso di eventi meteorici modesti per abbassare la probabilità di avere dei falsi allarmi in criticità ordinaria. Visto che gli eventi trattati in questo studio sono caratterizzati da quantitativi di pioggia estremi, è evidente come questa analisi sia fuori luogo e il parametro risulti del tutto ininfluenza.

4.3.3 Confronto tra eventi pluviometrici del maggio 2022 e le soglie d’innesco

Gli insiemi di soglie precedentemente descritti sono stati confrontati con le piogge registrate dai pluviometri della rete regionale nel corso degli eventi del maggio 2022.

Per chiarezza espositiva, la Figura 107 e la Figura 108 riportano, per ogni zona d’allerta, il confronto con il percorso pluviometrico registrato da un pluviometro di riferimento, caratteristico ed esemplificativo della situazione verificatasi per quella specifica zona d’allerta.

Il percorso pluviometrico è stato descritto in termini di intensità massima registrata in alcuni intervalli temporali di riferimento (1, 6, 12, 24, 36, 48, 72 ore): gli intervalli temporali minori sono adatti a caratterizzare il carattere impulsivo delle piogge di breve durata, mentre quelli maggiori servono a prendere in considerazione l’effetto cumulato di grandi quantità di pioggia, anche se caduta in un lasso temporale ampio.

Dalla Figura 107 si evince che il primo evento pluviometrico (1-4 maggio 2023) è stato caratterizzato da intensità di pioggia che hanno superato le soglie di criticità moderata in tutte le zone d’allerta centro-orientali (da Emil-A1 a Emil-E2), ad eccezione della Emil-E1.

Il superamento avviene in corrispondenza dell'intensità relativa a diverse durate, evidenziando il carattere eccezionalmente estremo sia delle precipitazioni giornaliere che di quelle cumulate su due e tre giorni.

In particolare, per la zona d'allerta Emil-C2 viene superata anche la soglia d'allerta rossa, relativa alla criticità elevata.

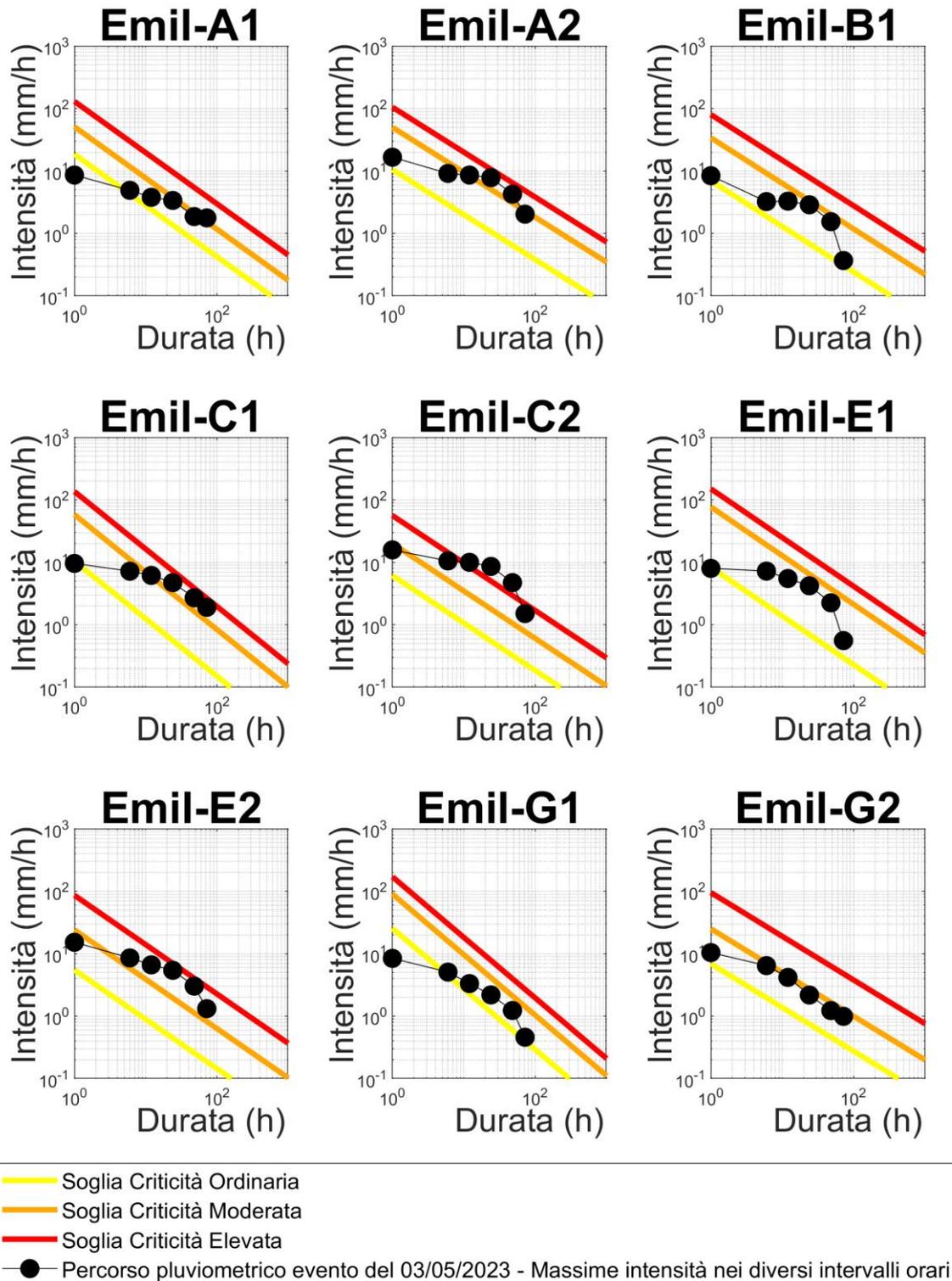


Figura 107 – Confronto, per le diverse zone di allerta riportate in Figura 105, tra le soglie pluviometriche di criticità idrogeologica e le registrazioni pluviometriche relative agli eventi meteorologici del 3-4 maggio 2023.

I grafici relativi all'evento del 15-18 maggio 2023 (Figura 108) mettono in luce una situazione ancora più critica: in tutte le zone d'allerta è stata superata la soglia di criticità moderata (livello arancione) e in molte zone d'allerta (A1, A2, C1, C2, E2, G1) anche la soglia di criticità massima.

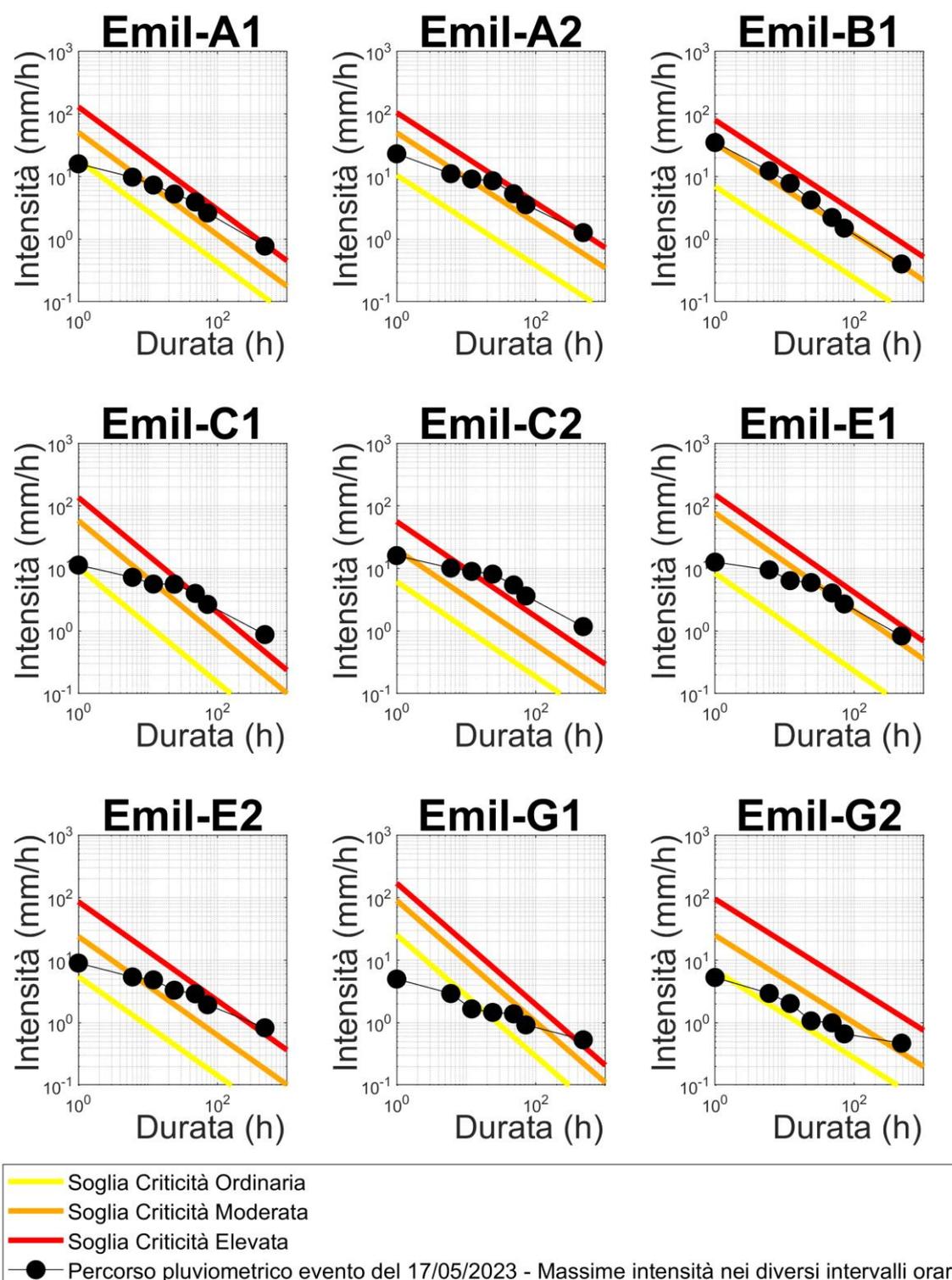


Figura 108 – Confronto, per le diverse zone di allerta riportate in Figura 105, tra le soglie pluviometriche di criticità idrogeologica e le registrazioni pluviometriche relative agli eventi meteorologici del 15-18 maggio 2023.

Il confronto tra i superamenti e i periodi di cumulo di pioggia corrispondenti è particolarmente significativo, in quanto mette in luce che questo secondo evento è stato molto critico per quanto riguarda i picchi di precipitazione nelle durate medio-brevi (12 e 24 ore), ma ancora più critica è stata la situazione sul lungo periodo, in cui si risente dell'effetto congiunto dei due eventi di pioggia del 3-4 e del 15-18 maggio. In tal caso, infatti, si verificano i superamenti più marcati delle soglie pluviometriche arancioni e rosse.

Un altro elemento da prendere in considerazione è la distribuzione spaziale delle situazioni di criticità precedentemente descritte e la loro pervasività.

Come recepito anche dalla normativa sulla Protezione Civile (L 1/2018, art. 7), la severità di un evento e delle misure emergenziali necessarie a fronteggiarlo dipendono anche dall'estensione spaziale dello stesso.

La Figura 109 mette in evidenza come la situazione di criticità sia estesa in modo diffuso a tutto l'arco appenninico montano e collinare dell'Emilia-Romagna centrale ed orientale. Questo scenario evidenzia una situazione ben più severa di quella desumibile dal mero codice-colore segnalato da un singolo pluviometro.

Da un punto di vista di risposta in termini di protezione civile, se la maggior parte dei pluviometri di una zona d'allerta denota un determinato codice-colore, lo scenario da fronteggiare complessivamente sarebbe ben più grave di quanto lecito aspettarsi dall'analisi di un'unica stazione di misura.

Questo è un problema annoso e noto in letteratura, non ancora perfettamente risolto nei modelli previsionali: i modelli a soglie si basano di solito sulla probabilità di innesco, mentre le strutture della protezione civile sono interessate a ricomporre uno scenario d'evento. Il caso in questione è esemplificativo di come zone d'allerta con tutti i pluviometri in criticità moderata siano andate incontro ad uno scenario ben più critico in termini di effetti al suolo effettivamente verificatisi.

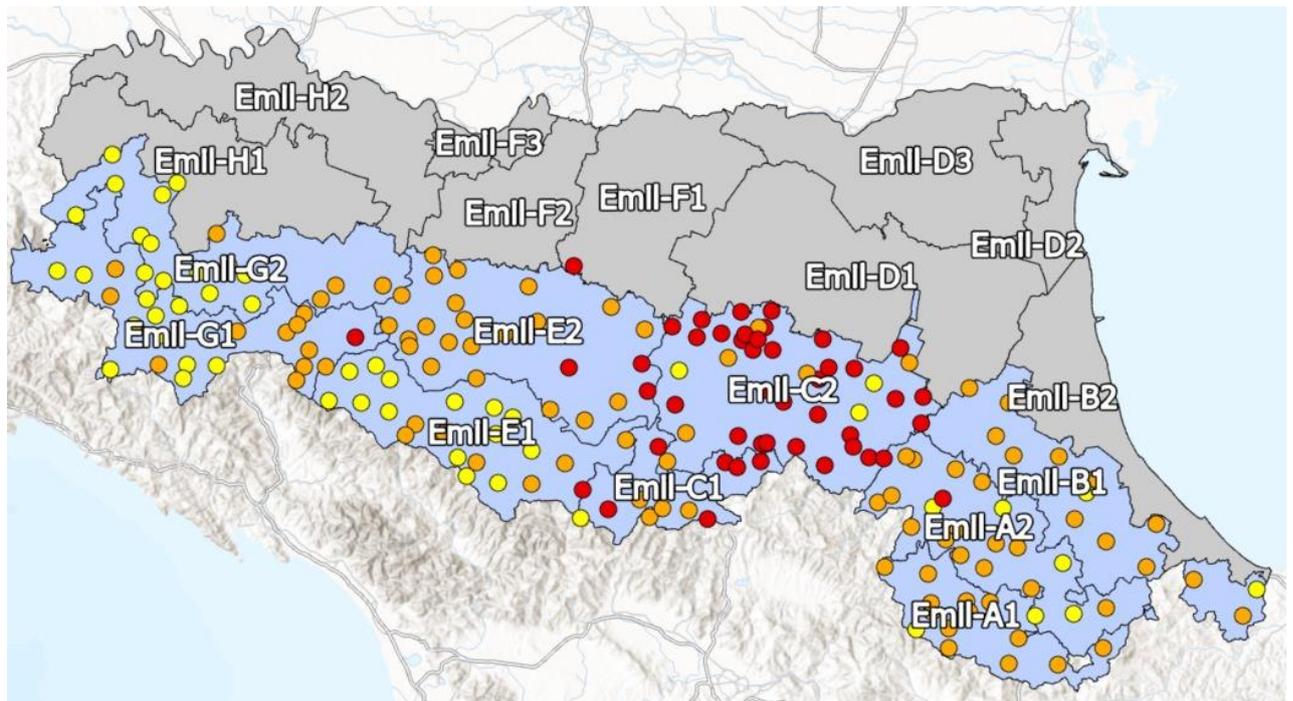


Figura 109 – Quadro sinottico delle condizioni più critiche registrate dai pluviometri ubicati nelle zone d'allerta analizzate nel corso del mese di maggio 2023.

Dal momento che gli eventi meteorici oggetto di questo studio sono stati caratterizzati da un'elevata intensità di pioggia, e dal momento che l'intensità è il parametro delle piogge su cui i cambiamenti climatici stanno influenzando maggiormente, risulta importante approfondire il confronto tra piogge e soglie per le così dette "intensità di picco", ovvero le intensità registrate in lassi di tempo ristretti.

Analizzando le serie pluviometriche è emerso che tutte le situazioni di criticità moderata ed elevata (Figura 109) si sono verificate in seguito al superamento delle relative soglie per cumulate di durate di 12, 24 o 48

ore e, in misura ancora più estrema, per la pioggia cumulata su due settimane in cui vengono cumulati gli effetti di entrambi gli eventi pluviometrici.

5 Caratterizzazione dei principali cambiamenti nell'uso del suolo

5.1 Ruolo della copertura forestale nella regimazione delle acque

Nel presente paragrafo si analizza il ruolo esercitato dalla copertura forestale nel prevenire o mitigare il dissesto. L'interazione tra la foresta ed il ciclo dell'acqua è funzione del contesto climatico e dipende sia dalla scala spaziale e temporale di analisi dei fenomeni e sia dalle caratteristiche della vegetazione forestale (Iovino *et al.*, 2009). I processi attraverso i quali il bosco si interfaccia con le precipitazioni sono: a) l'intercettazione delle precipitazioni a livello delle chiome; b) l'assorbimento a livello del suolo; c) l'evapotraspirazione.

L'intercettazione consiste nella capacità del soprassuolo di catturare una parte delle precipitazioni prima che queste raggiungano il suolo. Quando le capacità di intercettazione sono saturate la frazione di pioggia non trattenuta dalla copertura forestale arriva al suolo direttamente o scorrendo lungo i rami ed i fusti. L'intercettazione varia con le caratteristiche del popolamento forestale e con l'intensità e la durata delle precipitazioni. Il potere di intercettazione diminuisce all'aumentare dell'intensità delle precipitazioni.

L'infiltrazione rappresenta la quota di acqua di precipitazione che penetra nel suolo. Dell'acqua infiltrata una parte evapora, un'altra parte viene utilizzata dalla vegetazione ed un'altra parte va ad alimentare le falde idriche sotterranee. La quantità di acqua infiltrata dipende dalla morfologia del versante, dalle caratteristiche della vegetazione e, soprattutto, da caratteristiche del suolo (umidità iniziale, permeabilità e porosità ecc.) e da durata ed intensità delle precipitazioni. L'acqua scorre in superficie invece di infiltrarsi quando la capacità di infiltrazione è saturata e, con eventi di forte intensità, la maggior parte delle precipitazioni tende a scorrere in superficie.

L'evapotraspirazione, infine, rappresenta la quota di acqua che torna all'atmosfera dalla vegetazione sotto forma di vapore acqueo. La stima dell'evapotraspirazione rappresenta un aspetto importante del bilancio idrologico di bacino ma questo processo ha un ruolo limitato nel corso di eventi di precipitazione estremi. L'acqua che sfugge all'intercettazione, all'infiltrazione nel suolo ed all'evapotraspirazione rappresenta il deflusso che scorre lungo i versanti ed è responsabile dell'erosione e, soprattutto, della formazione dei deflussi di piena. L'evento di piena si verifica quando si verificano precipitazioni intense che si manifestano per un periodo di tempo sufficientemente lungo da saturare le capacità di ritenzione del bacino (intercettazione, assorbimento del suolo ed evapotraspirazione). Uno dei problemi nei confronti della percezione da parte dell'opinione pubblica è proprio questo aspetto: l'azione regimante della foresta è importantissima e fondamentale ma, quando si verificano eventi meteorici eccezionali la capacità di ritenzione viene saturata.

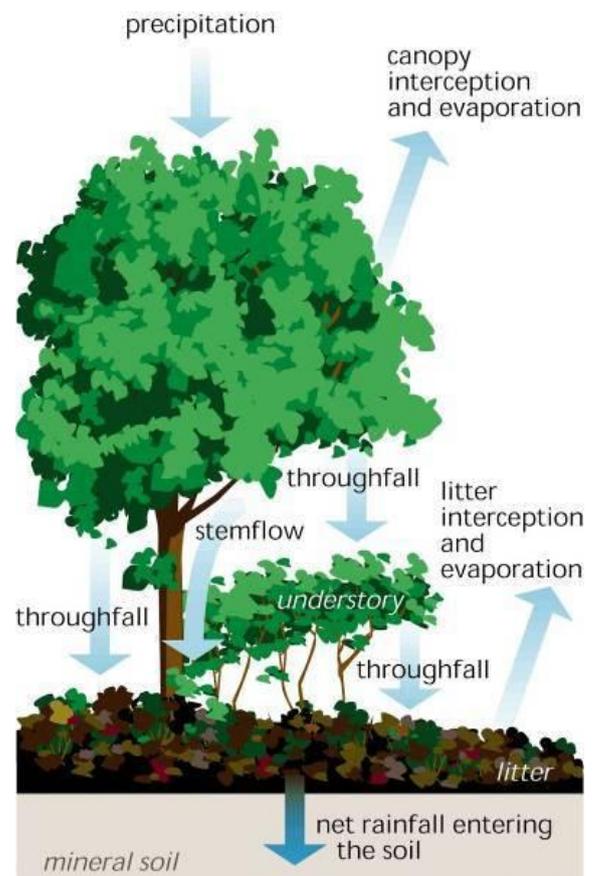


Figura 110 - Modalità di intercettazione, trasporto, immagazzinamento e deflusso dell'acqua in foresta

Anche in queste condizioni la foresta ha un importante ruolo di mitigazione in quanto può ridurre la magnitudo, mitigando gli impatti, e rallentare l'ondata di piena rendendo disponibili tempi maggiori per l'allerta della popolazione e la messa in opera di misure di riduzione dei rischi.

In Emilia-Romagna un esempio illuminante sul ruolo che può avere la vegetazione forestale nei confronti della regimazione delle acque è fornito dalla diga di Ridracoli.

La diga di Ridracoli è inserita in un bacino che ha una copertura forestale superiore all'80% ed è costituito in parte da popolamenti di alto fusto o in avviamento all'alto fusto (tra cui tutte le foreste inserite nel Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi, Falterona e Campigna) ed in parte da popolamenti cedui, gestiti o invecchiati, e da boschi di neoformazione (tra cui le aree appartenenti al Demanio Regionale). Questo bacino svolge un ruolo molto efficace nel combattere l'erosione.

Quale è il ruolo delle foreste nel deflusso?

- 1) Riduzione del picco della portata e
- 2) Ritardo nel tempo delle ondate di piena

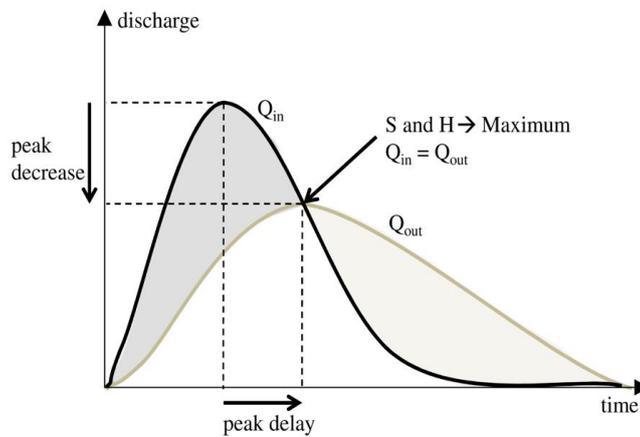


Figura 111 - Ruolo delle foreste nel deflusso

Erosione

Dati forniti da Romagna Acque

- Erosione stimata: **40-45000 m³/anno** (stima di progetto)
- Erosione reale: **25000 m³/anno** (analisi sonar dei fondali)

Fattori pro-erosione

- **Degradazione biologica:** riduzione della sostanza organica dei suoli e dei processi di biodiversità
- **Degradazione chimica:** acidificazione, salinizzazione, perdita di nutrienti e fertilità
- **Degradazione fisica:** distruzione della struttura del suolo dovuta a:
 - **Erosione idrica:** rill, gully e frane
 - **Erosione eolica:** apporti/asporti delle frazioni fini



Figura 112 - Importanza della copertura forestale nella riduzione dell'erosione: l'esempio di Ridracoli (FC)

Infatti il progetto delle diga stimava una erosione di 40-45.000 m³ per anno mentre l'erosione reale (misurata da Romagna Acque con analisi sonar dei fondali) è stata di circa 25.000 m³/anno. La minore erosione che si è verificata è dovuta alla quantità ed alla qualità della copertura vegetale del bacino della diga.

Viene quindi da chiedersi quale sia il ruolo della gestione forestale. La gestione forestale deve essere orientata a livello di bacino al mantenimento di un'adeguata copertura forestale e, a livello di popolamento, alla valorizzazione, dove possibile, di strutture articolate che permettono lo sviluppo di una copertura

erbacea ed arbustiva e un'adeguata conservazione del suolo. In questo modo si massimizza l'effetto "spugna" oltre a ridurre in modo significativo l'erosione.

Per la valorizzazione ed il mantenimento di questi aspetti sarebbe di grandissima importanza dotare i bacini collinari e montani di un Piano di gestione che permetterebbe di garantire nel tempo e nello spazio i requisiti richiesti.

5.2 Ruolo della copertura forestale in eventi eccezionali

Circa il ruolo esercitato dalla foresta nel corso delle ondate di piena, si può osservare che la copertura forestale (indipendentemente da densità composizione, struttura e modalità di gestione) non può impedire le ondate di piena quando si verificano eventi di intensità e durata tali da saturare l'effetto "spugna" della foresta.

L'importanza di questo fattore di saturazione è ancora più rilevante quando si verificano precipitazioni intense ravvicinate (come accaduto sia nel 1939 e sia nel 2023). Una volta saturata la capacità di assorbimento della vegetazione e del suolo, il tempo necessario al ripristino della capacità di effetto "buffer" o spugna nei confronti delle precipitazioni dipende dalle caratteristiche del suolo e della morfologia ma è comunque relativamente lungo (dell'ordine delle settimane). La elevata copertura forestale, soprattutto in caso di foreste non gestite o abbandonate ed in particolare i cedui, può essere controproducente nel caso di eventi molto intensi in quanto ceppaie molto ingrandite diventano meccanicamente instabili quando aumenta la fluidità del suolo, il trasporto solido di necromassa va ad alimentare le lave torrentizie e va ad ostruire ponti costituendo un fattore di aumento del rischio (Comiti *et al.*, 2016). Nel corso di eventi eccezionali, una volta saturata la capacità di assorbimento, le buone pratiche di gestione forestale del bacino possono contribuire a ridurre il trasporto solido di materiale legnoso (molto pericoloso per ponti ed infrastrutture) e, garantendo un buon ancoraggio ed un buon rapporto tra altezza, peso ed apparato radicale, limitare il ribaltamento di tronchi che oltre ad alimentare il trasporto solido può dare origine a nicchie di distacco.



Figura 113 - Popolamenti intensamente utilizzati ed abbandonati (in particolare popolamenti cedui) possono dare origine a dissesti localizzati che favoriscono il dissesto.

L'aumento di copertura forestale, soprattutto in caso di foreste non gestite e, soprattutto, di cedui abbandonati può essere controproducente in caso di eventi estremi in quanto la competizione all'interno del popolamento forestale riduce la resistenza meccanica indebolendo il popolamento (e la capacità di ancoraggio delle radici), favorendo ribaltamenti di ceppaie) mortalità che va ad alimentare il trasporto solido delle lave torrentizie e a mettere in pericolo infrastrutture lungo i corsi d'acqua (Comiti *et al.*, 2016).



Figura 114 - Nel corso degli ultimi decenni è aumentata la quota di detriti legnosi trasportati a valle dalle ondate di piena. A sx si può vedere l'accumulo di legname osservato per le vie centrali di Garessio (CN) nel corso dell'alluvione del 2 ottobre 2020. La maggior parte di questi detriti non proviene dai boschi ripari ma dalle foreste situate nel bacino di origine dell'ondata di piena (Comiti et al. 2016). A dx si può vedere un castagneto ceduo abbandonato ed invecchiato e la quantità di necromassa accumulata che potenzialmente può essere trasportata a valle da una ondata di piena.

Un'attenta gestione del territorio agricolo e forestale e una sistematica manutenzione della rete idraulica minore possono svolgere una importante funzione di prevenzione e mitigazione nei confronti dei dissesti locali, particolarmente in ambiti già predisposti a questo pericolo naturale, che, in occasione di precipitazioni molto intense, possono essere all'origine di frane e alimentare il trasporto solido. Un eventuale aumento della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni, prefigurato da alcuni scenari climatici, unito alla diminuzione della manutenzione idraulica del territorio, può avere delle conseguenze disastrose sulla franosità, particolarmente in ambiti già predisposti a questo pericolo naturale (Persichillo et al., 2017; Santoro et al., 2021).

Nel momento in cui si verificano eventi alluvionali spesso viene anche chiamata in causa la vegetazione in alveo e ripariale. Questo è un argomento di estrema importanza e deve essere valutato con attenzione lungo tutto il corso d'acqua. La vegetazione ripariale svolge, da un punto di vista idraulico, un ruolo di fondamentale importanza durante gli eventi di piena: aumenta la scabrezza, cioè la resistenza che l'acqua incontra scorrendo e quindi protegge le sponde dall'erosione, rallenta la velocità del flusso ed intrappola sedimenti e materiali trasportati dalla corrente.

Diverso è il discorso in tutti i casi in cui sulle sponde del fiume troviamo coltivazioni agricole, specie esotiche o opportuniste (ad es. la robinia) o coltivate dall'uomo (ad es. i pioppi ibridi). In questi casi la vegetazione presente non svolge il ruolo idraulico ed "ecologico" altrettanto efficace di quello svolto dalla vegetazione spontanea e gli alberi e gli arbusti presenti sono facilmente sradicati e vanno ad alimentare il detrito trasportato durante le piene.

Nella gestione degli ambienti ripariali è inoltre indispensabile contemperare le esigenze carattere idraulico-sistematorio, volte a garantire l'efficienza idraulica delle sezioni di deflusso, con quelle di naturalità. La vegetazione lungo i corsi d'acqua ha infatti un ruolo multifunzionale e, dal punto di vista naturalistico, rappresenta il più importante elemento delle reti ecologiche. La gestione della vegetazione riparia deve

quindi avere finalità di manutenzione e caratteristiche tali da non comportare alterazioni permanenti dello stato dei luoghi (DL 42/04); deve tendere al recupero ed alla salvaguardia delle caratteristiche naturali degli alvei (Dir. PAI 15 aprile 1988) e deve essere applicata con criteri di tipo colturale che preservano le funzioni anti-erosive, naturalistiche, ambientali e paesaggistiche che le formazioni riparie assicurano. Di prassi nell'alveo inciso si dovrebbero effettuare interventi frequenti di manutenzione che permettono la conservazione delle associazioni vegetali autoctone allo stadio giovanile, quando è massimizzata la flessibilità ed è limitata l'occupazione dello spazio che può ostruire la sezione idraulica.

Nella prima fascia di vegetazione dal ciglio di sponda (circa 10 m) si dovrebbero effettuare interventi colturali con rimozione degli alberi instabili o deperienti, ma con conservazione degli alberi habitat e di una copertura arborea ed arbustiva non inferiore al 20%. Naturalmente gli interventi effettuati devono tenere conto della multifunzionalità delle foreste riparie (biodiversità, paesaggio, ricreazione). In ogni caso il taglio deve essere sempre di tipo selettivo e colturale, limitando la ceduzione ad ambiti specifici e il taglio raso a motivi di sicurezza (Ebone *et al.*, 2014).

Occorre precisare che la vegetazione ripariale in alveo aumenta la scabrezza dell'alveo fluviale e quindi la resistenza che lo stesso esercita sul moto della corrente. Ciò può avere delle importanti conseguenze in termini di incremento dei livelli di transito della corrente di piena; questo effetto va attentamente valutato in quanto può ridurre sensibilmente, talora in maniera inaccettabile, i franchi idraulici nelle sezioni fluviali posti a monte, favorendo le esondazioni. Pertanto, sia nella gestione ordinaria e straordinaria di opere esistenti sia nella progettazione di opere nuove, occorre valutare attentamente, caso per caso, i trade-off tra gli aspetti idraulici e tutti gli altri servizi ecosistemici svolti da questa fascia di vegetazione, effettuando, per quanto necessario, modellazioni matematiche specifiche riferite ai diversi possibili assetti vegetazionali (tenendo conto di tutti i servizi ecosistemici richiesti a questa) e definendo, in base alle risultanze di queste ultime, opportuni protocolli di gestione della vegetazione ripariale.

5.3 Le dinamiche di copertura forestale

Per lo studio delle dinamiche di uso dei suoli nella regione Emilia-Romagna (Santi, 2022) si sono raccolte e analizzate le seguenti cartografie storiche:

- la cartografia realizzata in periodo pre-unitario nel territorio dei Ducati e nelle Legazioni Pontificie ad opera del Genio Austriaco, recentemente digitalizzata e interpretata ad opera del Servizio Cartografico della Regione Emilia-Romagna e pubblicata sul Geoportale della Regione (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/approfondimenti/database-uso-del-suolo>)
- le carte di uso del suolo degli anni 1976, 1994 e 2017, realizzate dalla Regione Emilia-Romagna e pubblicate sul Geoportale della Regione;
- la carta di uso del suolo dell'anno 1954, realizzata dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e pubblicata sul Geocatalogo (sezione "Geologia, sismica e suoli") della Regione (<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/webgis-banche-dati>);
- la Carta Forestale del Regno d'Italia del 1936, realizzata nello stesso anno dall'allora Milizia Forestale, recuperata e restituita in formato digitale in un WebGis (<http://carta1936.dicam.unitn.it/>) grazie al lavoro svolto dall'unità dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio (INFC) del Corpo Forestale dello Stato e dal Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'Economia Agraria CREA-MPF di Trento, in collaborazione con il CREA-SEL di Arezzo e il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università degli Studi di Trento.

Tutte le carte di uso del suolo, compresa la Carta Forestale del Regno d'Italia, sono state scaricate in formato vettoriale (shapefile). Va sottolineato come le cartografie siano state realizzate in tempi differenti, utilizzando metodi e scale di rilevamento e classificazioni degli usi del suolo diverse tra loro. La Carta Forestale è stata scaricata dal WebGis sopraindicato nelle sue componenti "fuso ovest" e "fuso est" in formato vettoriale, che in seguito sono state unite a formare un unico shapefile.

Dal Geoportale della Regione Emilia-Romagna si sono scaricati anche i limiti di demarcazione pianura-collina-montagna (limiti altitudinali) relativi al territorio regionale e in formato shapefile. Tali limiti si presentano come area raffigurante le zone pianeggianti dell'Emilia-Romagna, consentendo così una utile suddivisione del territorio per fasce altitudinali.

Ai fini dell'analisi è stato poi necessario raccogliere un DEM (Modello Digitale di Elevazione). L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), sezione di Pisa, mette a disposizione una serie di DEM a risoluzione 10 metri per l'intero territorio italiano (http://tinality.pi.ingv.it/Download_Area2.html), in formato raster (GeoTIFF) e nel sistema di proiezione "WGS 84 / UTM zona 32N (EPSG:32632)". Facendo riferimento ai confini amministrativi dell'Emilia-Romagna, si sono scaricati DEM a 10 m a copertura del territorio regionale; i singoli DEM sono stati poi uniti a formare un unico raster.

Dall'archivio dell'ISTAT (<https://www.istat.it/it/archivio/222527>) si sono scaricati i limiti delle unità amministrative – costruiti sui livelli regione, provincia, comune e ripartizione geografica – aggiornati al 1° gennaio 2021 in versione dettagliata e formato shapefile.

Carta di uso del suolo del 1853

Nel 1999 la Regione Emilia-Romagna ha costruito una cartografia topografica storica assemblando le produzioni pre-Unità d'Italia (1828-1853) relative al suo territorio, ricomponendole alla scala 1:50.000 con il taglio dei moderni fogli dell'I.G.M. Il territorio regionale è coperto dalla Carta Topografica Austriaca (scala 1:86.400) – che si compone di diverse cartografie, realizzate a più riprese, del tutto omogenee per scala, disegno e simbologia – e, per una piccola porzione, dalla Carta Topografica degli Stati di terraferma di Sua Maestà il Re di Sardegna del 1853 (scala 1:50.000).

Il dettaglio delle suddette carte ha permesso, tramite interpretazione dei simboli grafici riguardanti sia ambiti agricoli che naturali, la costruzione di un database dell'uso del suolo "storico". La base dati è costituita da due coverage ARC/INFO: una poligonale con le delimitazioni dell'uso del suolo e una di punti contenente informazioni relative alla presenza di miniere, mulini, punto di ancoraggio (porti). L'interpretazione è stata svolta direttamente al video sulle scansioni degli originali in bianco e nero.

Carta Forestale del Regno d'Italia del 1936

La Carta Forestale del Regno d'Italia è stata prodotta dalla Milizia Nazionale Forestale nel 1936, quando l'Italia comprendeva l'Istria e parte della Slovenia. È rappresentata da 276 fogli in scala 1:100.000, derivanti da rilievi originali in scala 1:25.000.

I fogli che compongono la base cartografica furono resi disponibili grazie al lavoro dell'ex Corpo Forestale dello Stato. Il lavoro di scansione e georeferenziazione dei cartacei ha permesso di ottenere i fogli in formato raster, dai quali poi si sono prodotti shapefile attraverso un processo di vettorializzazione; i vettoriali sono stati creati digitalizzando manualmente i confini delle aree boscate presenti nei raster. La vettorializzazione consente l'accesso alle informazioni della Carta tramite un database collegato ai file vettoriali e contenente i dati vegetazionali dell'epoca.

L'importanza della carta non si limita soltanto all'Italia: nel 1936 i confini dello stato italiano erano diversi da quelli odierni; infatti, la cartografia ricopre anche aree che successivamente sono entrate a far parte di Slovenia, Croazia e Francia.

L'area minima cartografabile scelta è di 0,14 ha sul terreno. Una dimensione simile risulta compatibile con mappe dell'epoca prodotte in Europa alla stessa scala.

La Carta differenzia i boschi in otto categorie fisionomiche, con sottocategorie relative alla forma di governo o, nel caso delle resinose, per presenza di specie. È una carta che descrive il bosco con un'ottica di produzione legnosa forestale. L'utilizzo dei colori nella legenda rispecchia nel modo più fedele possibile i colori presenti nelle carte stampate (<https://www.yumpu.com/it/document/read/16092336/la-vettorializzazione-della-carta-forestale-del-regno-ditalia-del-1936>) (Ferretti *et al.*, 2018).

Le classi dell'uso del suolo sono state definite a partire dalle cinque legende topografiche originarie. Il riconoscimento delle classi non dipende, quindi, da una fotografia della realtà investigata, ma da un'interpretazione della realtà che il topografo militare dell'epoca aveva effettuato durante il rilevamento e da un'astrazione simbolica che il disegnatore ha usato nel restituire la carta.

Nell'impostazione della metodologia di lavoro non si è tenuto conto del concetto di unità minima cartografabile, comunemente usato nelle cartografie tematiche, perché le aree delimitate durante l'interpretazione sono costituite da oggetti che il cartografo di allora aveva già rappresentato, rendendole automaticamente da "cartografabili" a "cartografate". Questa scelta ha permesso di salvaguardare l'informazione originale contenuta nella carta, portando il dettaglio ad un'unità minima di 1.000 m².

La legenda dell'uso del suolo è costruita su 3 livelli, con uno schema di tipo Corine Land Cover (CLC), con un criterio di massima somiglianza possibile a quella dell'edizione del 2003, per rendere confrontabili i prodotti. Rispetto alle categorie CLC si sono rese necessarie alcune variazioni dovute al grande lasso di tempo intercorso tra il periodo storico considerato e quello in cui sono nate le specifiche del progetto europeo. Va sottolineato come alcune suddivisioni derivino da segni convenzionali specifici a cui il topografo militare ha dato enfasi, ritenendole notizie importanti da censire: ogni cartografia non mostra una visione completamente oggettiva della realtà, ma filtrata attraverso gli scopi di chi l'ha redatta.

Carta di uso del suolo del 1954

La carta dell'uso del suolo del 1954 è stata prodotta mediante l'interpretazione di foto aeree pancromatiche dei voli G.A.I. e W.W.S. del 1954-1955 a scala nominale 1:33.000 e 1:60.000. La metodologia ha seguito le seguenti fasi principali di lavoro: ortorettifica delle foto aeree, verifica dell'accuratezza delle ortofoto, scelta del sistema di nomenclatura e dei criteri di delineazione, delineazione e fotointerpretazione delle ortofoto. L'obiettivo della carta era valutare l'effetto della variazione di uso del suolo sull'instabilità dei versanti nell'Appennino emiliano-romagnolo.

Come unità minima cartografabile si è scelto un valore areale sul terreno di 2,25 ha, corrispondente a una superficie cartografica di 36 mm². Per gli oggetti che presentano forme allungate si è assunta una dimensione minima di 25 m di larghezza sul terreno. La legenda dell'uso del suolo si articola su 2 livelli con 19 classi. Le classi di primo livello fanno riferimento alle classi di secondo e terzo livello della nomenclatura Corine Land Cover, mentre le classi di secondo livello corrispondono alle categorie relative alla banca dati USO94; si è reso necessario l'accorpamento di alcune classi per le peculiarità dell'area di studio e per le qualità e caratteristiche delle fotografie aeree sottoposte a interpretazione visuale. Alle classi di secondo livello se ne aggiungono due corrispondenti a "zone non fotointerpretabili" (codice "9Z") e "zone non fotointerpretate" (codice "ae"). Il sistema di nomenclatura adottato assicura la possibilità di eseguire confronti e analizzare i cambiamenti tra l'uso del suolo relativo all'anno 1994 e quello relativo al periodo 1954-1955 (https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/cartografia/pdf/webgis-suoli/USO_SUOLO_54.pdf).

Carta di uso del suolo del 1976

La carta dell'uso del suolo del 1976, in scala 1:25.000, è stata una delle prime cartografie di dettaglio a coprire l'intero territorio regionale. Il metodo di lavoro per la sua concretizzazione ha previsto l'interpretazione e la restituzione cartografica di fotografie aeree, di tipo aerofotogrammetrico, con pellicole a colori (in prevalenza) per gli anni dal 1976 al 1978 e in bianco/nero per gli anni dal 1971 al 1973, ad una scala media di 1:13.500. La restituzione cartografica è stata fatta sulla vecchia base topografica dell'I.G.M. in scala 1:25.000. La recente digitalizzazione della carta ha previsto un lavoro di riorganizzazione della legenda secondo le direttive del Corine Land Cover e di georeferenziazione delle tavolette I.G.M.

Si è scelta un'area minima cartografabile di 0,375 ha. Le tavolette presentavano un elevatissimo numero di poligoni cartografati al di sotto di tale soglia, più di 30.000 sull'intero territorio regionale, che sono stati eliminati. La legenda dell'uso del suolo (Tab. 4) è costruita su 3 livelli della CLC e 29 categorie, 27 nella legenda originale.

Carta di uso del suolo del 1994

La carta dell'uso del suolo del 1994 deriva dalla digitalizzazione delle carte dell'uso del suolo prodotte alla fine degli anni '90. Tali carte furono realizzate mediante fotointerpretazione e restituzione cartografica delle fotografie aeree del "Volo Italia '94" sulle basi topografiche in scala 1:25.000 della regione Emilia-Romagna. Le foto del suddetto volo furono realizzate su pellicola ad alta definizione in bianco e nero, alla scala 1:75.000 circa; come ausilio alla fotointerpretazione furono impiegati gli ingrandimenti fotografici dello stesso volo, alla scala 1:25:000, per un totale di 166 tavole. In un secondo tempo le carte sono state tutte acquisite in formato digitale e unite a formare un'unica copertura sul territorio regionale.

Nella prima edizione dell'uso del suolo del 1994 (realizzata nel 2010) si era presa come riferimento un'area minima cartografabile molto grande (2,25 ha) – questo costituisce un limite notevole nel confronto con database di uso del suolo caratterizzati da un'area minima più piccola – e si era definita una legenda non in linea con la classificazione della Corine Land Cover, poi solo parzialmente adattata ad essa. La necessità di effettuare un confronto con gli altri database di uso del suolo ha dato il via ad un progetto di riqualificazione dell'uso del suolo del 1994 che ha portato alla costruzione di un database avente le stesse caratteristiche di quelli del 2003 e del 2008, sia come unità minima, sia come metodo di classificazione. Per la riclassificazione sono state utilizzate le ortofoto in bianco e nero riprese tra giugno e novembre 1994, utilizzando come base la copertura poligonale del database 2003: in pratica è stato fatto un aggiornamento a ritroso del database 2003. La realizzazione è stata effettuata a video con interpretazione delle ortofoto e restituzione delle variazioni in ambiente GIS. Come area minima cartografabile si è scelto un valore di 1,56 ha, decisamente più piccolo dei 2,55 ha dell'edizione 2010. La dimensione minima considerata è 75 m in generale e 25 m per determinate categorie.

La legenda dell'uso del suolo si articola su 4 livelli della Corine Land Cover (CLC) e 83 categorie. I primi tre livelli derivano dalle specifiche del CLC, mentre il quarto è stato elaborato in riferimento alle specifiche definite a scala nazionale dal Gruppo di Lavoro Uso del Suolo del CPSG-CISIS ed è incentrato su tematiche specifiche d'interesse regionale.

Carta di uso del suolo del 2017

La carta dell'uso del suolo del 2017 è stata realizzata mediante fotointerpretazione a video delle ortofoto TeA 2017. Si tratta di fotografie aeree ad alta definizione, con pixel di 20 cm – quindi con un notevole aumento di risoluzione rispetto a quelle a 50 cm del passato – riprese nel periodo aprile-agosto 2017 con fotocamera digitale, disponibili nella versione a colori (RGB) e in quella all'infrarosso (IR). Per la produzione del database sono state prese a riferimento le specifiche europee del progetto Corine Land Cover. Le attività di fotointerpretazione e di costruzione della banca dati sono state svolte in ambiente GIS.

Si è scelta un'area minima cartografabile di grande dettaglio, pari a 0,16 ha sul terreno, oltre a una dimensione minima di 7 m per gli elementi a sviluppo lineare. Un'unità minima dal tale livello di dettaglio consente di individuare quasi sempre ogni singola entità territoriale destinata ad uno specifico uso. Per l'aggiornamento al 2017 sono state prese in considerazione tutte le superfici che presentavano cambiamenti di uso del suolo superiori a 400 m².

La legenda dell'uso del suolo si articola su 4 livelli e 90 categorie. I primi tre livelli derivano dalla Corine Land Cover, mentre in un quarto livello sono rappresentate le categorie di dettaglio in gran parte definite dal Gruppo di Lavoro di Uso del Suolo che ha operato negli anni passati nell'ambito del CPSG-CISIS.

I dati raccolti sono stati quindi preparati tramite software QGIS 3.16.4 ed armonizzati in modo da potere rendere possibile il confronto tra diverse classificazioni di uso del suolo. Ne sono risultati i dati riportati in Tabella 12, che sono rappresentati in forma grafica nella Figura 115, dai quali è evidente l'aumento della copertura forestale del periodo esaminato.

Tabella 12 – Copertura forestale (ha) della Regione Emilia-Romagna nel periodo 1853-2017

Anno	1853	1936	1954	1976	1994	2017
Superficie forestata (ha)	353442	377519	332029	394144	532633	555525

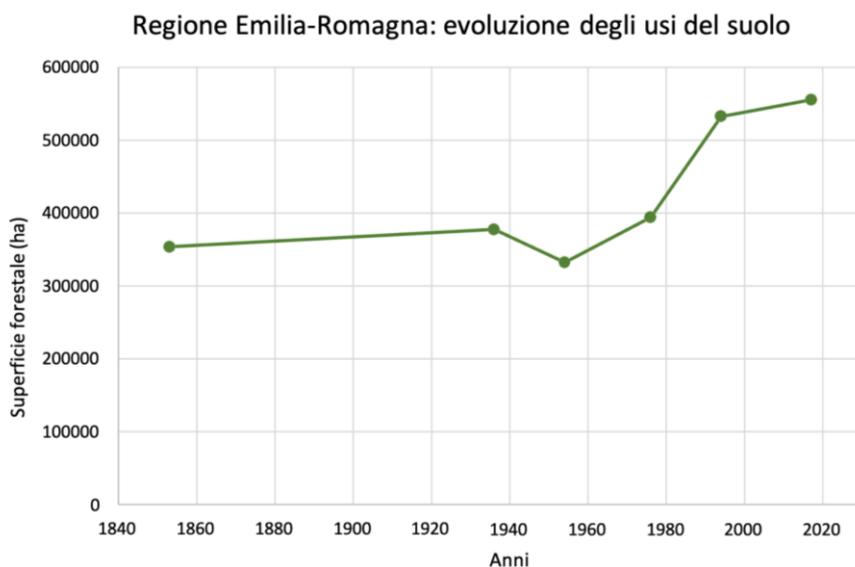


Figura 115 - Andamento della copertura forestale nella Regione Emilia-Romagna nel periodo 1853-2017.

Come si osserva dalla Tabella 12, le foreste della regione Emilia-Romagna hanno fatto registrare un incremento di superficie da 353.442 ha nel 1853 a 555.525 ha nel 2017.

La fase espansiva ha però preso il via soltanto dopo la Seconda guerra mondiale mentre tra il 1853 e la metà del XIX° secolo si è rilevata una sostanziale stabilità dei boschi, confermata anche dai dati estrapolati dalla Carta Forestale del Regno d'Italia del 1936 (377.519 ha). Tra 1954 e 2017 la copertura forestale si è estesa su 287.543 ha di nuova superficie in Emilia-Romagna (neoforestazione), a fronte di una contrazione di 58.717 ha (deforestazione). Il bilancio è nettamente a favore dell'espansione della copertura forestale.

L'espansione delle foreste regionali è andata a scapito delle aree agricole e di praterie, pascoli, cespuglieti e brughiere d'alta quota. La spazializzazione delle informazioni ha dimostrato che tale trend è riscontrabile in collina e montagna, mentre la pianura emiliano-romagnola è stata oggetto per lo più di una notevole urbanizzazione, massima nei vent'anni compresi tra 1954 e 1976, a sfavore ancora una volta dell'agricoltura. L'espansione delle superfici forestali nel corso degli anni testimonia come la vegetazione abbia colonizzato ex coltivi e aree marginali e si sia innescato un processo di successione secondaria.

5.4 Il cambio di copertura forestale tra il 1936 ed il 2014

Il cambio di copertura forestale si può apprezzare mettendo a confronto la mappatura della copertura forestale del 1936, riportata nella Figura 116, con quella della copertura forestale del 2014, riportata nella Figura 117.

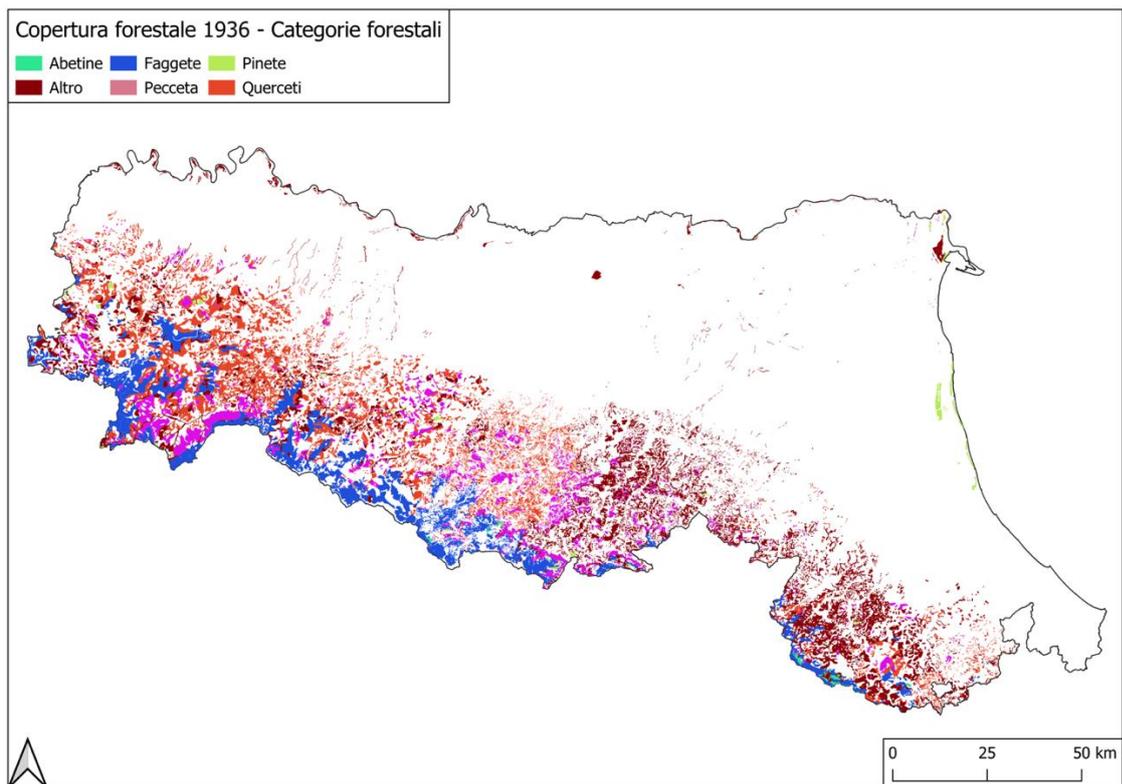


Figura 116 - Copertura Forestale RER 1936.

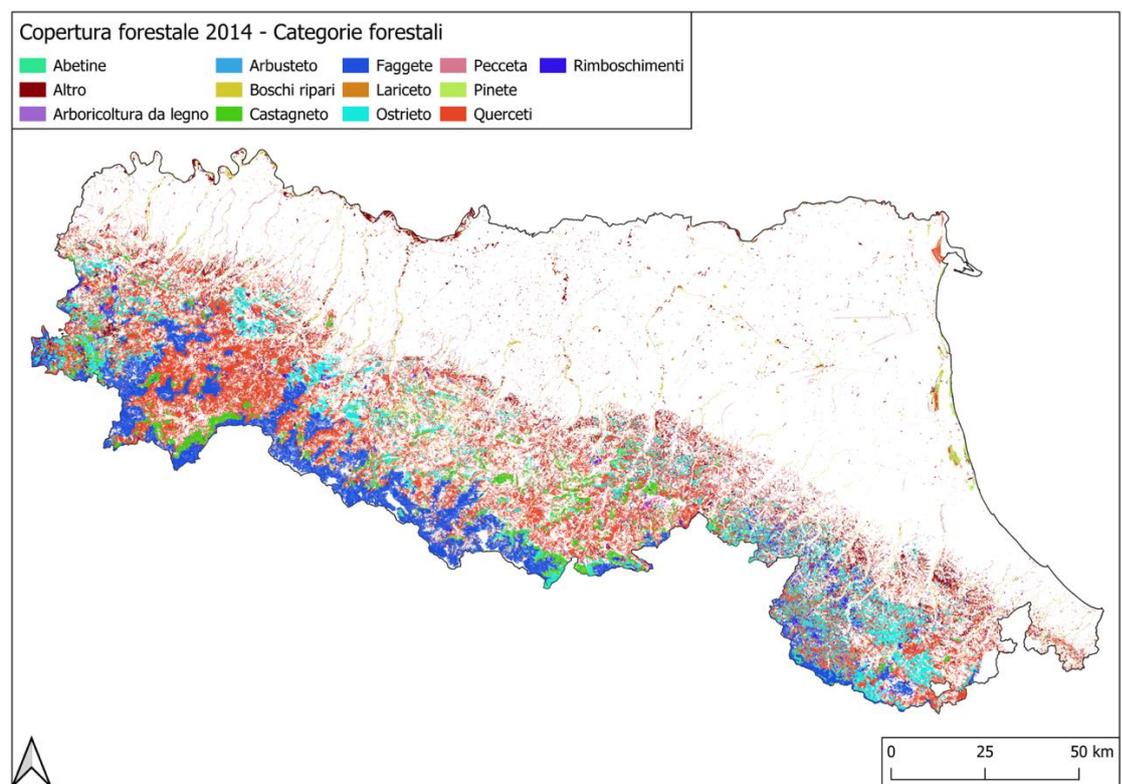


Figura 117 - Copertura Forestale RER 2014.

I dati 1936 e 2014 sono solo parzialmente confrontabili in quanto le definizioni di bosco non sono le stesse, le classificazioni delle categorie forestali non coincidono e la scala e la definizione della carta non sono le stesse. Pur tenendo conto dei limiti indicati le differenze sono significative ed evidenziano un incremento della superficie forestale (quale risultato della differenza tra aree imboschite ed aree deforestate). Questa differenza, pur essendo inferiore alla media nazionale, è comunque rilevante essendo aumentata del 34% passando dal 18,7 al 28,4% (per un totale di oltre 216.000 ha).

Tabella 13 - Confronto tra superfici forestali del 1936 e del 2014, suddivise per categorie/tipo di copertura forestale e quota.

Categoria	1936	1936	2014	2014
	Superficie ha	Quota media m s.l.m.	Superficie ha	Quota media m s.l.m.
Abetine	1.725	995	3.128	1.060
Altro	137.650	444	99.159	417
Arboricoltura da legno			543	169
Arbusteto			53	648
Boschi ripari			27.355	284
Castagneti	57.666	600	42.672	697
Conifere	2.089	820		
Faggete	86.140	1.103	101.685	1.183
Lariceto			289	1.295
Ostrieto			95.468	587
Pecceta	249	889	4.035	995
Pinete	4.810	469	7.460	421
Querceti	123.268	528	224.467	533
Rimboschimenti			23.801	628
	413.597	731	630.116	686

L'aumento di copertura ha interessato, in modo non omogeneo, tutte le quote e le categorie forestali ma ha inciso maggiormente, in termini di superficie, nei piani altitudinali collinare e montano.

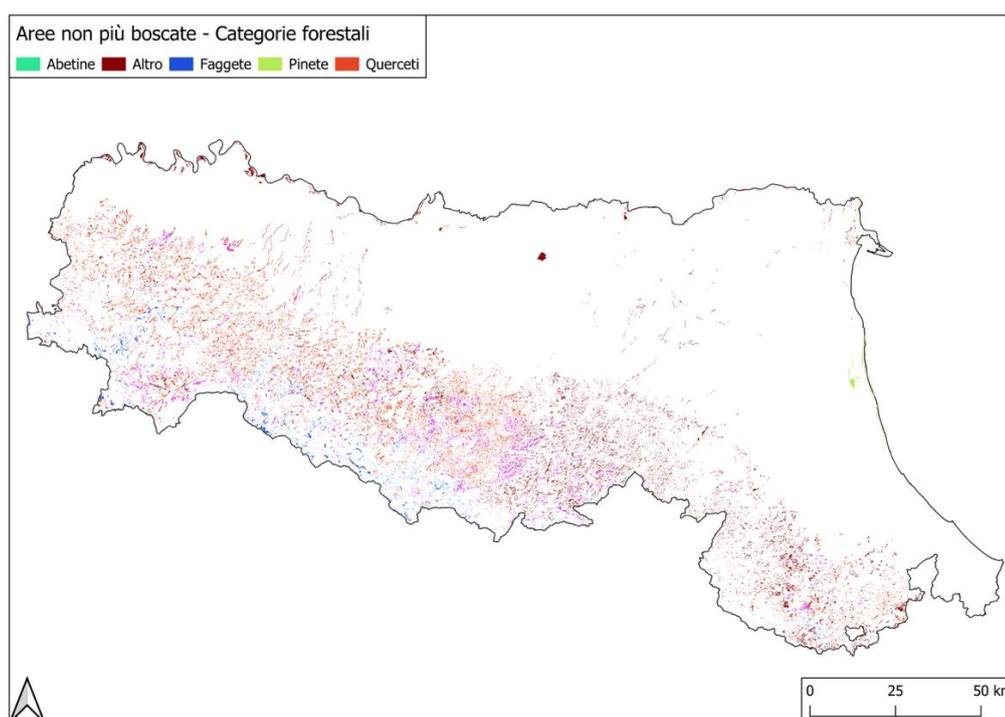


Figura 118 - Mappa delle aree interessate da deforestazione nel periodo 1936-2014.

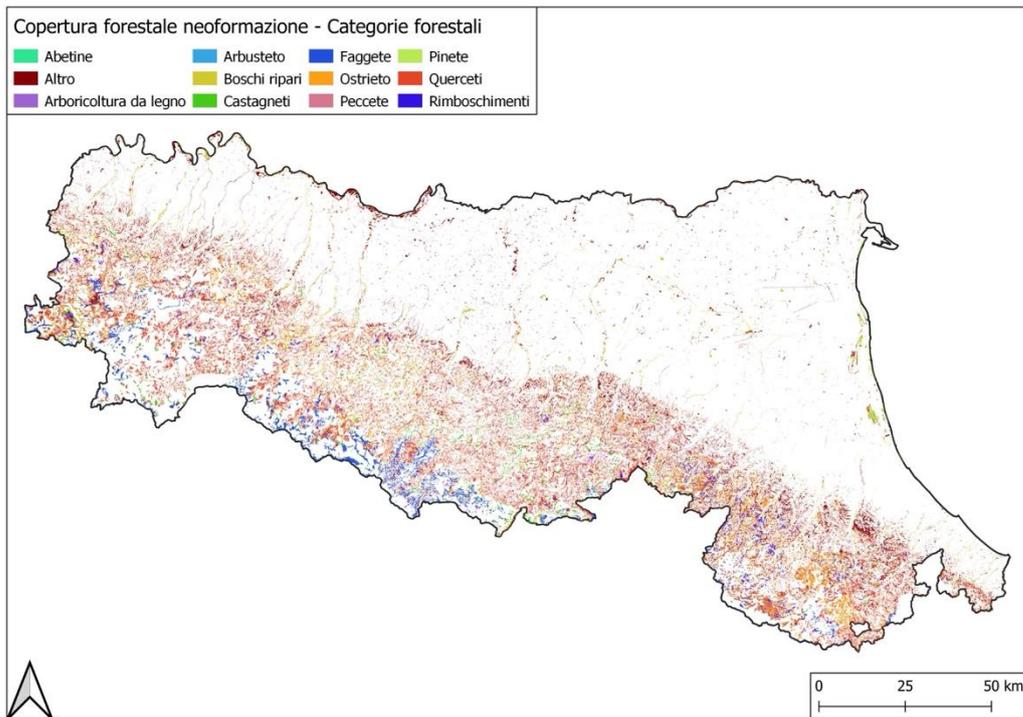


Figura 119 – Mappa delle aree interessate da neoformazione forestale dal 1936 al 2014.

Tabella 14 - Bosco di neoformazione (2014 vs 1936) per categoria forestale (a sx) e settore altitudinale (a dx).

<i>Categoria</i>	<i>Superficie (ha)</i>	<i>Quota_media (m s.l.m.)</i>		
Abetine	958	1.038		
Altro	78.273	390		
Arboricoltura da legno	415	166		
Arbusteto	28	531		
Boschi ripari	23.345	269		
Castagneto	12.156	684		
Faggete	22.830	1.172		
Lariceto	181	1.284		
Ostrieto	44.869	568		
Pecceta	2.019	977		
Pinete	4.830	400		
Querceti	112.387	519		
Rimboschimenti	14.680	602		
<i>Totale</i>	<i>316.971</i>	<i>662</i>		

Classe altitudinale	Superficie di neoformazione
m	ha
0-200	52.008
201-600	149.214
601-1000	84.665
1001-1400	27.445
1401-1800	3.639
>=1801	0
Totale	316.971

Le categorie forestali che hanno avuto la maggiore espansione sono stati i querceti e gli aceri frassineti (inseriti nella categoria altro). I settori altitudinali con maggiore espansione del bosco sono stati il settore collinare e montano.

5.5 Superficie Agricola Utilizzata (SAU)

A ottobre 2020 risultavano attive in Emilia-Romagna 53.753 aziende agricole con una superficie agricola utilizzata (SAU) di 1.045 mila ettari (pari al 46,6% della superficie complessiva regionale). La superficie agricola totale (SAT) è di 1.326 mila ettari (59,1% della superficie regionale). La Regione Emilia-Romagna è una delle regioni italiane in cui la superficie agricola è ancora ampiamente superiore alla superficie forestale, mentre a livello nazionale si sta andando verso una sostanziale equivalenza tra i due dati. Per quanto riguarda la superficie agricola ci sono fonti dei dati di difficile raccolta ed interpretazione fino al 1980, data del primo censimento nazionale dell'Agricoltura. A partire da quella data la disponibilità dei dati è buona ed il tipo di raccolta permette anche una analisi a scala provinciale più raffinata.

Per quanto riguarda la Superficie Agricola Utilizzata (SAU), sulla base degli ultimi 4 Censimenti dell'Agricoltura, nelle province di Bologna, Forlì-Cesena, Rimini e Ravenna la SAU ha subito, a partire dal 1980, un crollo, con ritmi di diminuzione progressivi: si è ridotta di 10.900 ettari nel decennio 1980-90, di 24.600 ha nel 1990-2010 e di 28.000 ha nel successivo decennio. I dati del Censimento dell'agricoltura del 2020 non sono ancora disponibili a livello disaggregato, ma l'andamento generale vede una ancora più marcata riduzione delle aziende agricole e una riduzione, in termini relativi minore, della SAU.

Nel complesso nel periodo considerato la SAU si è ridotta al 57% del dato del 1980 e quella collinare al 73%. Più marcato il crollo delle aziende agricole che sono passate da 25.000 a 9.300 (in montagna sono ora il 32% rispetto al 1980 e in collina il 39% sempre rispetto al 1980). Questi processi hanno determinato una crescita della SAU media per azienda che è passata da 8,3 a 15,3 ettari, una superficie media che si può valutare molto

contenuta vista la prevalenza di prati e pascoli. Un ultimo dato di interesse è relativo al lavoro: l'ISTAT calcola che, nei territori di collina e montagna delle 4 Province, nel periodo considerato le giornate di lavoro siano passate da 6,59 a 2,61 milioni, una diminuzione del 60%. Se nel 1980 si investivano in media in un anno 32 ore di lavoro per ettaro di SAU, il dato più recente è di 18.

5.6 Rischio idraulico e consumo di suolo

La Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni (Direttiva Alluvioni o Floods Directive – FD) ha lo scopo di istituire un quadro di riferimento per la valutazione e la gestione dei rischi di alluvioni. E' stata attuata in Italia con il D.Lgs. 49/2010.

L'ISPRA, al fine di aggiornare la mappa della pericolosità idraulica sull'intero territorio nazionale, ha proceduto nel 2017 alla nuova Mosaicatura nazionale (v. 4.0 - Dicembre 2017) delle aree a pericolosità idraulica, perimetrate dalle Autorità di Bacino Distrettuali. La mosaicatura è stata realizzata secondo i tre scenari di pericolosità del D. Lgs. 49/2010: elevata, P3, con tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti); media, P2, con tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti); bassa, P1 (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi). Le aree a pericolosità idraulica elevata in Italia risultano pari a 12.405 kmq, le aree a pericolosità media ammontano a 25.398 kmq, quelle a pericolosità bassa (scenario massimo atteso) a 32.961 kmq. Le Regioni con i valori più elevati di superficie a pericolosità idraulica media, sulla base dei dati forniti dalle Autorità di Bacino Distrettuali, risultano essere Emilia-Romagna, Toscana, Lombardia, Piemonte e Veneto.

In particolare, la Regione Emilia-Romagna risulterebbe essere di gran lunga la regione con la maggiore superficie compresa nelle aree a pericolosità media P2 (oltre il 45% del territorio regionale) (Trigila *et al.*, 2018). Va precisato che questa particolarità dell'Emilia-Romagna deriva dal fatto che la Regione, a differenza delle altre, ha deciso di considerare nella mappatura anche le aree che risultano allagabili da parte del reticolo artificiale di pianura (ovvero dalla rete di bonifica), anziché soltanto quelle interessate dall'erosione dal reticolo idrografico naturale; essendo la rete di bonifica normalmente dimensionata per tempi di ritorno <<100 anni, praticamente tutta l'area di pianura ricade in area P2.

La Pericolosità idraulica è stata individuata sulla base dei Piani di Assetto Idrogeologico – PAI Frane (v. 4.0 – 2020-2021) e delle mappe di pericolosità idraulica redatte dalle Autorità di bacino distrettuali, nell'ambito del II ciclo di gestione, secondo gli scenari previsti dal D. Lgs 49/2010 di recepimento della Direttiva Alluvioni (2007/60/CE). A livello nazionale, la percentuale delle aree occupate da superfici artificiali (suolo consumato) nelle aree a pericolosità idraulica è pari al 6,4% in aree a pericolosità elevata (HPH – High Probability Hazard) allagabili a seguito di eventi con tempo di ritorno tra 20 e 50 anni, 9,3% in aree a pericolosità media (MPH – Medium Probability Hazard) allagabili per eventi con tempo di ritorno tra 100 e 200 anni e all'11,1% per le aree a bassa pericolosità (LPH – Low Probability Hazard) allagabili con tempo di ritorno superiore a 200 anni.

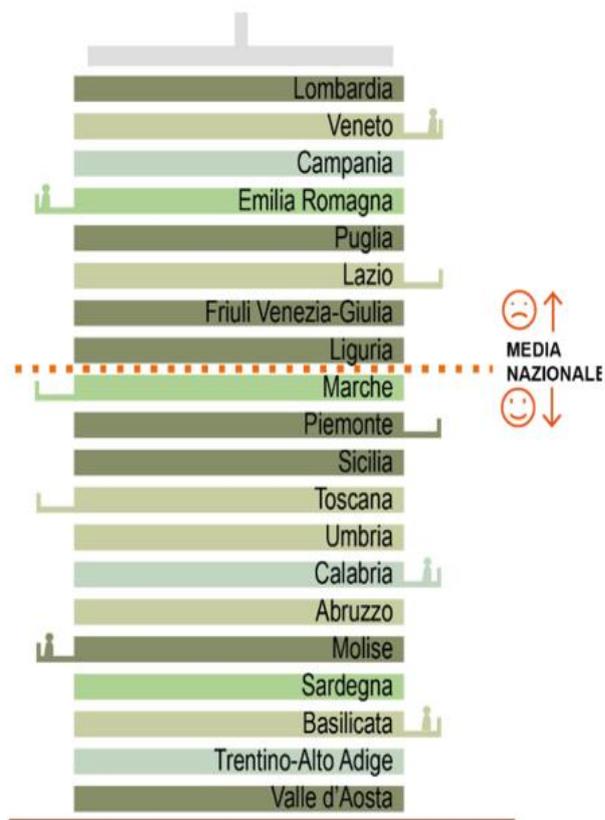
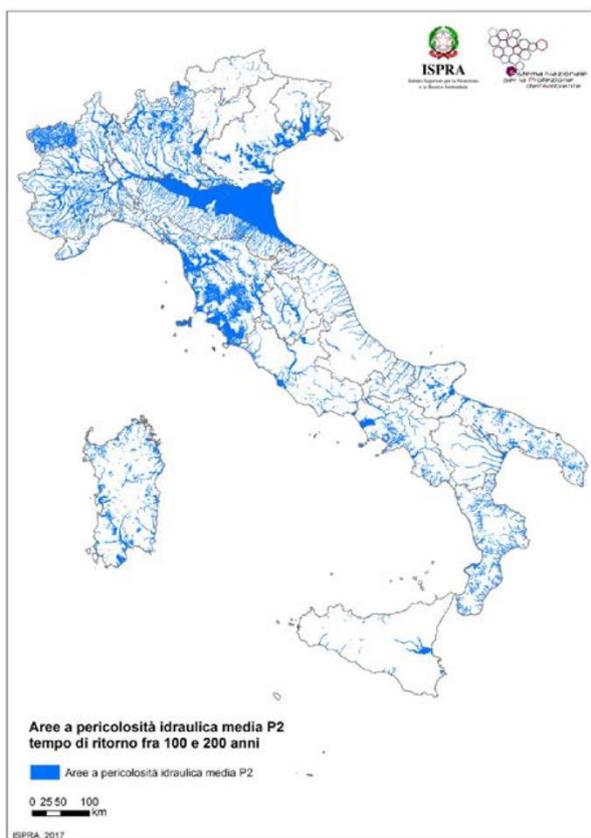


Figura 120 - A sinistra mappatura delle aree a pericolosità idraulica media (aree P2, allagabili per eventi con tempo di ritorno tra 100 e 200 anni) ed a destra consumo di suolo in Italia nel 2023

Lo scorso mese di ottobre 2023 è stato pubblicato, Sistema Nazionale per la Protezione dell’Ambiente (SNPA), il rapporto 2023 su “Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici”. Questo rapporto fornisce il quadro aggiornato dei processi di trasformazione della copertura del suolo e permette di valutare il degrado del territorio e l’impatto del consumo di suolo sul paesaggio e sui servizi ecosistemici (Munafò, 2023).

Secondo questo rapporto il consumo di suolo a livello nazionale è ancora molto elevato e la Regione Emilia-Romagna si conferma tra le regioni in cui il consumo di suolo è più elevato. Il fattore che rende la Regione Emilia-Romagna particolarmente sensibile a questo problema sarebbe proprio la combinazione tra consumo di suolo e pericolosità idraulica evidenziata nella figura 148 del Report, qui riprodotta nella Figura 121.

A livello nazionale nell’ultimo anno, l’incremento di suolo artificializzato ricadente in aree a pericolosità idraulica media (MPH), raggiunge in valore assoluto i 917,6 ettari, dei quali 433,1 ricadrebbero in Emilia-Romagna, 59,2 in Piemonte, 58,9 in Toscana e 56,1 in Lombardia (Tabella 104). Per quanto riguarda le aree a pericolosità idraulica media, a livello nazionale il 12,8% delle aree edificate (69.550 ettari) ricade in queste zone. Dai dati si evince che la regione con i valori più elevati è l’Emilia-Romagna dove circa il 63% della superficie edificata (33.116 ettari) ricade in zone a pericolosità idraulica media. Secondo quanto si è detto in precedenza, anche questo dato è fortemente influenzato dalla decisione della Regione Emilia-Romagna di includere nella mappatura delle aree allagabili anche le aree inondabili per insufficienza del reticolo artificiale di bonifica; dato che questo reticolo interessa capillarmente tutta l’area di pianura della regione e che esso è tradizionalmente dimensionato per tempi di ritorno notevolmente inferiori a quelli caratteristici delle aree P2, il confronto con le altre regioni non può essere considerato omogeneo.

In definitiva, il dato relativo alla Regione Emilia-Romagna riportato nel Report, non essendo omogeneo a quello delle altre regioni, appare sensibilmente sovrastimato. Ovviamente, questa constatazione non diminuisce in alcun modo l'importanza di mantenere un elevato controllo nei confronti del fenomeno del consumo di suolo.

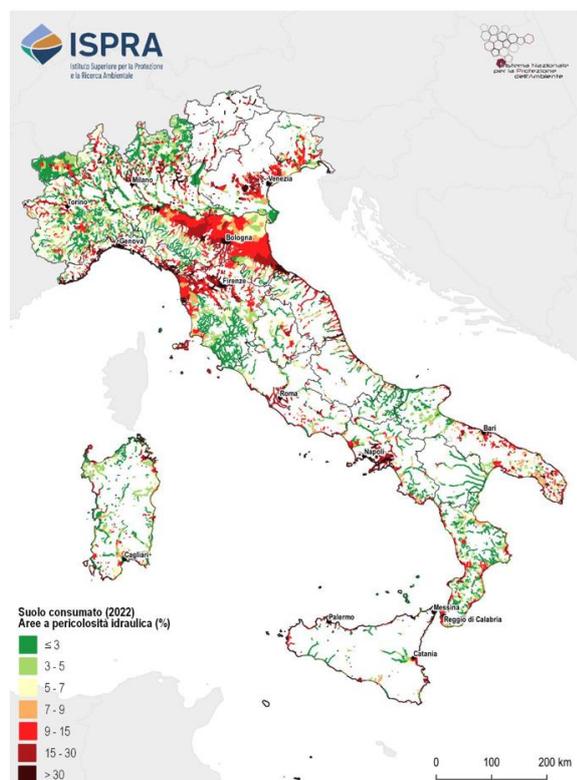


Figura 148. Suolo consumato in percentuale nelle aree a pericolosità idraulica media (MPH). Fonte: elaborazioni ISPRA su cartografia SNPA e ISPRA

Regione	Area Regione	Aree a pericolosità idraulica media P2 (D.Lgs. 49/2010)	
	km ²	km ²	%
Piemonte	25.387	2.066,0	8,1%
Valle D'Aosta	3.261	239,2	7,3%
Lombardia	23.863	2.405,7	10,1%
Trentino-Alto Adige	13.605	78,9	0,6%
<i>Bolzano</i>	7.398	33,2	0,4%
<i>Trento</i>	6.207	45,7	0,7%
Veneto	18.407	1.713,4	9,3%
Friuli Venezia Giulia	7.862	610,3	7,8%
Liguria	5.416	153,5	2,8%
Emilia-Romagna	22.452	10.252,5	45,7%
Toscana	22.987	2.790,8	12,1%
Umbria	8.464	336,7	4,0%
Marche	9.401	241,0	2,6%
Lazio	17.232	572,3	3,3%
Abruzzo	10.831	149,9	1,4%
Molise	4.460	139,4	3,1%
Campania	13.671	699,6	5,1%
Puglia	19.541	884,5	4,5%
Basilicata	10.073	276,7	2,7%
Calabria	15.222	576,7	3,8%
Sicilia	25.832	353,0	1,4%
Sardegna	24.100	857,3	3,6%
Totale Italia	302.066	25.398	8,4%

Figura 121 - A sinistra la mappa di ISPRA evidenzia come nella RER si concentri una forte connessione tra consumo di suolo e rischio idraulico. Nella tabella a destra si evidenzia come quasi la metà del territorio regionale (45,7%) è a rischio idraulico medio. Questo fatto rende la Regione Emilia-Romagna la regione di gran lungo più esposta a questo rischio a livello nazionale.

5.7 Considerazioni conclusive

Nell'esaminare l'impatto delle alluvioni avvenute in Emilia-Romagna nel maggio 2023 e nel confrontare questi eventi con eventi avvenuti nel passato occorre tenere conto delle grandi trasformazioni che sono avvenute sul territorio regionale negli ultimi decenni.

Il primo e più importante fattore di cambiamento è la copertura forestale regionale che ha avuto un forte incremento passando dal 18,7% del 1936 al 28,4% del 2014.

Questo aumento non è stato uniforme su tutto il territorio regionale ma ha avuto una incidenza maggiore nelle aree collinari e montane dove la copertura forestale è quasi raddoppiata.

Per quanto riguarda la Superficie Agricola Utilizzata (SAU) l'andamento generale vede una netta riduzione delle aziende agricole e una riduzione, in termini relativi minore, della SAU. Nel complesso negli ultimi 40 anni la SAU si è ridotta al 57% del dato del 1980 e quella collinare al 73%. Più marcato il crollo delle aziende agricole che sono passate da 25.000 a 9.300 (in montagna sono ora il 32% rispetto al 1980 e il 39% in collina). Questi processi hanno determinato la crescita della SAU media per azienda che è passata da 8,3 a 15,3 ettari, una superficie media che si può valutare molto contenuta vista la prevalenza di prati e pascoli.

Questi dati aiutano a comprendere alcune cause che possono aver amplificato gli effetti al suolo degli eventi meteorici del maggio 2023. Molti terreni forestali e agricoli abbandonati con una dinamica in crescita del problema, aziende un po' più grandi ma utilizzate in maniera più estensiva, processo interpretabile come riduzione delle cure ordinarie del territorio e quindi anche di abbandono della rete idraulica minore.

All'aumento di copertura forestale dovrebbe corrispondere un aumento della capacità regimante della vegetazione ma questo non sempre si verifica in funzione delle caratteristiche stazionali e delle precipitazioni, del regime idrologico e del tipo forestale (Brown et al., 2013; Zhang et al., 2017)

L'aumento di copertura forestale, soprattutto in caso di foreste non gestite, abbinato alla diminuzione di manutenzione del territorio agricolo può essere controproducente in caso di eventi pluviometrici estremi in quanto l'aumento di densità all'interno del popolamento induce una maggiore competizione che riduce la resistenza meccanica indebolendo il popolamento (e la capacità di ancoraggio delle radici), ed una maggiore mortalità. Inoltre l'abbandono favorisce ribaltamenti di ceppaie, soprattutto in cedui abbandonati (Vogt et al., 2006; Conedera et al., 2009), mortalità di alberi e polloni che va ad alimentare il trasporto solido delle lave torrentizie, a mettere in pericolo infrastrutture lungo i corsi d'acqua (Comiti et al., 2016).

La minore manutenzione della rete idraulica minore, dei terrazzamenti e delle strutture costruite nei secoli dall'uomo quali muretti a secco contribuisce ad aumentare piccole fratture e dissesti locali che possono dare origine a frane (Persichillo et al., 2017; Santoro et al., 2021).

Una particolare attenzione merita anche la gestione della vegetazione riparia, che svolge una importante funzione di interfaccia, lungo tutto il corso d'acqua ma che deve essere gestita con attenzione valutando i trade-off tra i benefici derivanti da tutti i servizi ecosistemici svolti e l'incremento di rischio idraulico che consegue al suo incontrollato sviluppo (Ebone et al., 2014).

Sono considerazioni che ci dovrebbero portare a riflettere che, in una risposta strutturale ai problemi posti dalla tutela idraulica del territorio, la presenza della selvicoltura e dell'agricoltura di montagna hanno una valenza ambientale e sociale altrettanto significativa di quella economica. Gestire attivamente i terreni, consolidare la presenza di un selvicoltore e di un agricoltore che insieme a materie prime legnose e alimentari costituisca un presidio nella gestione-manutenzione di un territorio fortemente antropizzato e modificato dall'uomo e fornisca servizi ecosistemici adeguatamente remunerati è uno degli strumenti fondamentali per una politica lungimirante di protezione idraulica del territorio.

Il TUF (DL 3 aprile 2018, n. 34, Testo unico in materia di foreste e filiere forestali) e la recente SFN (Strategia forestale nazionale) hanno individuato nei Piani Forestali di Indirizzo Territoriale (PFIT) uno strumento per la gestione territoriale a scala di bacino e per l'integrazione dei diversi servizi ecosistemici erogati dalla foresta e per la prevenzione e mitigazione dei potenziali rischi (incendi e rischio idraulico prioritariamente).

Tenendo conto dell'elevata pericolosità idraulica della Regione, dell'ulteriore rischio legato al cambiamento climatico e del ruolo importante che la vegetazione forestale (oltre alla superficie agricola) ha nella mitigazione del rischio idraulico la gestione del territorio (montano e collinare) è prioritaria.

Un controllo severo del consumo di suolo, che, sebbene sovrastimato per la Regione nella reportistica Ispra nazionale, ha ancora un impatto rilevante, e la redazione e l'applicazione di Piani forestali di Indirizzo territoriale rappresenterebbero le prime ed indispensabili misure preventive.

6 Scenari climatici per le forzanti idrologiche

6.1 Le analisi di scenario

Questo capitolo si propone di esaminare le variazioni previste nei regimi di pioggia, in particolare per quanto riguarda le precipitazioni massime, attraverso l'utilizzo di diversi modelli climatici. L'analisi è stata effettuata usando diversi scenari delineati dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change; in italiano Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico) nell'ambito del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) e copre l'intero spettro dei bacini nell'area di studio (illustrati nella Figura 122). L'identificazione di cambiamenti futuri nelle precipitazioni per l'area considerata svolge un ruolo cruciale non solo nel comprendere i potenziali impatti attesi sui regimi idrologici locali ma anche per fornire indicazioni preziose per la valutazione di misure di adattamento basati su dati scientifici. Le informazioni generate da questo studio possono fornire alcuni primi indirizzi per la progettazione e l'implementazione di misure che mirano a ridurre l'impatto sul territorio alle variazioni dei regimi di pioggia attese per effetto dei cambiamenti climatici di natura antropica. Chiaramente questo elemento è solo uno di quelli che concorrono alla valutazione dell'evoluzione del rischio sull'area e va considerato all'interno di un approccio multirischio.

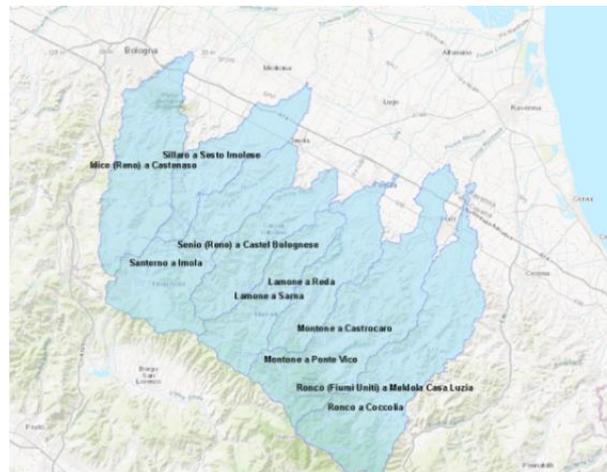


Figura 122 – Localizzazione dei bacini nell'area oggetto di studio

Le proiezioni climatiche utilizzate per la presente analisi costituiscono simulazioni dell'andamento previsto del clima terrestre nei prossimi decenni (generalmente fino al 2100). Una proiezione è la potenziale evoluzione futura del clima; tale evoluzione viene generalmente simulata usando modelli atmosferici numerici che descrivono il sistema climatico terrestre sulla base di leggi fisiche come la conservazione della massa, la conservazione della quantità di moto e la conservazione dell'energia. Diversamente dalle previsioni, le proiezioni sono condizionali nelle ipotesi e supposizioni, che possono dipendere da diversi fattori. In particolare le simulazioni climatiche si basano su "scenari" ipotetici che delineano possibili andamenti delle concentrazioni in atmosfera di gas serra, aerosol e altri componenti atmosferici influenti sul bilancio radiativo del pianeta. Tale andamento delle concentrazioni su di un insieme coerente e internamente in accordo di assunzioni su quelle che sono le motivazioni trainanti per le variazioni di queste concentrazioni in atmosfera (quali, ad esempio, lo sviluppo demografico e socio-economico e cambiamenti tecnologici) e le loro relazioni chiave¹. Tali scenari sono utilizzati come input dai modelli climatici per comprendere come tali andamenti vadano a determinare variazione del clima sul globo o nelle varie aree di interesse. A questo proposito esistono due principali categorie di modelli climatici: i modelli climatici che studiano appunto il clima e le sue variazioni per effetto della variazione delle concentrazioni sopra menzionate a scala globale e i modelli

¹ Si rimanda alla documentazione prodotta dal focal point italiano dell'IPCC per ulteriori dettagli su tale aspetti in lingua italiana (<https://ipccitalia.cmcc.it/>)

climatici a scala limitata che invece si focalizzano sullo studio del clima e delle sue variazioni in specifiche regioni.

Sebbene i modelli climatici a scala globale costituiscono fonti di informazioni cruciali per comprendere in modo quantitativo come il clima terrestre potrebbe evolversi nel corso del XXI secolo sulla base di possibili scenari essi sono attualmente caratterizzati da una risoluzione (intorno ai 50 km) e che ancora non permette una riproduzione accurata di alcuni processi fisici complessi che avvengono nella bassa atmosfera sulle scale spaziali e temporali maggiori che risultano di grande interesse per lo studio degli impatti al suolo. A tale scopo quindi, ci sono diversi altri strumenti che possono essere utilizzati, tra cui i modelli climatici regionali caratterizzati da una maggiore risoluzione (generalmente tra 10 km e 15 km). Come dimostra ampiamente la letteratura scientifica essi sono in grado di fornire dati preziosi per condurre analisi relative agli impatti su scala locale derivanti dai cambiamenti climatici, e per supportare i decisori nelle decisioni relative alle azioni di adattamento. In questa prospettiva, i risultati ottenuti dai modelli climatici regionali sono essenziali per sostenere studi sull'impatto climatico regionale, analisi del rischio e formulazione di strategie di adattamento. Attualmente, ad esempio, in Europa, nell'ambito del programma EURO-CORDEX², sono forniti dataset di proiezioni climatiche a partire da modelli climatici regionali e per diversi scenari, con una massima risoluzione disponibile di 12 km, essi permettono di studiare con elevato dettaglio le caratteristiche del clima atteso sull'Europa e di caratterizzare anche l'incertezza associata all'utilizzo di un singolo modello numerico.

Recenti progressi nella modellistica climatica hanno consentito l'esecuzione di modelli climatici ad altissima risoluzione, con risoluzioni su scala chilometrica (nell'intervallo 1-3 km). Questi modelli, noti anche come "convection permitting," sono progettati per offrire un valore aggiunto rispetto ai modelli regionali a risoluzione inferiore, consentendo una rappresentazione più accurata di fenomeni localizzati nel tempo e nello spazio. Inoltre, tali modelli offrono la possibilità di incorporare parametrizzazioni più dettagliate in contesti complessi, come quelli urbani.

In particolare, le analisi effettuate nel presente lavoro riguardanti le proiezioni future dei massimi di piogge sono state possibili a partire da due possibili scenari di concentrazione future dei gas climalteranti prodotti dall'IPCC nell'ambito di CMIP5 ed utilizzando i seguenti modelli climatici:

- Serie temporali orarie di precipitazioni ottenute a partire dal modello di tipo "convection permitting" denominato VHR-PRO_IT (Raffa et al. 2023). Tale dataset è una simulazione climatica per il clima futuro per gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5 sull'intero territorio italiano ottenuta attraverso un'ulteriore localizzazione (downscaling) dinamica di Italy8km-CM (Bucchignani et al. 2015) alla risoluzione di circa 2 km per il periodo 1981-2070 (1981-2005 per l'esperimento denominato "historical"; 2006-2070 per gli esperimenti guidati dalle ipotesi di scenario IPCC RCP4.5 e RCP8.5)
- Serie temporali giornaliere di precipitazioni ottenute a partire dalla simulazione Italy8km-CM (Bucchignani et al. 2015, Zollo et al. 2015). Tale dataset è una simulazione climatica per il clima futuro per gli scenari IPCC RCP4.5 e RCP8.5 sull'intero territorio italiano ottenuta con il modello RCM COSMO CLM (Rockel and Geyer 2008), sviluppato all'interno della CLM community (<https://www.clm-community.eu/>), e nella configurazione sviluppata sull'Italia dal CMCC (Bucchignani et al. 2015). In particolare, la configurazione utilizzata ha una risoluzione orizzontale di circa 8 km ed è stata forzata dal modello globale CMCC-CM (risoluzione orizzontale 80km) (Scoccimarro et al. 2011). I risultati di tali simulazioni sono stati utilizzati anche per studi di impatto sulla disponibilità idrica sul territorio di interesse (Vezzoli et al; 2014; Vezzoli et al; 2015).

I tempi limitati non hanno permesso di utilizzare più modelli climatici e ulteriori scenari; quindi, l'incertezza delle analisi che saranno proposte è significativa e necessita di essere quantificata ulteriormente attraverso

² Il programma EURO-CORDEX, ramo europeo dell'iniziativa internazionale CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) sponsorizzato dal World Climate Research Program (WRCRP, <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>), ha come obiettivo la fornitura di un coordinamento globale di proiezioni climatiche regionali per diversi domini terrestri. Ulteriori informazioni sull'iniziativa EURO-CORDEX sono disponibili al seguente link <http://www.euro-cordex.net>. La dimensione e la posizione dei domini CORDEX possono essere visualizzati sulla pagina web CORDEX (<http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>). Il dominio EURO-CORDEX copre tutti i paesi dell'Unione Europea, ma non ricopre perfettamente il dominio Europeo definito nel Quinto Rapporto di valutazione (AR5) dell'IPCC.

analisi multi-modello e correzione statistica degli scenari climatici. Tuttavia, tali analisi hanno lo scopo di introdurre come il cambiamento climatico possa determinare variazioni dei regimi di pioggia di cui tener conto opportunamente nella valutazione delle misure da mettere in campo per ridurre i futuri impatti al suolo delle piogge estreme attese.

Per ogni bacino riportato in Figura 122, le serie temporali di piogge giornaliere risultano disponibili sia per i punti griglia che ricadono nel bacino che per quelli adiacenti al confine del bacino sia come tramite un valor medio ottenuto a partire da tutti i punti griglia che ricadono nel bacino. Nel successivo paragrafo questi dati sono stati utilizzati per condurre uno studio sulle curve di possibilità pluviometrica. In particolare l'analisi consiste nel valutare nuove leggi di pioggia che tengano conto dell'effetto del cambiamento climatico sull'orizzonte temporale futuro 2036-2065 (2050) per i diversi scenari IPCC presi in esame (RCP4.5 e RCP8.5). Lo scopo è comprendere la tendenza attesa in termini di aumento (in intensità e frequenza) delle criticità degli eventi alluvionali sull'area oggetto di studio, utilizzando come variabile rappresentativa il regime delle piogge estreme. Questa analisi si basa sul lavoro di Padulano et al. (2019) a cui si rimanda per ulteriori chiarimenti.

6.2 Le curve IDF

L'analisi in oggetto utilizza, per la rappresentazione delle condizioni di riferimento del regime meteorico estremo, le leggi di pioggia VAPI (<http://www.idrologia.polito.it/gndci/Vapi.htm>). Tali leggi legano l'altezza di pioggia (o la sua intensità) massima annuale, la durata degli eventi e la loro frequenza (ovvero il tempo di ritorno), e sono pertanto note, nella letteratura scientifica, come "curve IDF" (o "DDF"), dove IDF sta per "Intensity – Duration – Frequency" e DDF sta per "Depth – Duration – Frequency". Le due tipologie di curve sono derivabili l'una dall'altra, e per convenzione si utilizza in genere il termine "IDF" anche quando la variabile oggetto di studio è l'altezza di pioggia. Nella letteratura tecnica italiana si utilizza invece l'espressione generica "legge di pioggia" o "curva di possibilità pluviometrica". L'aggiornamento delle curve IDF verrà condotto seguendo l'approccio statistico proposto da Padulano et al. (2019) sulla base dei due dataset presi in esame (VHR-PRO_IT e Italy8km-CM), sul trentennio centrato sul 2050 sotto i due Representative Concentration Pathways RCP 4.5 e 8.5.

Negli anni '90, il Progetto VAPI (VALutazione delle Plene), coordinato dal CNR – GNDCI (Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche), attraverso una procedura idrologica nota come "regionalizzazione", ha prodotto curve segnalatrici di possibilità pluviometrica per il territorio italiano. La regionalizzazione si basa sul presupposto che gli eventi estremi in un territorio ampio possano essere ricondotti ad un'unica distribuzione di probabilità, di cui però i parametri variano sul territorio.

Per le piogge, la variabile presa in considerazione è il massimo annuale di altezza di pioggia sulle durate di riferimento di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. L'approccio VAPI si basa sul concetto di "pioggia indice" (*index storm*), secondo il quale un evento di pioggia massima annuale di qualsivoglia durata d e tempo di ritorno T può essere visto come il prodotto tra la media μ dei massimi annuali di pari durata e un fattore di crescita k , esclusivamente funzione del tempo di ritorno.

Il metodo adottato nel VAPI utilizza, per il fattore di crescita, il modello TCEV (*Two-Component Extreme Value*), una funzione tetra-parametrica generata dalla combinazione di due distribuzioni di Gumbel che vanno a modellare la parte bassa e la parte alta della distribuzione di frequenza dei dati. Stabilito questo approccio sul territorio italiano, i parametri per entrambe le componenti sono stati determinati individuando singole aree omogenee all'interno delle quali i parametri potessero essere considerati costanti, e significativamente diversi da altre aree omogenee). I dati utilizzati sono tratti dalle pubblicazioni del SIMN relative ai Compartimenti di Bologna, Pisa, Roma e Zona Emiliana del bacino del Po (<http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/BoAnPi.pdf>).

La Figura 123 mostra le sette sottozone omogenee nei confronti delle precipitazioni intense e i 10 bacini presi in esame risultano ricadere sia nella "zona omogenea B" (1 bacino) che nella "zona omogenea C" (i restanti 9

bacini). Tramite la documentazione VAPI sono stati estrapolati i parametri della TCEV di tali zone omogenee. Mentre la pioggia indice è stata calcolata mediante l'utilizzo di una formulazione analoga alla classica curva di probabilità climatica. Inoltre, per ricavare la media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione giornaliera e la media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione in 1 ora si è ricorso alle mappe isoparametriche proposte in Brath e Franchini (1999).

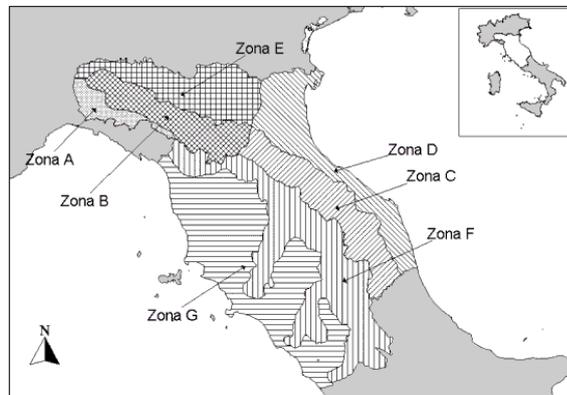


Figura 123 - Sottozone omogenee riportate nella documentazione VAPI
(<http://www.idrologia.polito.it/gndci/rapportiPdf/BoAnPi.pdf>)

Una volta stimati i valori di riferimento della pioggia (desunti dalle leggi di pioggia VAPI) si è passati a valutare le nuove leggi di pioggia che tengano conto dell'effetto del cambiamento climatico sull'orizzonte temporale futuro 2036-2065 (2050) per i diversi scenari IPCC presi in esame.

L'approccio utilizzato è quello proposto da Padulano et al. (2019) che non è altro che una tecnica di *bias correction* basata sul Quantile Delta Mapping ("QDM", Cannon et al. 2015), la cui particolarità sta nel fatto che essa non è applicata, come da prassi, alla serie continua delle piogge giornaliere, bensì al solo sottoinsieme delle piogge giornaliere massime annuali. In aggiunta, l'approccio proposto destruttura l'equazione di base del metodo QDM per mantenere un parallelismo con il modello della pioggia indice, andando cioè a valutare separatamente i cambiamenti intercorsi, per effetto del cambiamento climatico, sulla media dei massimi annuali di pioggia e sul fattore di crescita. Per semplificare la lettura, nel seguito i diversi bacini verranno identificati come riportato in Tabella 15. Per i dettagli sulla metodologia adottata si rimanda a Padulano et al. (2019).

Tabella 15 – Bacini di interesse con relativo identificativo.

<i>Identificativo bacino</i>	<i>Nome bacino</i>
Bacino 1	Idice (Reno) a Castenaso
Bacino 2	Lamone a Reda
Bacino 3	Lamone a Sarna
Bacino 4	Montone a Castrocaro
Bacino 5	Montone a Ponte Vico
Bacino 6	Ronco (Fiumi Uniti) a Meldola Casa Luzia
Bacino 7	Ronco a Coccolia
Bacino 8	Santerno a Imola
Bacino 9	Senio (Reno) a Castel Bolognese
Bacino 10	Silaro a Sesto Imolese

Valori di altezza di pioggia massima annuale attesi in futuro (Curve IDF)

Di seguito vengono presentati i risultati delle analisi in termini di variazione attesa dell'altezza di pioggia per una selezione di tempi di ritorno, nonché in termini di altezza di pioggia da attendersi in futuro per gli stessi tempi di ritorno e una selezione di durate. I valori di riferimento della pioggia (desunti dalle leggi di pioggia VAPI) sono sempre riportati per facilitare l'interpretazione dei risultati.

L'intero approccio si basa su alcune assunzioni fondamentali:

- 1) A causa delle attuali performance e capacità dei modelli climatici, tutte le elaborazioni sono state effettuate partendo dal presupposto forte che le variazioni su scala giornaliera "funzionano" per durate sub-giornaliere.
- 2) L'analisi è stata condotta sfruttando catene di simulazione climatica solo per l'area indagata e proponendo quindi una variazione del fattore di crescita (a specifici periodi di ritorno) che, in senso stretto, è valida solo sulla stessa scala locale. I parametri del fattore di crescita sono originariamente stimati in VA.PI. considerando contesti territoriali molto più ampi.

La Figura 124 mostra in forma di Tabelle i valori di altezza di pioggia massima annuale per una selezione di tempi di ritorno (5, 10, 20, 50 e 100 anni) e durate (1, 3, 6, 12 e 24 ore), fornite dalle leggi VAPI per i 10 bacini interesse. Si evince che i tra bacini non vi è una grande variabilità nell'altezza di pioggia massima annuale, in linea con la considerazione che essi si trovano alquanto prossimi l'uno all'altro, e con simili caratteristiche. Per alcuni bacini, essendo adiacenti e caratterizzati dagli stessi parametri, i valori di riferimento sono gli stessi (ad esempio nel caso dei bacini 2, 4, 5, 6, 7, 8).

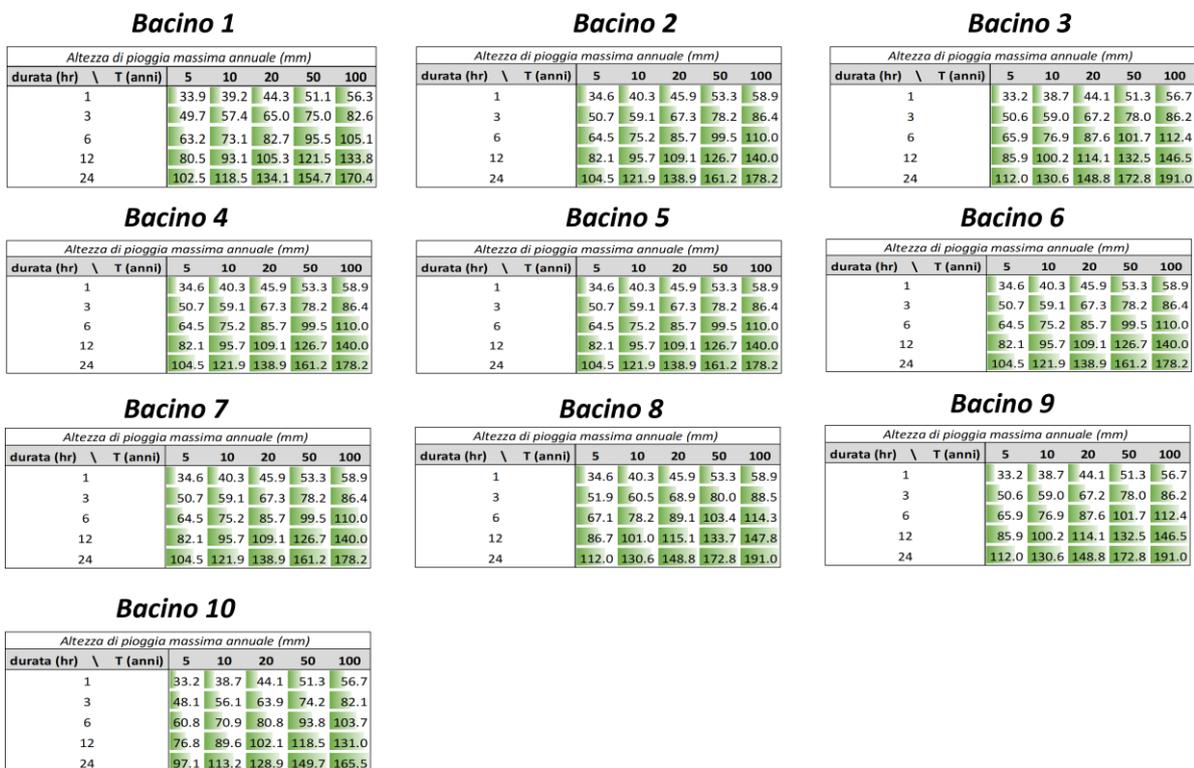


Figura 124 – Valori di riferimento dell'altezza di pioggia massima annuale, in [mm], per diversi tempi di ritorno e per diverse durate.

La Figura 125 invece mostra sempre in forma di Tabelle la variazione percentuale Δh dell'altezza di pioggia massima annuale attesa sull'orizzonte futuro 2036-2065 rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per

ciascun tempo di ritorno e ciascuno scenario di concentrazione considerando come dataset VHR-PRO_IT. Infine la Figura 126 contiene lo stesso contenuto informativo della Figura 125 considerando, invece, come dataset Italy8km-CM. In questo caso a differenza dei valori di riferimento, le variazioni attese sono invece diversi da bacino a bacino. Questa tipologia di rappresentazione evidenzia più efficacemente il ruolo dello scenario di concentrazione. In generale, per entrambi i dataset presi in esame, lo scenario RCP4.5 presenta un comportamento spazialmente omogeneo, fornendo aumenti di entità simile tra tutti i bacini considerando entrambe le simulazioni. Al contempo, sono attesi in alcuni casi limitati variazioni negative, soprattutto per i tempi di ritorno più alti e sotto lo scenario RCP8.5 (ciò accade in particolare per i seguenti bacini: 3, 4,5 e 9 considerando il dataset VHR-PRO_IT). Sulla scala analizzata (scala locale), lo scenario meno gravoso è dunque RCP 8.5, a testimonianza del fatto che non sempre uno scenario di concentrazione critico in termini di riscaldamento lo sia anche in termini di precipitazione. Questo aspetto risulta fondamentale per sottolineare l'esigenza di effettuare studi di impatto a scala locale.

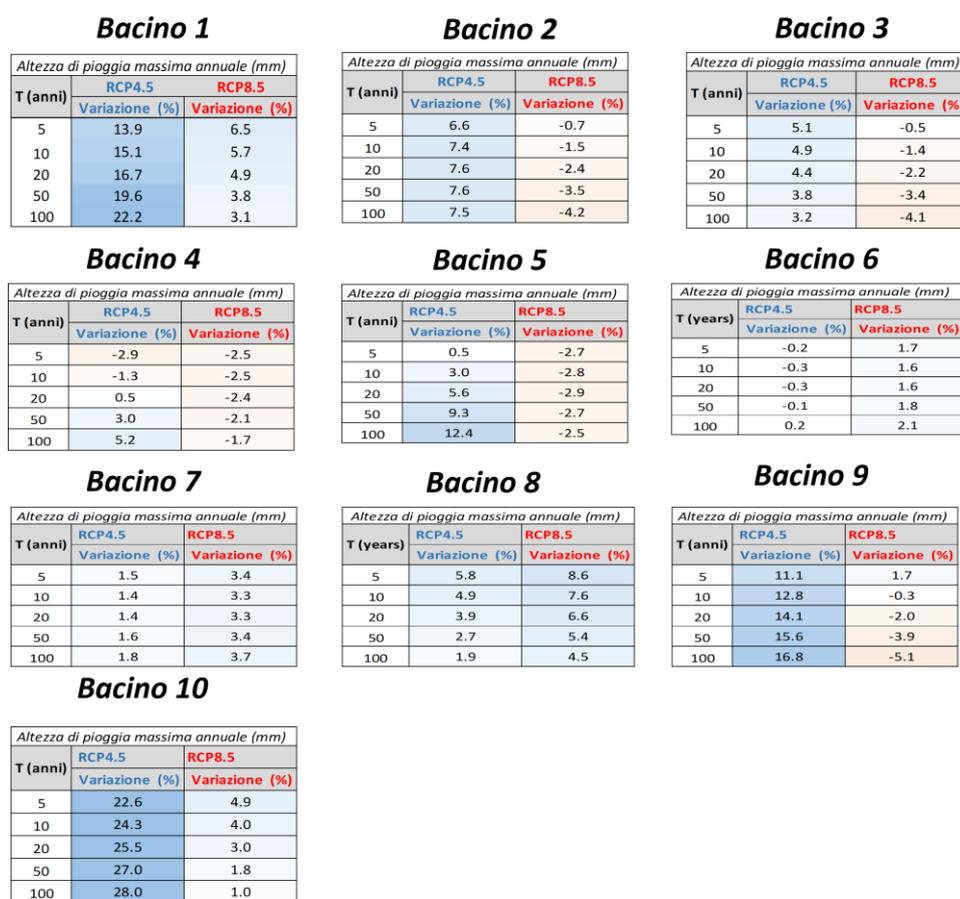


Figura 125 – Variazione dell'altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno considerando come dataset VHR-PRO_IT. Per ciascun scenario viene riportata la variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l'altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per diversi periodi di ritorno. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

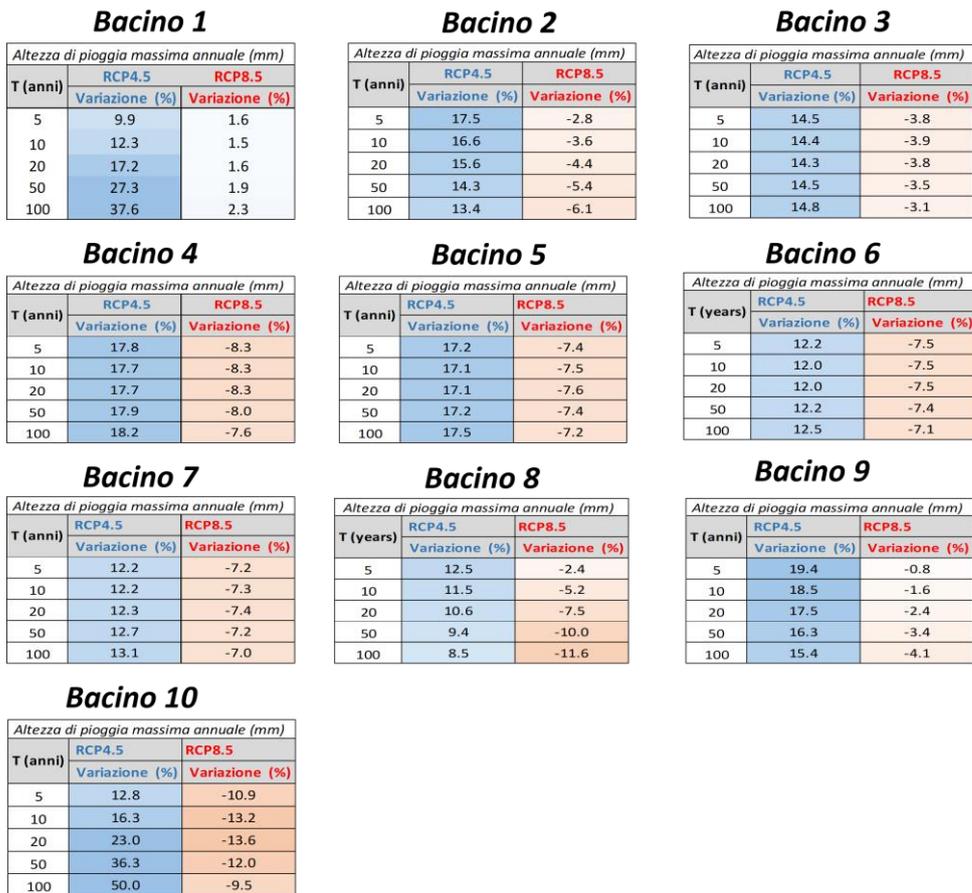


Figura 126 – Variazione dell’altezza di pioggia massima annuale per diversi tempi di ritorno considerando come dataset Italy8km-CM. Per ciascun scenario viene riportata la variazione attesa in futuro, rispetto al periodo di riferimento, per l’altezza di pioggia massima annuale per diversi scenari di concentrazione e per diversi periodi di ritorno. Tali valori possono considerarsi validi per tutte le durate considerate.

7 Cambiamenti attesi delle forzanti idrologiche negli scenari climatici futuri

7.1 Analisi dei cambiamenti attesi nei valori estremi delle piogge giornaliere

In aggiunta alle analisi precedenti, che fanno riferimento al Progetto VAPI, sono di seguito riportate le risultanze di ulteriori analisi condotte a partire dai dati di proiezione climatica presentati in precedenza, in particolare per il modello VHR_PRO_IT (Raffa et al., 2023) avente risoluzione spaziale di circa 2kmx2km. Le serie climatiche disponibili sono serie temporali di pioggia oraria ai punti griglia di calcolo, poi integrate alla scala dei sette bacini di riferimento, riferite, come già riportato in precedenza, al periodo 1981-2005, denominato "historical", e al periodo 2006-2070 per le ipotesi di scenario IPCC RCP4.5 e RCP8.5. Per quanto riguarda la simulazione di scenario, si è fatto riferimento alle piogge del trentennio 2041-2070, ovvero l'ultimo trentennio disponibile per la simulazione climatica adottata; pertanto, dalla serie orarie 2006-2070 dello scenario RCP4.5 e dello scenario RCP8.5, sono state estratte le rispettive serie 2041-2070. Le piogge orarie sono state quindi integrate alla scala giornaliera e si è ottenuto il massimo della pioggia giornaliera media areale per ciascun anno del periodo 2041-2070 sia per lo scenario RCP4.5 che per quello RCP8.5. Per ciascuno dei sette bacini e per ciascuno dei due scenari emissivi, si è quindi potuto disporre di un campione dei massimi annuali delle piogge previste per il periodo 2041-2070.

Sulla base di questi campioni è stata derivata la distribuzione di probabilità secondo il modello probabilistico GEV delle piogge giornaliere massime annuali per ciascuno dei sette bacini. Per quanto riguarda il clima attuale, al fine di avere un campione della medesima dimensione (30 anni) come è d'uso nelle analisi climatiche, il campione dei massimi annuali della pioggia giornaliera estratto, con metodologia analoga a quella in precedenza descritta, dalla simulazione "historical" relativa agli anni 1981-2005 è stato integrato, per gli anni dal 2006 al 2010 compresi, dai massimi annuali della pioggia giornaliera dello scenario RCP8.5, in analogia ad altri lavori, come indicato anche in precedenza. Se ne è ottenuto, per ciascun bacino, un campione dei massimi annuali della pioggia giornaliera, che è stato sottoposto anch'esso a inferenza statistica secondo il modello GEV, ricavandone la distribuzione di probabilità.

Nella Figura 127, che si riferisce al bacino dell'Idice chiuso a Castenaso, nel riquadro di sinistra sono rappresentate la distribuzione di frequenza dei massimi annuali delle piogge giornaliere medie areali sul bacino (punti blue) e la relativa distribuzione di probabilità (linea blue) che si ottengono nel caso di clima storico messe a confronto con la distribuzione di frequenza dei massimi annuali delle piogge giornaliere medie areali (punti rossi) e la relativa distribuzione di probabilità (linea rossa) che si avrebbero nel periodo 2041-2070 nel caso di evoluzione del clima secondo lo scenario RCP4.5; la figura nel riquadro di destra mostra l'analogo confronto tra il clima storico e il clima secondo lo scenario RCP8.5. Nel caso in esame si può apprezzare, nel caso dello scenario RCP4.5 (riquadro a sx), un moderato aumento (circa il 5%) delle piogge di assegnato tempo di ritorno, sostanzialmente indipendente dal tempo di ritorno (v. anche Tabella 16, di seguito commentata); nel caso dello scenario RCP8.5 (riquadro a dx), si attende invece un modesto incremento per il 2041-2070 delle piogge a minore tempo di ritorno rispetto al clima storico mentre quelle di maggiore tempo di ritorno si riducono in maniera sempre più sensibile all'aumentare del tempo di ritorno, fino a un 27% in meno per T=200 anni (v. Tabella 17, commentata di seguito). La Figura 128 mostra analoghi confronti ma con riferimento ai massimi annuali della pioggia giornaliera media areale sul bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese; il comportamento non è molto dissimile, nelle sue linee generali, da quello dell'Idice. La Figura 129 si riferisce al bacino del Santerno chiuso ad Imola, la Figura 130 al bacino del Senio chiuso a Castel Bolognese, la Figura 131 a quello del Lamone chiuso a Reda, la Figura 132 al Montone a Ponte Vico e la Figura 133 al Ronco a Coccolia.

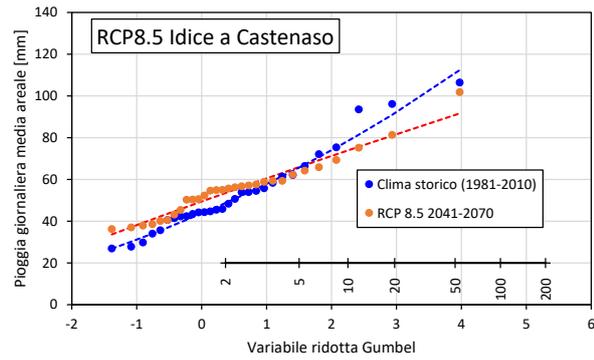
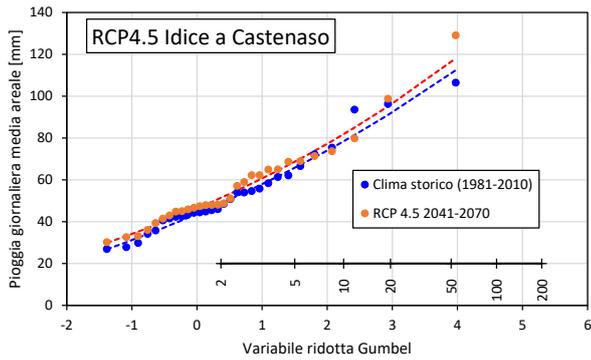


Figura 127 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino dell'Idice chiuso a Castenaso.

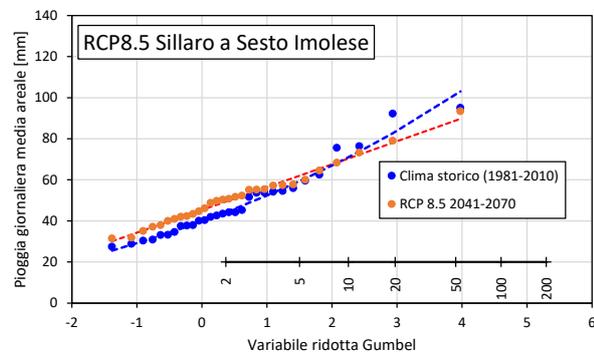
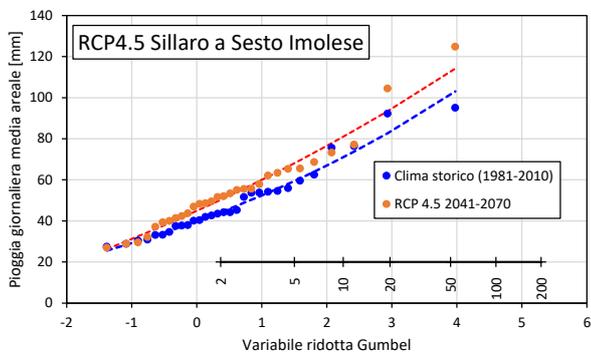


Figura 128 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Sillaro a Sesto Imolese.

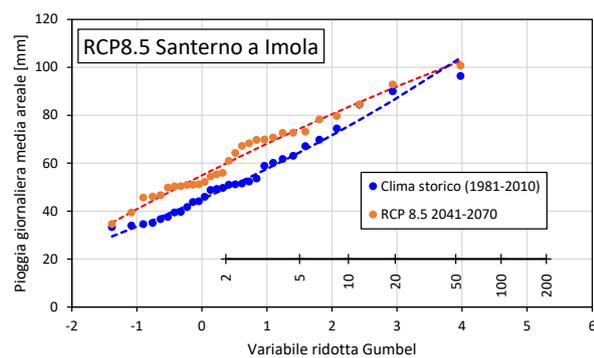
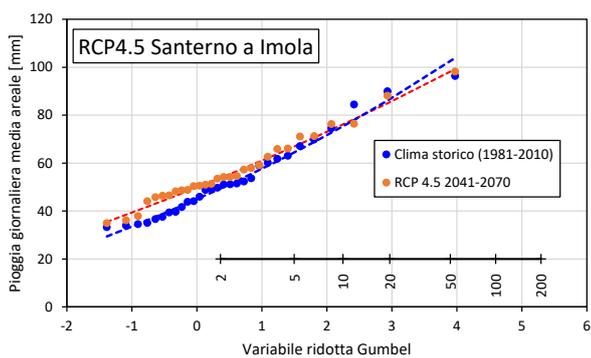


Figura 129 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Santerno chiuso a Imola.

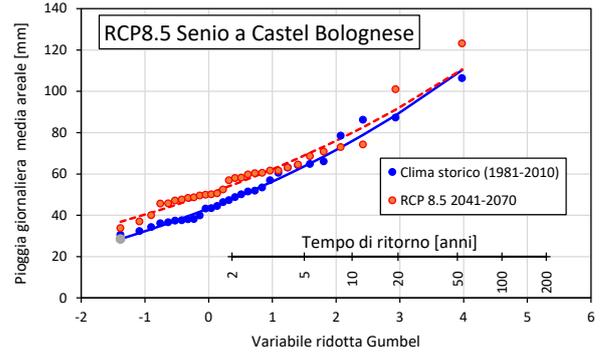
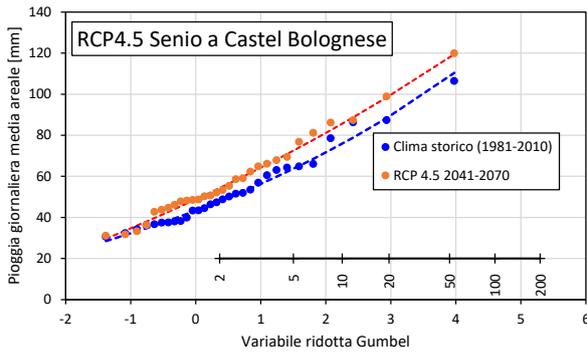


Figura 130 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Senio chiuso a Castel Bolognese.

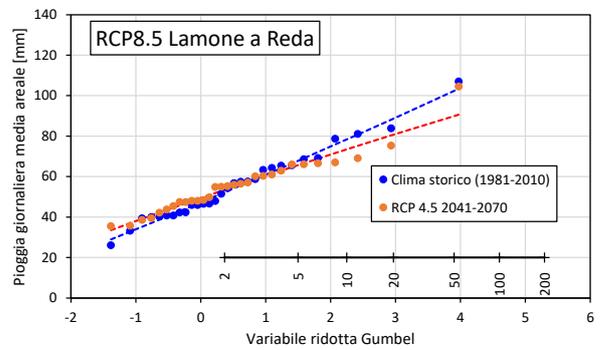
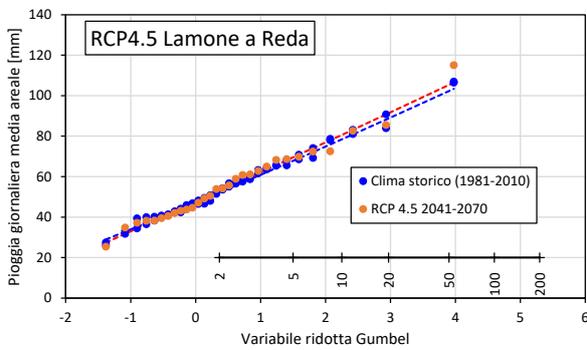


Figura 131 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Lamone chiuso a Reda.

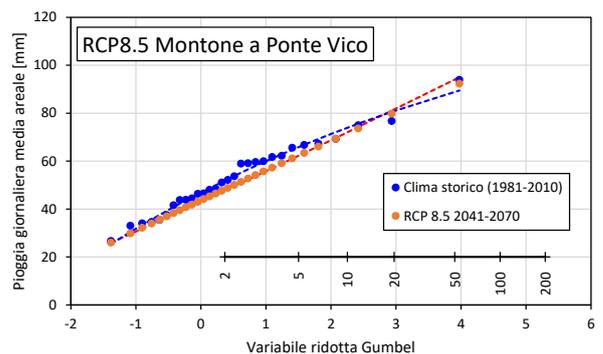
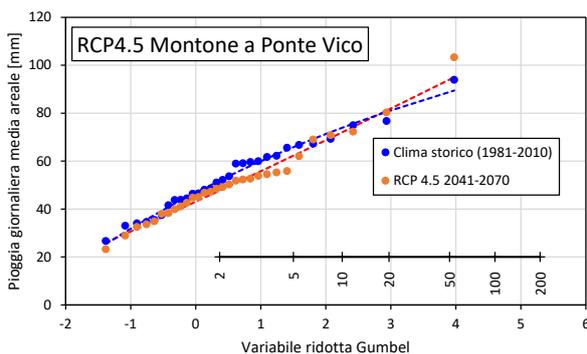


Figura 132 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico.

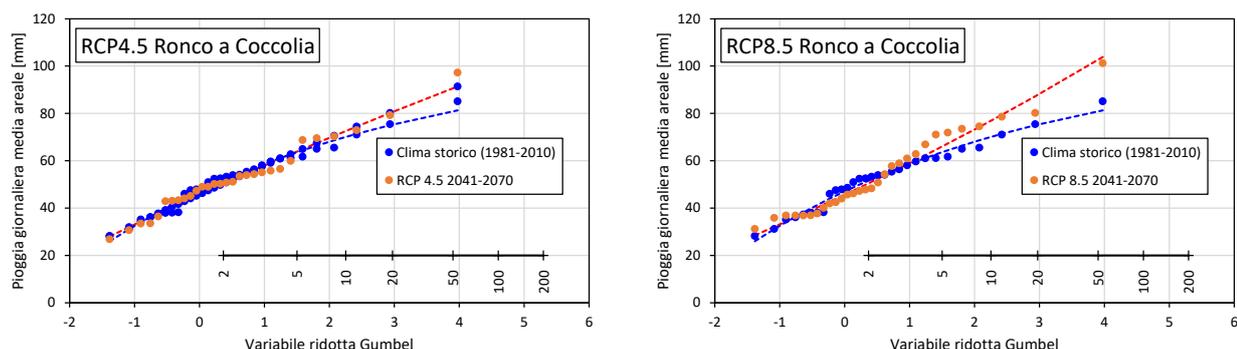


Figura 133 - Confronto tra la distribuzione di probabilità dei massimi annuali della pioggia giornaliera media areale nel caso di clima storico e quella del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5 (a sx) e dello scenario RCP8.5 (a dx), per il bacino del Ronco chiuso a Cocolia.

Dall'analisi delle figure si nota che i vari bacini mostrano comportamenti fra loro diversi; per un agevole confronto può risultare utile la consultazione della Tabella 16 e la Tabella 17, che riepilogano e sintetizzano i risultati salienti. Nella Tabella 16 sono riportate infatti le variazioni percentuali, rispetto al clima attuale, delle stime della pioggia giornaliera di assegnato tempo di ritorno del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5; la Tabella 17 riporta l'analoga informazione rispetto allo scenario RCP8.5. I valori riportati possono dare un'idea delle variazioni attese.

Tabella 16 - Variazioni percentuali rispetto al clima attuale delle stime della pioggia giornaliera di assegnato tempo di ritorno del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP4.5

<i>T</i> [anni]	<i>Idice</i> <i>a Castenaso</i>	<i>Sillaro</i> <i>a Sesto</i> <i>Imolese</i>	<i>Santerno</i> <i>a Imola</i>	<i>Senio a</i> <i>Castel</i> <i>Bolognese</i>	<i>Lamone a</i> <i>Reda</i>	<i>Montone a</i> <i>Ponte Vico</i>	<i>Ronco</i> <i>a Cocolia</i>
2	+ 5.5 %	+ 13.5 %	+ 8.9 %	+ 13.5 %	+ 1.2 %	- 8.0 %	- 2.6 %
5	+ 4.5 %	+ 14.6 %	+ 3.8 %	+ 13.8 %	+ 2.5 %	- 5.4 %	+ 0.4 %
10	+ 4.3 %	+ 14.0 %	+ 1.0 %	+ 12.8 %	+ 2.8 %	- 2.5 %	+ 3.5 %
20	+ 4.5 %	+ 12.9 %	- 1.4 %	+ 11.2 %	+ 3.0 %	+ 0.8 %	+ 7.0 %
50	+ 5.0 %	+ 10.9 %	- 4.3 %	+ 8.5 %	+ 2.9 %	+ 5.7 %	+ 12.0 %
100	+ 5.5 %	+ 9.0 %	- 6.3 %	+ 6.1 %	+ 2.8 %	+ 9.8 %	+ 15.9 %
200	+ 6.2 %	+ 7.0 %	- 8.2 %	+ 3.5 %	+ 2.6 %	+ 14.1 %	+ 20.0 %

Tabella 17 - Variazioni percentuali rispetto al clima attuale delle stime della pioggia giornaliera di assegnato tempo di ritorno del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni dello scenario RCP8.5

<i>T</i> [anni]	<i>Idice</i> <i>a Castenaso</i>	<i>Sillaro</i> <i>a Sesto</i> <i>Imolese</i>	<i>Santerno</i> <i>a Imola</i>	<i>Senio a</i> <i>Castel</i> <i>Bolognese</i>	<i>Lamone a</i> <i>Reda</i>	<i>Montone a</i> <i>Ponte Vico</i>	<i>Ronco a</i> <i>Coccolia</i>
2	+ 9.9 %	+ 11.6 %	+ 20.9 %	+ 14.1 %	+ 2.4 %	- 7.1 %	- 2.2 %
5	+ 0.3 %	+ 4.4 %	+ 15.3 %	+ 8.3 %	- 3.2 %	- 5.4 %	+ 3.8 %
10	- 5.7 %	- 0.8 %	+ 10.6 %	+ 5.3 %	- 6.3 %	- 3.2 %	+ 9.8 %
20	- 11.2 %	- 5.9 %	- 5.7 %	+ 3.0 %	- 9.0 %	- 0.8 %	+ 16.7 %
50	- 18.0 %	- 12.5 %	- 0.7 %	+ 0.5 %	- 12.1 %	+ 2.9 %	+ 26.9 %
100	- 22.8 %	- 17.3 %	- 5.6 %	- 1.2 %	- 14.4 %	+ 5.8 %	+ 35.5 %
200	- 27.3 %	- 22.0 %	- 10.4 %	- 2.6 %	- 16.5 %	+ 8.9 %	+ 44.7 %

La differenza di comportamento di bacini fra loro geograficamente vicini e tra loro idrologicamente simili suggerisce qualche riflessione; ad esempio si confronti la differenza di comportamento del bacino del Montone a Ponte Vico e di quello del Ronco a Coccolia, fra loro contigui, per lo scenario RCP8.5. Questo suggerisce che l'approccio presentato sia adatto, come già indicato in precedenza, solo ad una prima valutazione e che valutazioni più accurate possano essere ottenute da un lato dall'implementazione di operazioni di correzione statistica delle proiezioni climatiche, come il Quantile Mapping, dall'altro dall'uso di approcci multimodel, basati sull'uso di proiezioni fornite non da un unico modello climatico come nel caso in esame ma da più modelli, in modo da potere caratterizzare l'incertezza.

7.2 L'analisi statistica dei cambiamenti attesi nei valori estremi delle piogge di breve durata

Seguendo una prassi cautelativa, da adottarsi particolarmente quando i risultati possano essere adottati per indirizzare strategie progettuali di adattamento, si sono svolte analisi delle statistiche degli eventi estremi proiettati secondo il modello e gli scenari VHR-PRO_IT (Raffa et al. 2023) utilizzando la distribuzione GEV adottata per gli eventi osservati. A tale scopo si è assunto, per il clima presente, il quarantennio 1991-2020, sovrapponibile con il periodo di osservazione orario esaminato in precedenza. Per le proiezioni si è assunto il periodo 2041-2070, come nella precedente sezione, e lo scenario RCP8.5, indicato dalla Guida Tecnica (2021/C 373/01) "Technical guidance on the climate proofing of infrastructure in the period 2021-2027" della Commissione Europea. Sulla scorta dei risultati delle analisi sui dati osservati, si è focalizzata l'attenzione sulle durate di 1 ora, 12 ore e 24 ore, rappresentative dell'intervallo di durate significativo per la generazione delle piene nei bacini considerati e inclusive delle durate che si sono riscontrate essere maggiormente estreme nel caso degli eventi del maggio 2023.

I risultati, riassunti da Figura 134 a Figura 140, mostrano modesti cambiamenti nei tempi di ritorno delle altezze di precipitazione corrispondenti agli eventi verificatisi nel maggio 2023. Pur normalmente contenute, queste variazioni sono in alcuni casi di aumento del tempo di ritorno, segnalando che, secondo le proiezioni esplorate, tali eventi tenderebbero a diventare meno probabili. Tali risultati appaiono coerenti con quanto generalmente rilevato in precedenza, utilizzando gli approcci VAPI. E' importante ricordare, in proposito, quanto già menzionato in precedenza: la possibilità di utilizzare una sola catena modellistica di affinamento delle risoluzioni spaziali, necessario per poter descrivere il tipo di processi di natura convettiva e orografica che hanno generato gli eventi del maggio 2023, rende impossibile quantificare l'incertezza, cosiddetta epistemica, che affligge le proiezioni. Si sottolinea dunque nuovamente l'importanza di ripetere, a supporto degli interventi di adattamento necessari, l'analisi presentata, usando un intero insieme di modelli diversi,

quali per esempio, quelli dell'esperienza modellistica europea CORDEX-FP, che coinvolge un gran numero di modelli di tipo "convection permitting".

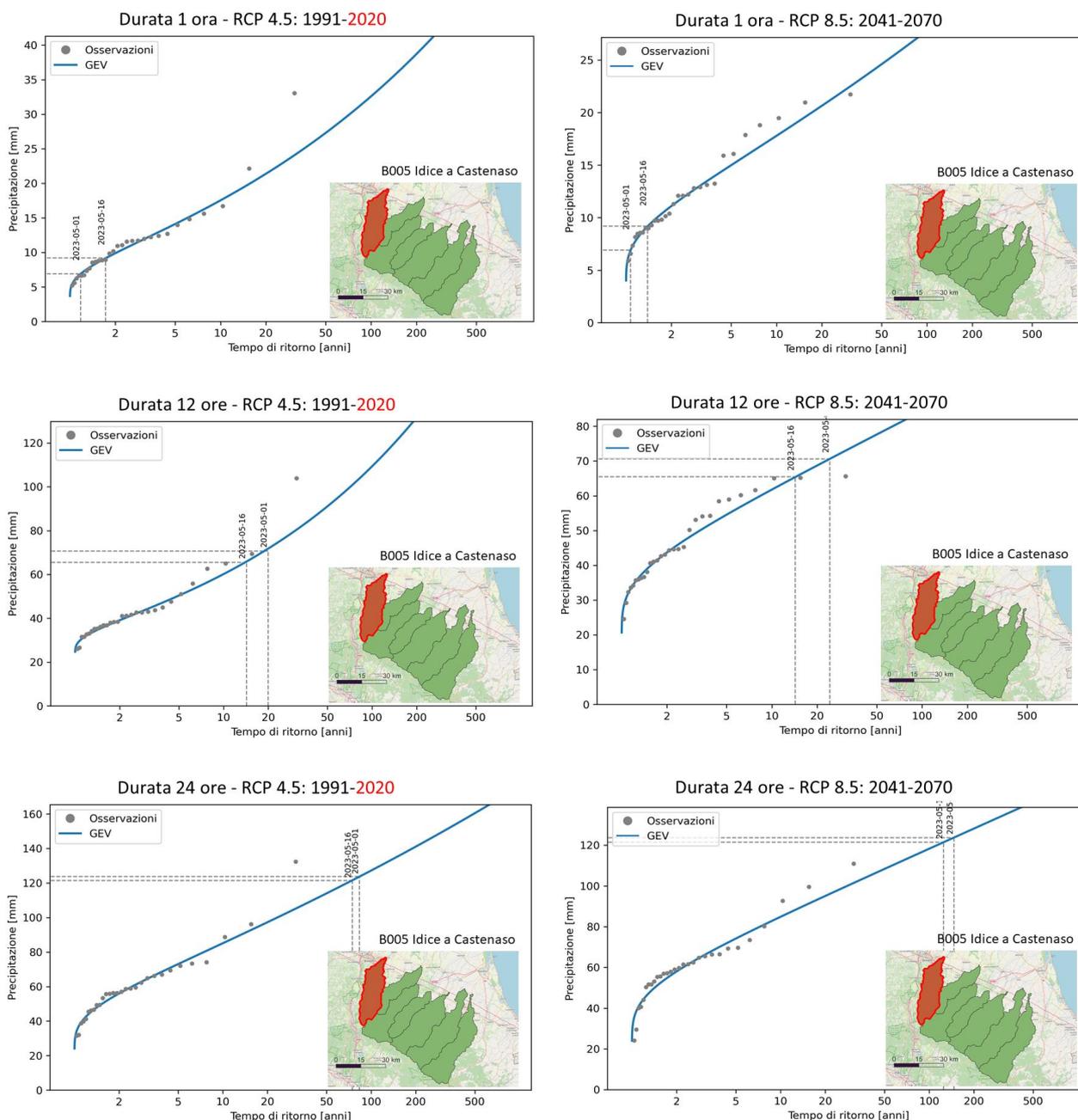


Figura 134 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino dell’Idice chiuso a Castenaso, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

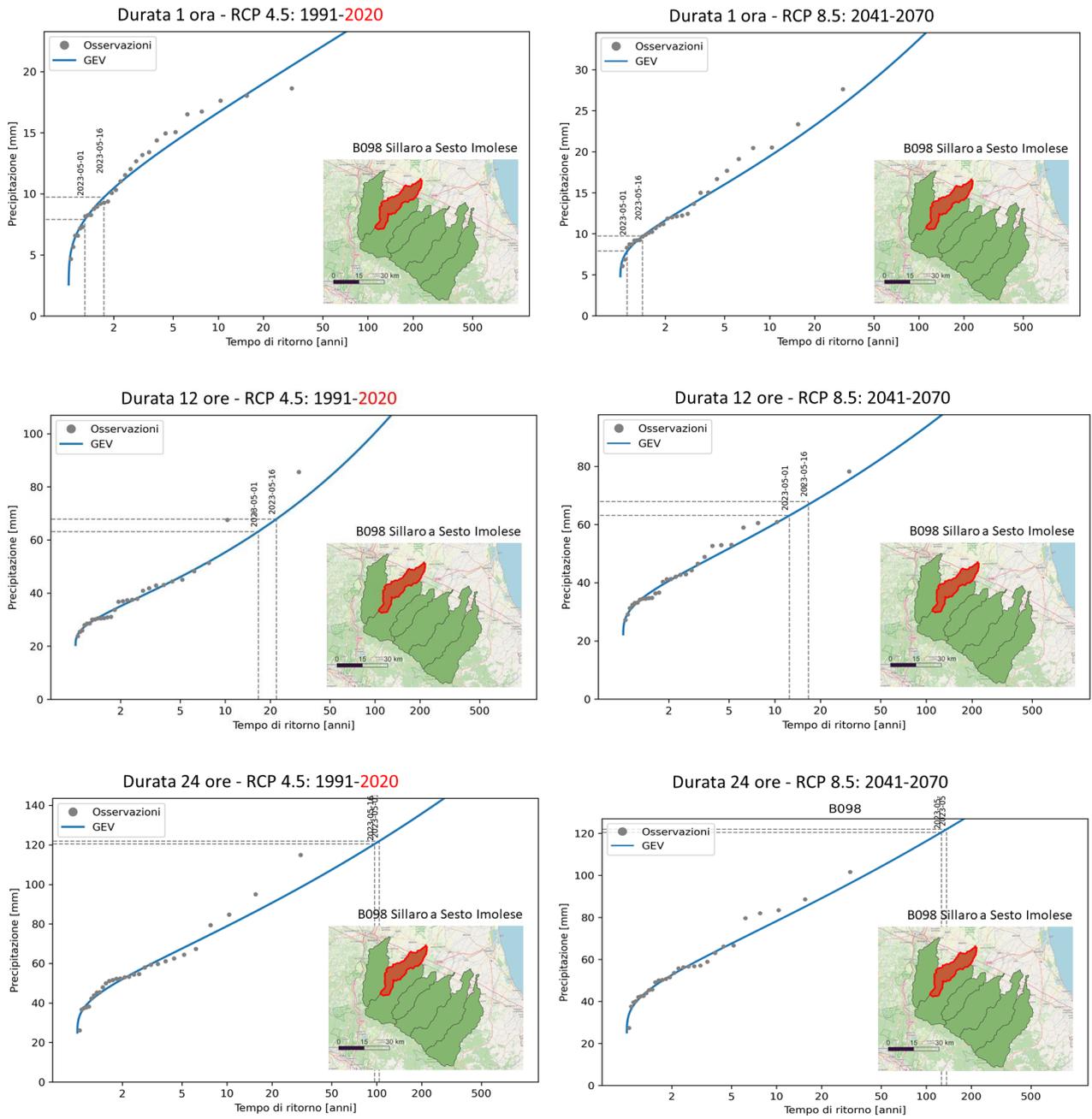


Figura 135 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

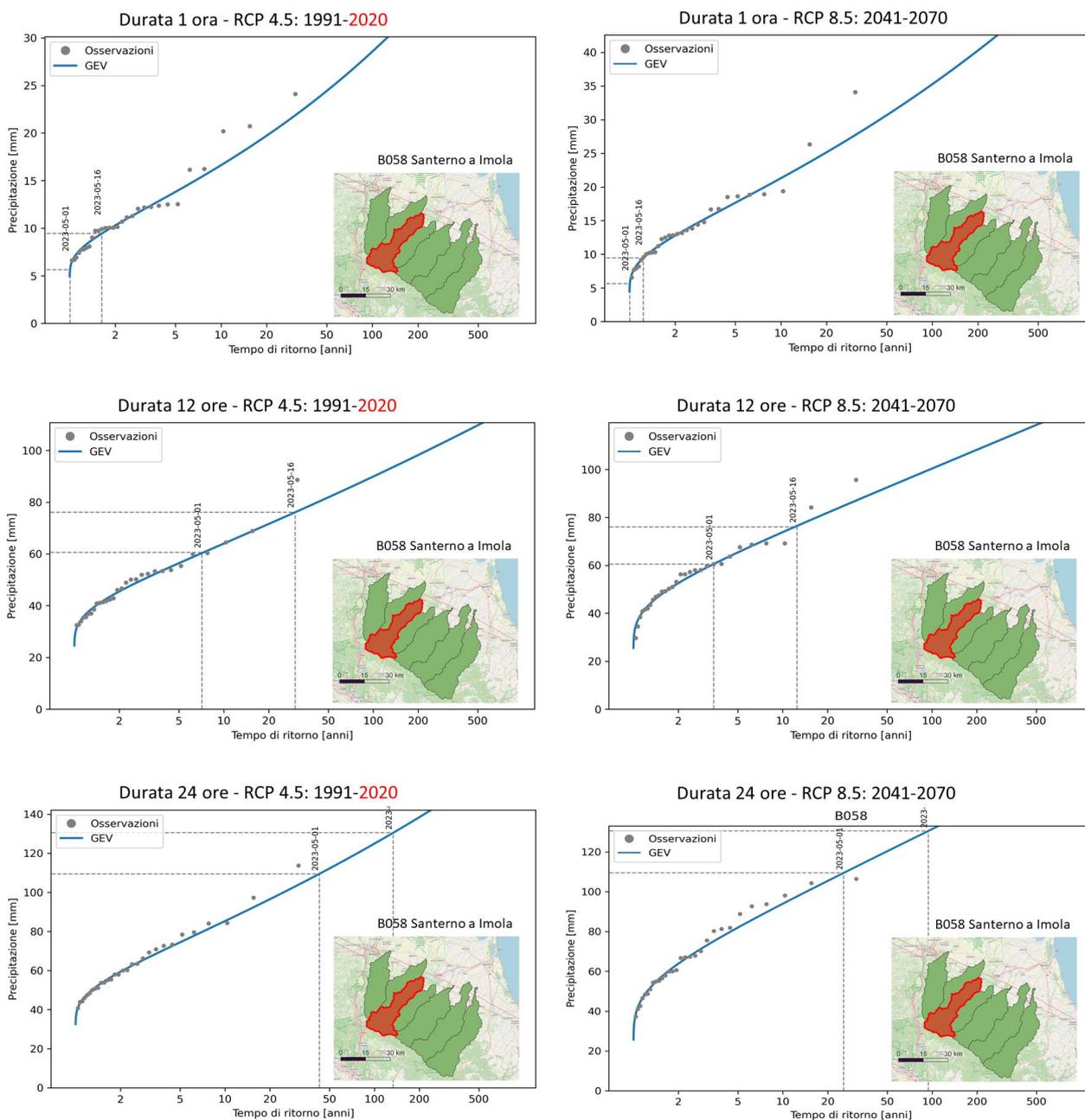


Figura 136 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Santerno chiuso a Imola, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

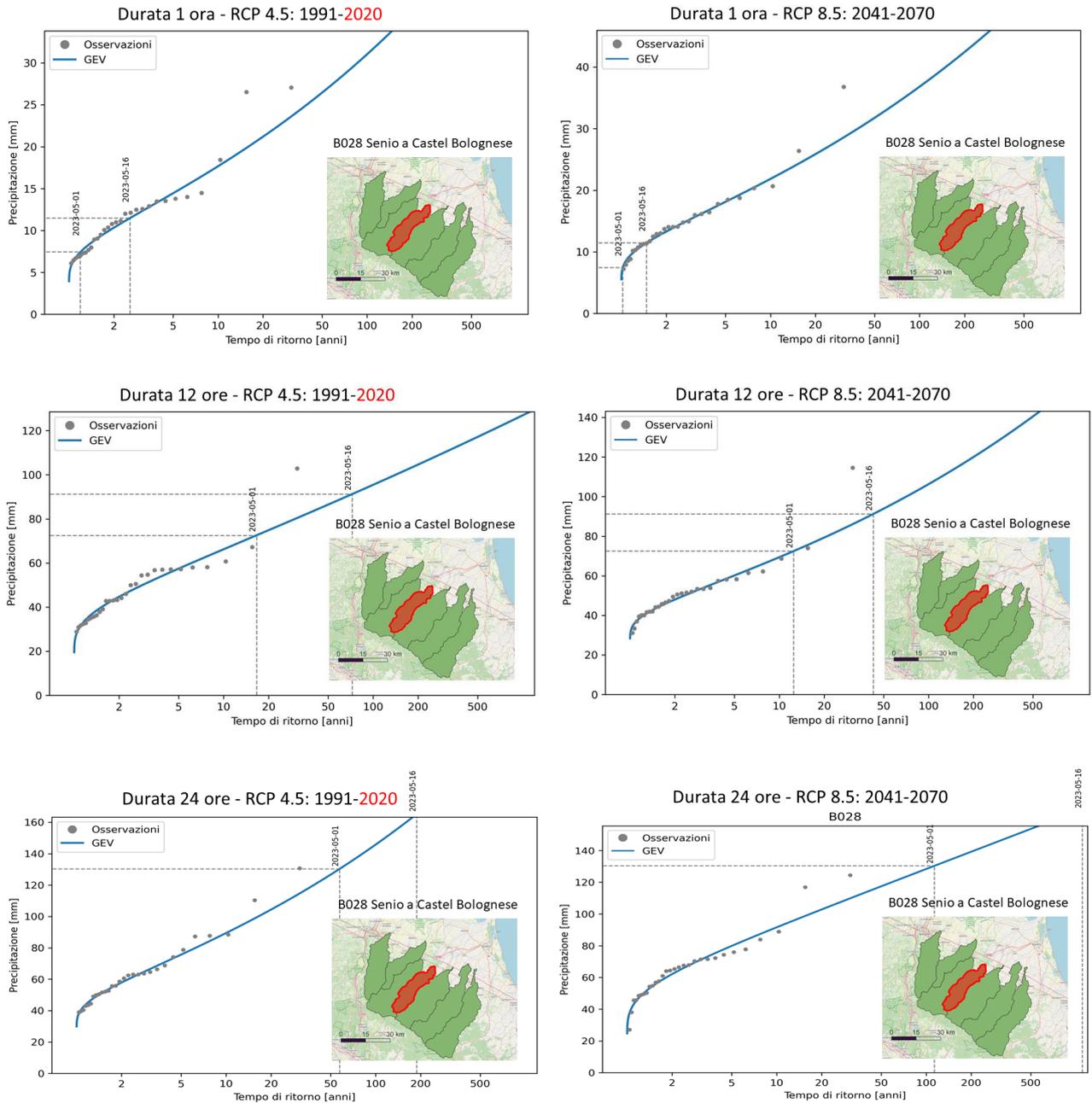


Figura 137 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Senio chiuso a Sesto Imolese, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

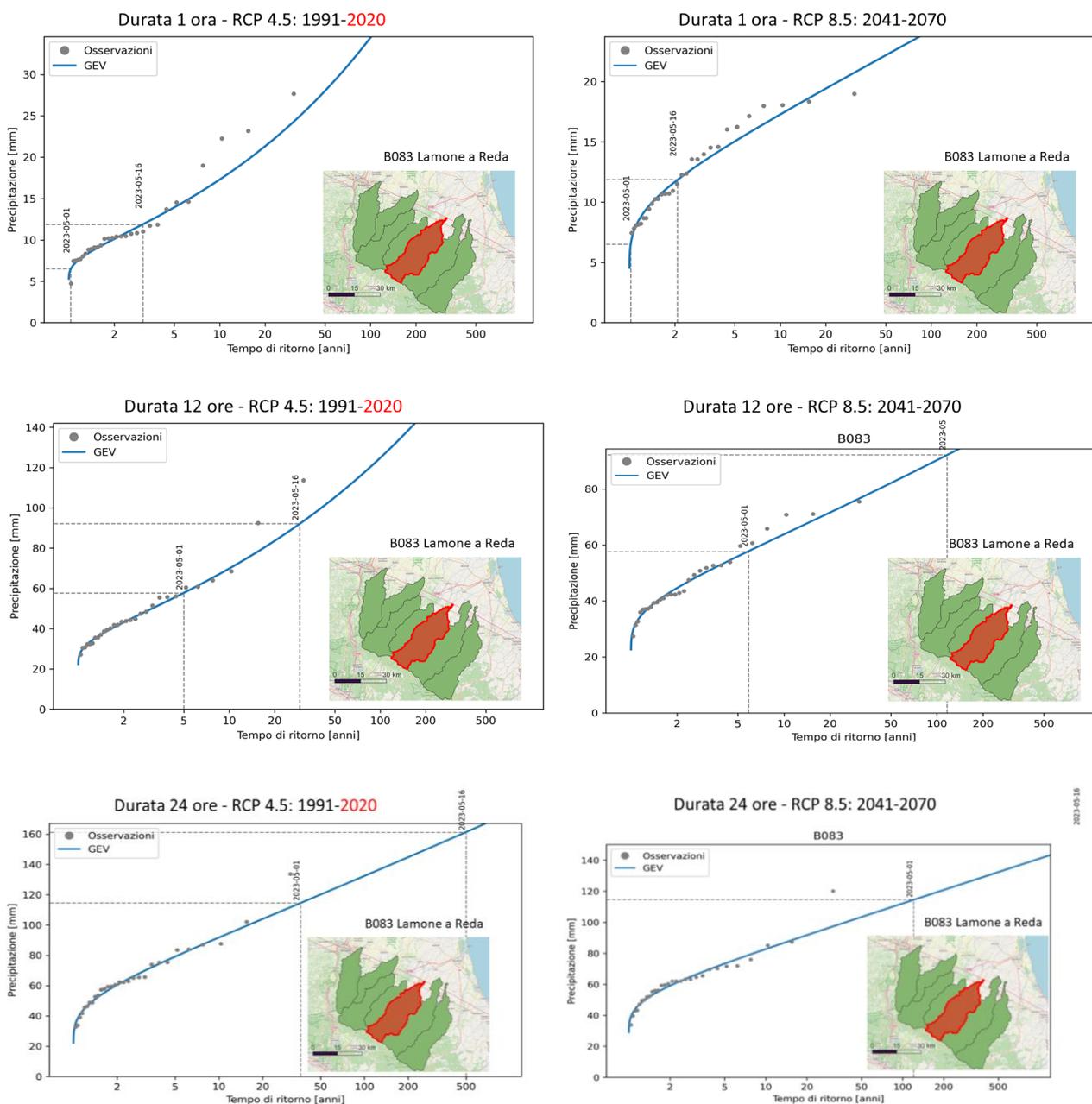


Figura 138 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Lamone chiuso a Reda, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

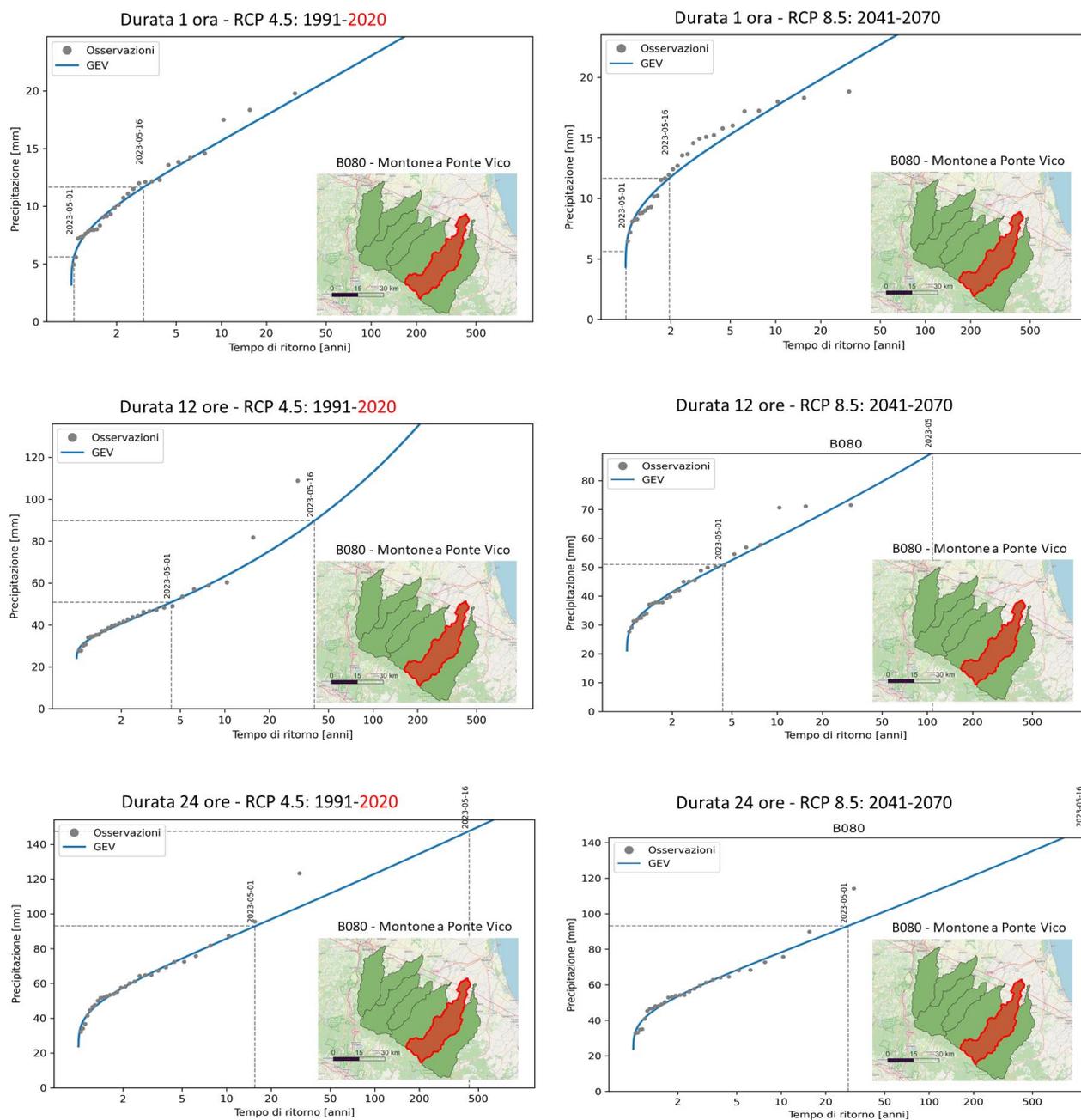


Figura 139 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

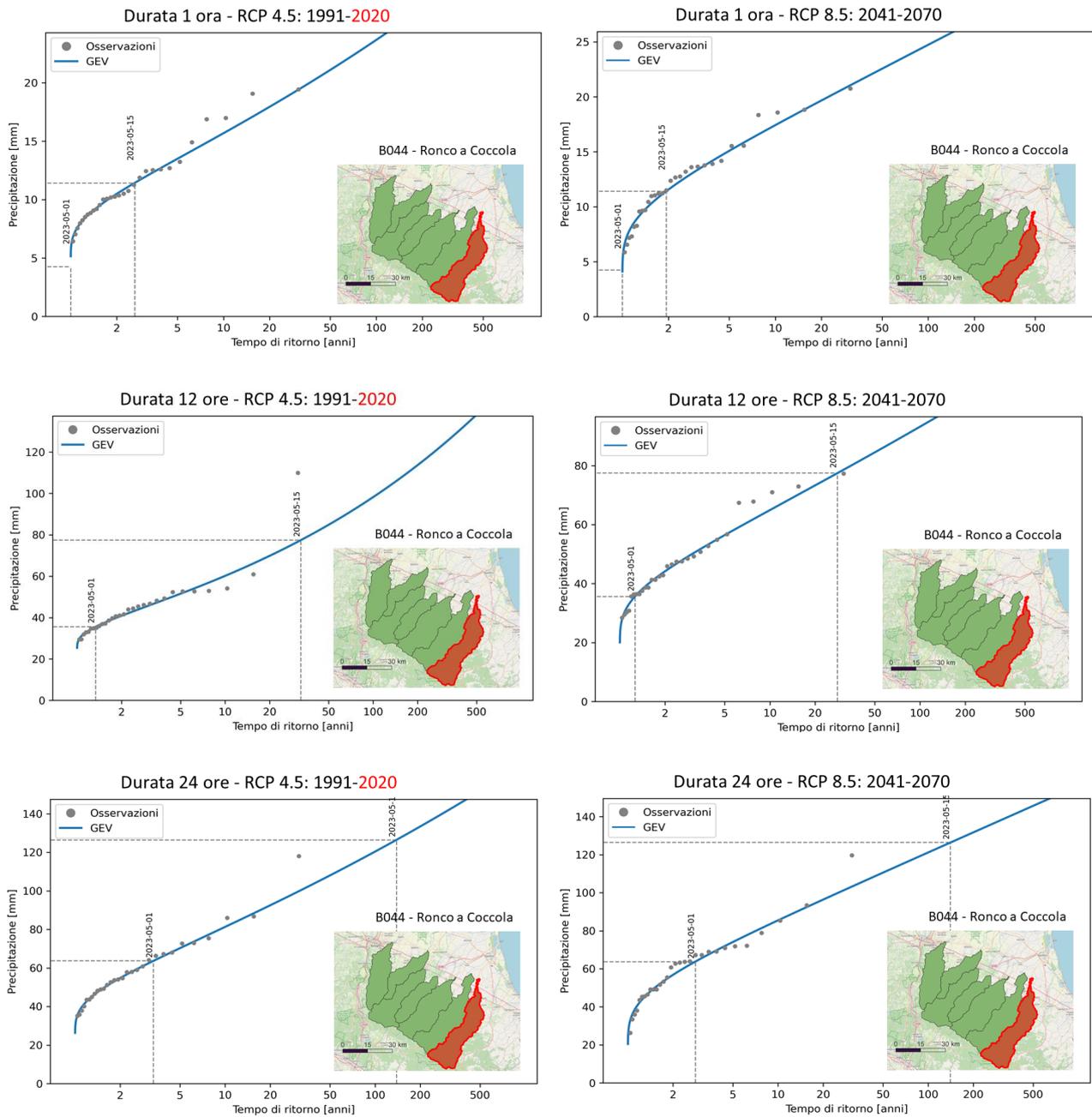


Figura 140 – Analisi delle distribuzioni di probabilità dei valori massimi annuali delle piogge di durata 1 ora, 12 ore e 24 ore per il bacino del Ronco chiuso a Coccia, prodotti dal modello climatico a 2 km: a sinistra, per il periodo 1991-2020 (concentrazioni di gas serra attuali) e, a destra, per il periodo 2041-2070, secondo lo scenario emissivo RCP8.5.

7.3 Analisi dei cambiamenti attesi nelle curve di possibilità climatica

Il presente paragrafo illustra un'ulteriore elaborazione condotta, che consente di apprezzare meglio i cambiamenti attesi delle precipitazioni intense prefigurati dagli scenari climatici, è costituita dall'analisi delle modalità con cui si modificano, rispetto al clima attuale, le curve di possibilità climatica. Un'analisi simile era stata già condotta nel paragrafo 6.2, ma con riferimento al modello VAPI. L'analisi descritta in questo paragrafo si differenzia dalla precedente in quanto viene seguito un approccio notevolmente diverso; il confronto viene qui eseguito tra le curve IDF che si ottengono dalle simulazioni del clima storico condotte con il modello VHR-PRO_IT per l'area di interesse e quelle che si ottengono con lo stesso modello come proiezioni del clima futuro seguendo gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. In analogia con quanto fatto per le piogge giornaliere e discusso al paragrafo 7.1, per la simulazione degli scenari futuri si è fatto riferimento alle piogge orarie previste per trentennio 2041-2070, ovvero l'ultimo trentennio reso disponibile dalle proiezioni disponibili; pertanto, dalle serie orarie 2006-2070 dello scenario RCP4.5 e dello scenario RCP8.5, sono state estratte le rispettive serie relative al sottoperiodo 2041-2070. Le piogge orarie sono state integrate alla scala di 3h, 6 h, 12 h e 24; sono stati quindi estratti i massimi annuali della pioggia nelle durate 1, 3, 6, 12 e 24 h per ciascun anno del periodo 2041-2070, sia per lo scenario RCP4.5 che per quello RCP8.5. Sulla base di questi campioni è stata derivata la distribuzione di probabilità delle piogge massime annuali di 1h, 3h, 6h, 12h e 24 h per ciascuno dei sette bacini; a tal fine, sono stati utilizzati sia il modello GEV che quello di Gumbel, che si è ritenuto di affiancare alla GEV in ragione della dimensione relativamente limitata del campione in base al quale è stimata la distribuzione.

Nella Figura 141, che si riferisce al bacino dell'Idice chiuso a Castenaso, nel riquadro di sinistra sono rappresentate le curve di possibilità climatica per T=20 (linee nere) e per T=200 anni (linee rosse), costruite in base alle simulazioni di pioggia relative al clima attuale (linee continue), allo scenario RCP4.5 (linee tratteggiate) e allo scenario RCP8.5 (linee punteggiate), ottenute impiegando il modello probabilistico di Gumbel; nel riquadro di destra è riportata l'analoga informazione ottenuta applicando il modello probabilistico GEV. Si nota la notevole differenza di comportamento nel caso delle simulazioni relative al clima storico per T=200 anni. La Figura 142 riporta le analoghe informazioni per il bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese; la Figura 143 per il bacino del Santerno chiuso a Imola, la Figura 144 per il bacino del Senio chiuso a Sesto Imolese, la Figura 145 per il bacino del Lamone chiuso a Reda, la Figura 146 per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico, la Figura 147 per il bacino del Ronco chiuso a Coccolia.

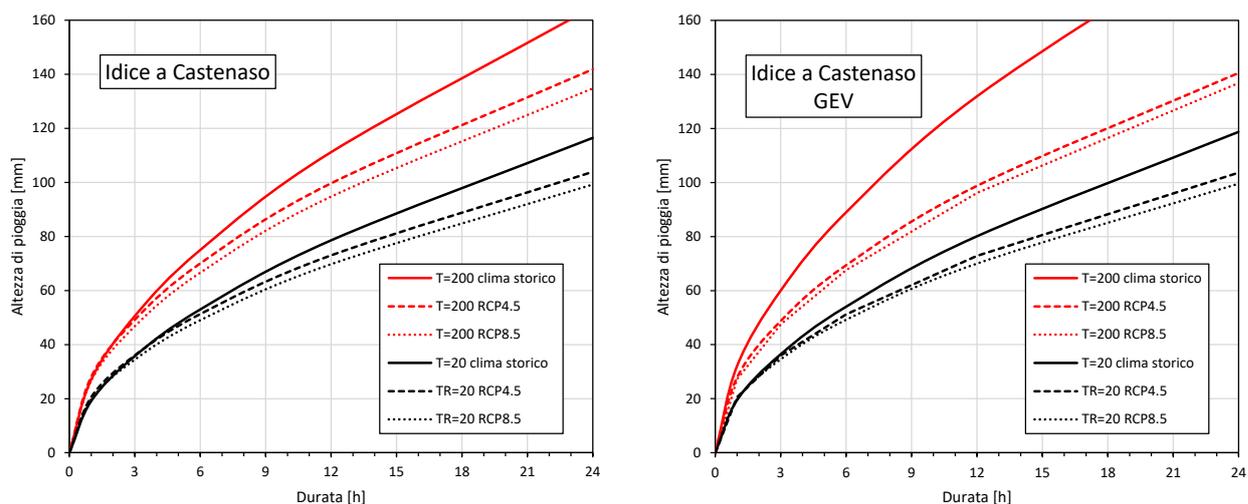


Figura 141 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino dell'Idice chiuso a Castenaso; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

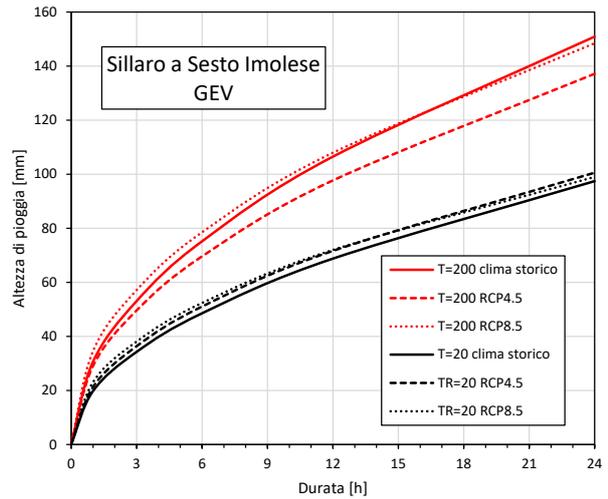
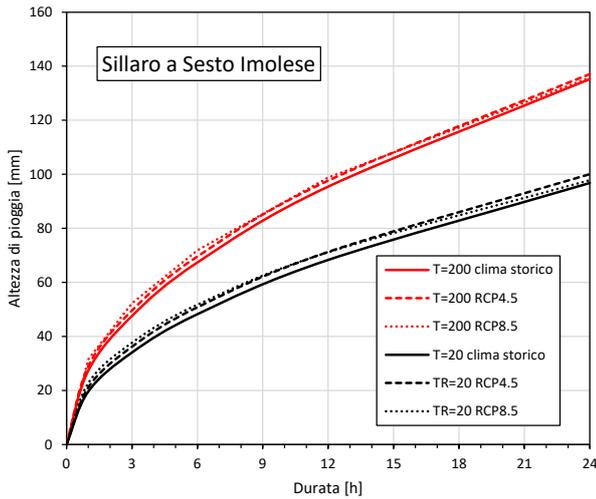


Figura 142 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Sillaro chiuso a Sesto Imolese; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

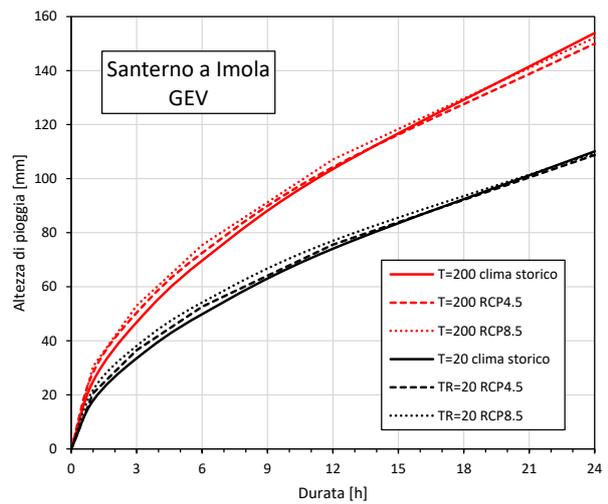
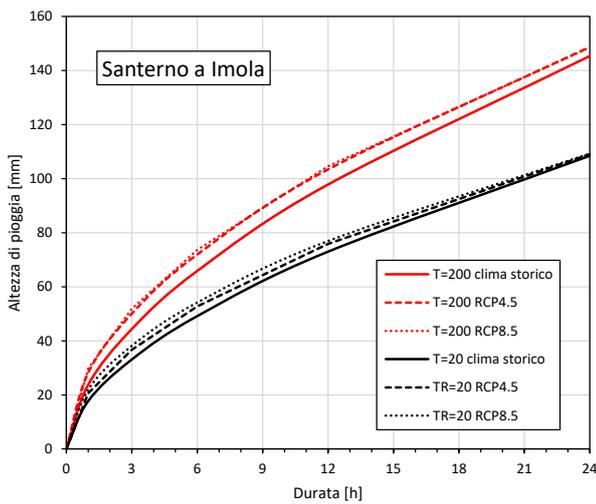


Figura 143 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Santerno chiuso a Imola; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

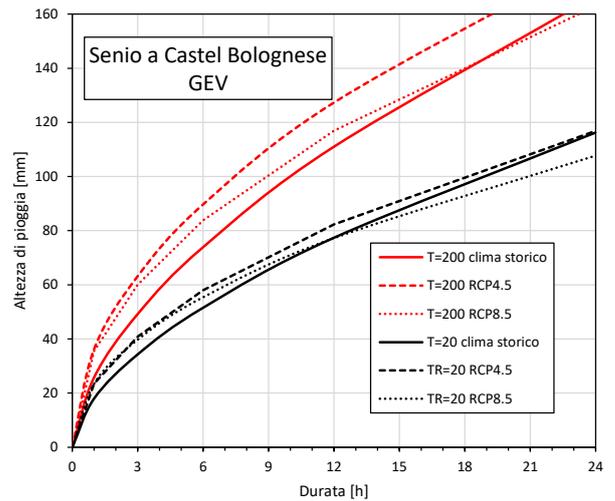
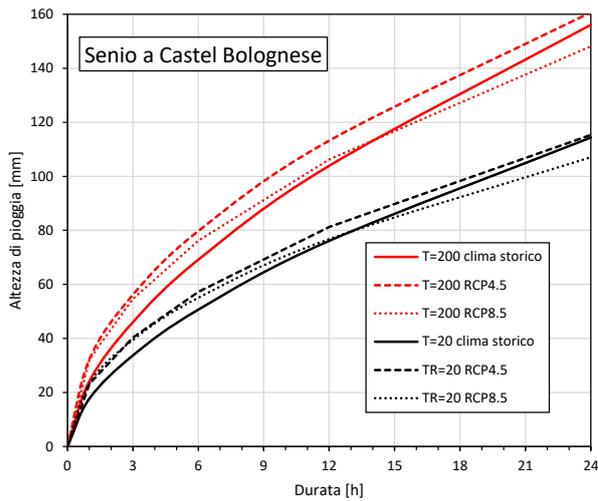


Figura 144 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Senio chiuso a Sesto Imolese; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

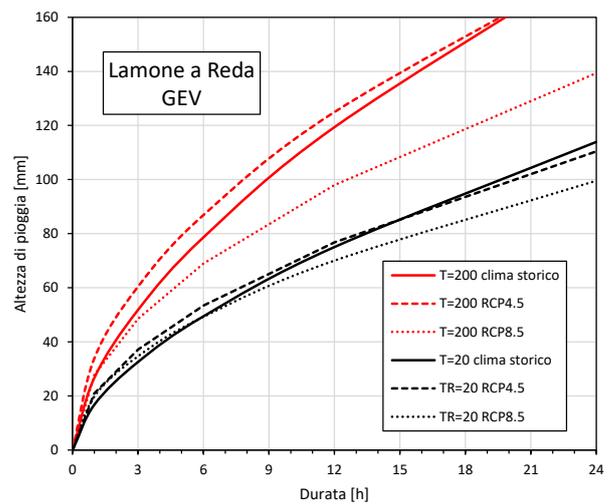
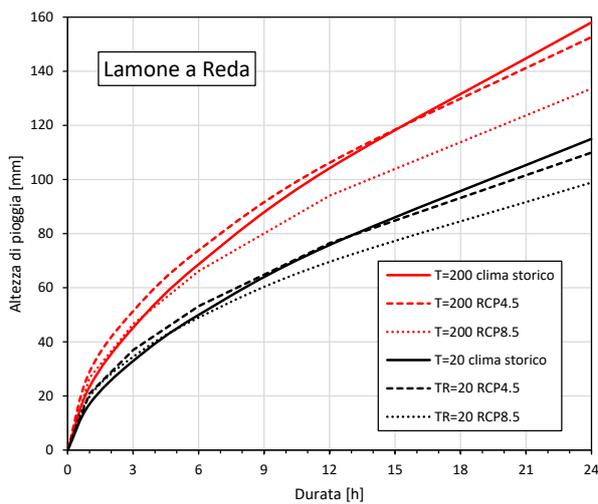


Figura 145 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Lamone chiuso a Reda; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

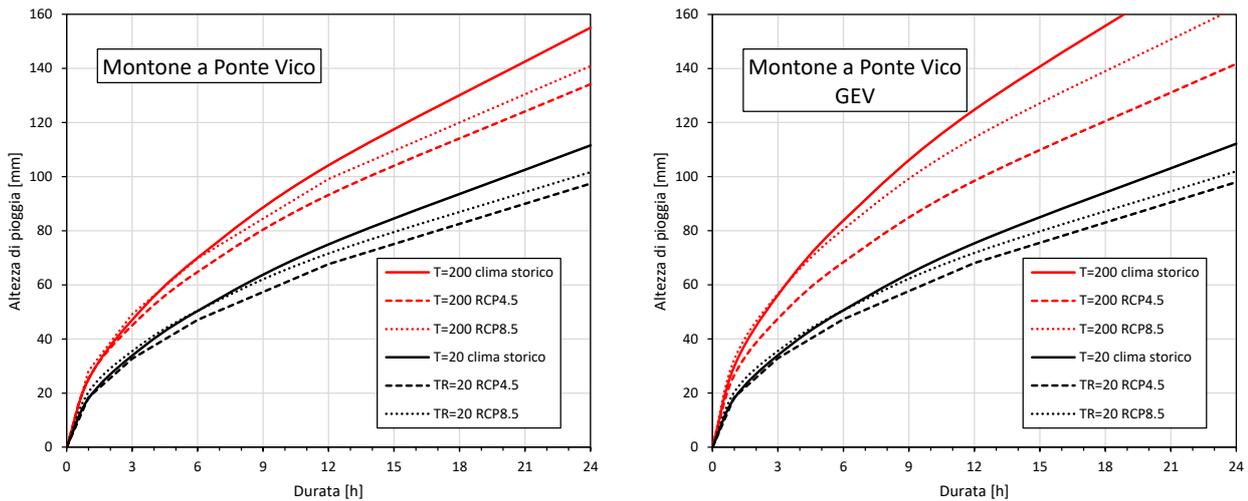


Figura 146 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Montone chiuso a Ponte Vico; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

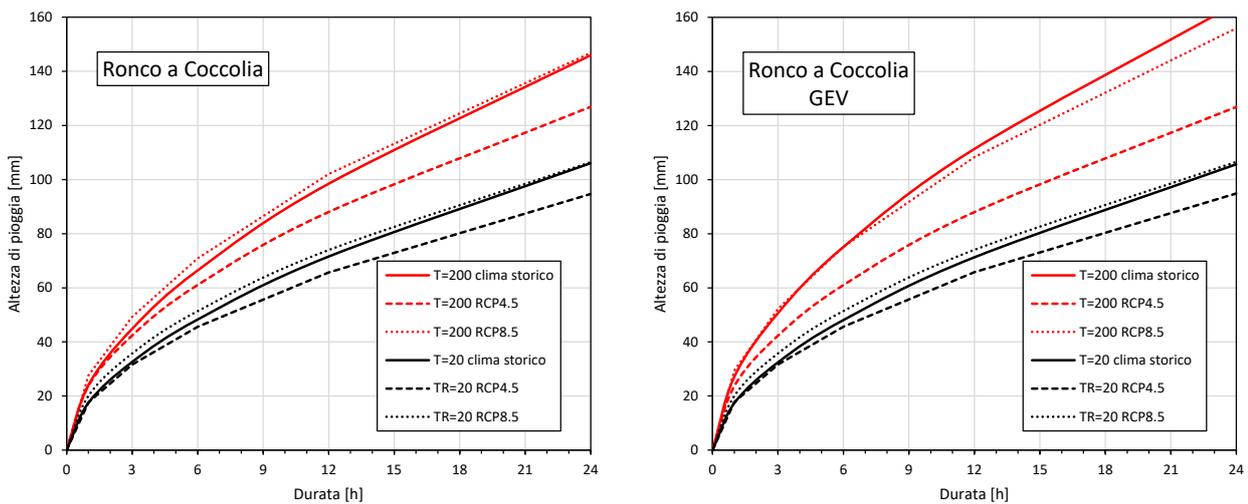


Figura 147 - Confronto tra le curve di possibilità climatica di T=20 e T=200 anni nel caso di clima storico e quelle del periodo 2041-2070 secondo le proiezioni di pioggia degli scenari RCP4.5 e RCP8.5, per il bacino del Ronco chiuso a Coccolia; a sx modello probabilistico di Gumbel, a destra modello probabilistico GEV.

L'analisi dei risultati mostrati nelle figure precedenti porta a evidenziare, in analogia a quanto visto per la distribuzione di probabilità delle piogge giornaliere massime annuali (paragrafo 7.1), importanti differenze di comportamento di bacini fra loro geograficamente vicini e tra loro idrologicamente simili, suggerendo anche in tal caso simili riflessioni. L'approccio presentato si può ritenere adatto solo ad una prima valutazione e valutazioni più accurate, la cui esecuzione in ogni caso si raccomanda, potranno essere ottenute da un lato tramite l'implementazione di operazioni di correzione statistica delle proiezioni climatiche, come il Quantile Mapping, dall'altro grazie all'uso di approcci multimodel, basati sull'uso di proiezioni fornite non da un unico modello climatico come nel caso in esame ma da più modelli, fra i molti le cui risultanze sono disponibili, in modo da potere caratterizzare adeguatamente l'incertezza delle previsioni.

8 Conclusioni e raccomandazioni

8.1 Sintesi delle principali risultanze dello studio

Gli eventi meteorologici del 1-4 e del 16-18 maggio 2023 hanno colpito una vasta porzione della Regione Emilia-Romagna, generando intensi ed estesi effetti al suolo; nella zona valliva, si è verificata l'esondazione di numerosi corsi d'acqua romagnoli e di alcuni affluenti di destra del fiume Reno in ben 23 punti distinti, producendo un volume complessivo di esondazione stimato in circa 350 milioni di m³ che ha provocato l'allagamento di un vastissima area di pianura, estesa per circa 540 km²; nelle aree collinari e appenniniche del bolognese, del ravennate e del forlivese, si sono verificate un totale di 65.598 frane che coprono complessivamente un'area di 72,21 km². Detti eventi hanno provocato l'isolamento di alcune località, evacuazione di numerose famiglie dalle loro abitazioni, gravi danni alle infrastrutture viarie, ad aziende agricole, a edifici pubblici e privati, alle opere di difesa idraulica e alla rete dei servizi essenziali.

L'evento meteorico combinato occorso nella Romagna nel maggio 2023 è stato singolare, rispetto al suo carattere intenso, esteso e persistente. La definizione del grado di eccezionalità delle precipitazioni di tale evento, attraverso l'assegnazione di tempi di ritorno, è influenzata da molti fattori, i principali tra i quali sono la risoluzione dei dati di precipitazione, la durata delle osservazioni storiche, la necessità di tenere conto di medie areali di precipitazione, l'effetto distorsivo che l'inclusione o l'esclusione dell'evento ha sulla stima del suo stesso tempo di ritorno, la natura combinata dell'evento. La definizione del tempo di ritorno delle portate è resa ulteriormente più complessa dagli effetti sinergici dei due importanti eventi di precipitazione che si sono succeduti a distanza di 14 giorni: il secondo evento, generalmente più intenso, avendo avuto un effetto significativamente amplificato dall'aver trovato il territorio già parzialmente o totalmente saturo.

Il risultato delle analisi condotte utilizzando la pluviometria e l'idrometria disponibili sostiene comunque la percezione di un evento senza precedenti nella storia osservata. I tempi di ritorno del singolo evento meteorico del 16 maggio 2023, come era possibile definirli prima del realizzarsi dell'evento, risultano, alla scala giornaliera, maggiori di circa 60 anni, per i bacini ove l'evento è stato meno gravoso, e superiori a 500 anni ove le esondazioni sono state più significative. L'inclusione dei dati osservati nel 2023 riduce, com'è ovvio, i valori del tempo di ritorno stimati, che rimangono però spesso superiori ai 100 anni. L'analisi del tempo di ritorno per durate di pioggia inferiori al giorno restituisce valori decisamente inferiori, tranne che nel caso del bacino del Montone, nel quale le precipitazioni di durata 12 ore hanno avuto tempi di ritorno anch'essi superiori a 100 anni.

La valutazione del tempo di ritorno dell'evento costituito dalla combinazione dei due eventi singoli di precipitazione non è agevole e non vi sono approcci standardizzati che lo permettano. Valutazioni di dettaglio devono necessariamente basarsi su ipotesi piuttosto semplificative, particolarmente per quanto riguarda la dipendenza tra eventi successivi. Una valutazione di massima tuttavia, basata sull'indipendenza tra eventi alla scala giornaliera e plurigiornaliera e sulle probabilità, anch'esse incerte, dei singoli eventi, indica come il tempo di ritorno dell'evento meteorico combinato debba essere ritenuto di gran lunga superiore a quello dei singoli eventi più gravosi.

Per quanto riguarda le frane innescatesi a seguito dei suddetti eventi, il lavoro cartografico di censimento e mappatura delle frane, effettuato dalla Regione Emilia-Romagna, ha portato a censirne un numero molto elevato, in tutto 65.598, che coprono complessivamente un'area di 72,21 km², con un indice di franosità (I.F.) pari a 0,52% del territorio, coinvolgendo particolarmente le province di Forlì-Cesena, Ravenna, Bologna e, in subordine, Rimini, Modena e Reggio Emilia.

Nella relazione, a corredo della mappatura degli eventi franosi sul territorio regionale colpito dagli eventi, sono riportate analisi statistiche sulle tipologie di frana, distribuzione geografica, confronti con le isoiete degli eventi pluviometrici, con le litologie affioranti, con la mappa dell'uso del suolo, con la mappa inventario regionale delle frane e con la cartografia PAI (Piano di Assetto Idrogeologico) di perimetrazione di aree a pericolosità idrogeologica. È stato altresì valutato l'impatto sulle strutture e le infrastrutture, quali edifici, rete stradale e ferroviaria.

Le tipologie di frana dominanti avvenute risultano essere gli scivolamenti rapidi in terra o detrito, le colate di fango, terra o detrito e gli scivolamenti in roccia su piano di strato. In subordine si sono verificate anche frane di scivolamento più profonde sia rotazionali che traslative, fenomeni di crollo, e frane complesse.

La maggiore densità delle frane rilevate è localizzata nelle aree dove sono cadute le quantità massime di pioggia nelle province di Bologna, Ravenna e Forlì-Cesena, a conferma dello stretto nesso causale tra la forzante meteorologica e gli effetti al suolo pluvio-indotti verificatisi nel maggio 2023.

Dal punto di vista litologico le frane di maggio 2023 hanno interessato principalmente territori caratterizzati da rocce torbiditiche (Flysch), costituiti da alternanze di livelli lapidei permeabili e impermeabili, in misura relativamente maggiore rispetto a litologie argillose e sabbiose. Dal punto di vista delle classi di uso del suolo, si evidenzia che la maggioranza delle frane si è verificata principalmente su aree prevalentemente occupate da colture agrarie e in aree boscate.

Le nuove frane innescatesi nel mese di maggio 2023 che ricadono in aree già cartografate nella mappa inventario regionale, disponibile anche sul geoportale IdroGEO di ISPRA, risultano pari al 21,5%. Pertanto, si evidenzia che il 78,5% delle frane avvenute a maggio 2023 si è attivata al di fuori delle aree in frana note nella cartografia esistente. Il 40,5% delle frane ricade nelle due classi a pericolosità più alta (P3 e P4) del Piano di Assetto Idrogeologico PAI dell'Autorità di bacino distrettuale del Fiume Po, mentre più della metà (52,7%) interessa aree non classificate come pericolose.

Le frane hanno causato danni a infrastrutture viarie e manufatti, coinvolgendo 311 edifici e 1950 tratti stradali, pari al 3,6% dell'intero tracciato stradale delle sei province colpite. Il 90,4% degli impatti hanno interessato la viabilità minore, nell'ordine strade comunali, vicinali e private. 14 frane hanno interessato o rasentato in più punti tratti ferroviari, provocando danni soprattutto alla ferrovia Faentina.

Il confronto tra le registrazioni pluviometriche e le soglie di innesco delle frane, definite per la Regione Emilia-Romagna dal Centro per la Protezione Civile dell'Università di Firenze, ha permesso di mettere in luce una buona corrispondenza tra gli effetti al suolo registratisi a seguito delle precipitazioni e i superamenti delle soglie pluviometriche, confermando al contempo il carattere eccezionale degli eventi meteorologici registrati.

Occorre sottolineare come un evento come quello analizzato costituisca un'importante occasione per migliorare la comprensione e la previsione di fenomeni simili. Anche nell'ottica dei cambiamenti climatici che stanno modificando in modo significativo i regimi delle piogge estreme, è importante che ogni nuovo evento come quello analizzato in questo rapporto sia utilizzato per aggiornare la nostra capacità di quantificare le condizioni meteo-climatiche future per sostenere sistematiche misure di adattamento ai cambiamenti climatici.

8.2 Raccomandazioni sulle misure di riduzione del rischio

Alla luce delle risultanze delle approfondite analisi svolte, la Commissione ha ritenuto opportuno definire linee di indirizzo per l'assetto idraulico e idrogeologico del territorio, la regimazione dei corsi d'acqua, la sistemazione dei bacini idrografici e la stabilizzazione dei versanti, per un'effettiva mitigazione del rischio idrogeologico, da mettere a disposizione della Regione Emilia-Romagna.

Considerato il carattere eccezionale dei fenomeni meteorologici, che sono risultati essere eventi straordinari, sia per l'elevata intensità (due eventi consecutivi con tempi di ritorno, determinati sulla base delle informazioni disponibili prima dell'evento, in diversi casi molto maggiori di 500 anni) che per la vastissima estensione territoriale (pressoché l'intera area romagnola, con interessamento anche della regione in destra del Reno e, per il primo dei due eventi, anche dei bacini del Panaro e del Secchia), un'opportuna proposta operativa di gestione territoriale deve essere basata sulla combinazione di interventi non strutturali e strutturali di mitigazione del rischio.

8.2.1 Interventi non strutturali

Per quanto riguarda gli interventi non strutturali, in primo luogo è necessario migliorare le attuali capacità di previsione degli aspetti meteorologici, idraulici e idrogeologici, per una sempre più accurata valutazione degli effetti attesi al suolo nell'ambito del Sistema di Allertamento Regionale.

Tale miglioramento potrà essere conseguito tramite simulazioni preventive con dati ad alta risoluzione per formulare scenari di evento sempre più precisi e adattati ai cambiamenti climatici in atto, ponendosi l'ambizioso obiettivo di costruire un gemello digitale idrogeologico (*digital twin*) a scala regionale. Esso consiste nella rappresentazione digitale del territorio, del reticolo idrografico, del suolo, del sottosuolo, degli abitati e delle opere infrastrutturali, tale da fornire una piattaforma condivisa per la raccolta di dati satellitari, da droni, dalle reti di monitoraggio *in situ*, per consentire la loro immediata elaborazione con strumenti di calcolo ad alte prestazioni. Il gemello digitale potrà consentire analisi di scenario e la risposta a quesiti *what if* per migliorare significativamente la previsione degli effetti al suolo in risposta alle forzanti meteorologiche.

Risulta poi fondamentale aggiornare il quadro conoscitivo del territorio attraverso la nuova redazione dei principali strumenti in ambito di pianificazione, quali carte di pericolosità e rischio idraulico e da frana, alla luce dei nuovi scenari climatici e delle nuove conoscenze acquisite a seguito di eventi catastrofici come questi di maggio 2023. In particolare, per quanto riguarda le frane, questo evento ci insegna che non è sufficiente limitarsi a perimetrare come pericolose le aree già colpite in passato da eventi franosi, bensì è assolutamente necessario definire modelli di suscettibilità, anche basati sull'intelligenza artificiale e su tecniche di analisi *big data*, per classificare in modo opportuno la pericolosità idrogeologica in aree non già colpite da dissesti, sulla base dei fattori predisponenti.

Per quanto riguarda invece il rischio di alluvione, l'evento ha mostrato il ruolo decisivo esercitato dalla rete artificiale di scolo presente sul territorio di pianura (reticolo di bonifica e Canale Emiliano Romagnolo) sulla dinamica di propagazione delle inondazioni provenienti dalla rete idrografica principale; ciò porta a raccomandare l'esecuzione di accurate modellazioni specifiche di scenario, intese a valutare gli effetti che questa rete artificiale potrebbe avere sulla dinamica di possibili inondazioni future. Modellazioni che peraltro potrebbero consentire di acclarare le migliori opzioni di gestione che la rete artificiale di scolo può offrire, anche con opportuni interventi migliorativi, ai fini della mitigazione degli impatti che il verificarsi di un evento simile a quello occorso può determinare sul territorio.

Le potenti risorse di calcolo ad alte prestazioni disponibili nella Regione possono essere strumenti decisivi per far un salto di qualità per la previsione sia spaziale che temporale dei fenomeni di dissesto idraulico e idrogeologico, tenendo altresì conto degli scenari di cambiamento climatico messi a disposizione dalla comunità scientifica. In questo senso si raccomanda lo sviluppo di analisi utili ad una più accurata quantificazione degli effetti attesi del cambiamento climatico a scala regionale.

È inoltre necessario migliorare la pianificazione di protezione civile e collegarla in modo diretto con il sistema di allertamento per il rischio idraulico e idrogeologico, secondo i paradigmi *early warning for all* e *linking early warning to early action*, che costituiscono il cardine delle politiche internazionali di riduzione del rischio di disastri. Per rendere questo possibile, è importante portare a piena conoscenza di tutti i cittadini sia il sistema di allertamento che i piani di protezione civile, mediante il pieno utilizzo dei moderni sistemi di comunicazione e attraverso esercitazioni a tutti i livelli: il cittadino deve sapere prima cosa fare in caso di evento calamitoso, in modo da attuare tutte quelle misure di autoprotezione che consentono di limitare i danni a se stesso e agli altri.

Risulta anche di fondamentale importanza procedere ad attente verifiche sulla pianificazione del territorio, che vadano ad agire concretamente sulla riduzione del consumo di suolo e sul ripristino delle aree di pertinenza fluviale. Per questi obiettivi sono necessarie una decisa semplificazione burocratica e delle opportune agevolazioni fiscali che rendano più convenienti le ristrutturazioni e le riqualificazioni delle aree già edificate e abbandonate, piuttosto che le nuove edificazioni su terreni "vergini".

Bisogna essere ben consapevoli che ogni nuova costruzione su terreni non precedentemente edificati conduce inevitabilmente all'aumento dell'esposizione al rischio, oltretutto all'impermeabilizzazione del suolo,

con conseguente riduzione dei tempi di concentrazione delle piene e aggravamento dell'instabilità dei terreni superficiali.

8.2.2 Interventi strutturali

Gli interventi strutturali di mitigazione del rischio devono consistere in opere di ingegneria opportunamente progettate e preventivamente realizzate, anche attraverso l'utilizzo delle più recenti innovazioni in campo scientifico e ingegneristico.

Per quanto riguarda i fenomeni franosi, sulla base delle osservazioni e dei dati raccolti si suggerisce di contrastare la pericolosità idrogeologica tramite la realizzazione di interventi strutturali a piccola-media scala, consistenti in opere di stabilizzazione di singoli versanti e di regimazione delle acque superficiali, con particolare attenzione al reticolo idrografico minore, unitamente ad una corretta manutenzione del territorio e all'adozione di buone pratiche agricolo-silvo-pastorali.

Considerata infatti la vastità del problema e l'esteso areale coinvolto, è raccomandabile investire in tante opere diffuse, quali sistemazioni idrauliche e forestali dei bacini montani, regimazioni idrauliche delle aree di pianura e collinari e realizzazione di opere di consolidamento dei versanti.

Una particolare attenzione va dedicata alla redazione di Piani Forestali di Indirizzo Territoriale (PFIT) che rappresentano uno strumento per la conoscenza e la gestione sostenibile del territorio agro-forestale a scala di bacino, per l'integrazione dei diversi servizi ecosistemici erogati dalla foresta e per la prevenzione e mitigazione dei potenziali rischi (rischio idraulico, idrogeologico e incendi).

Per quanto invece riguarda i fenomeni alluvionali, sulla scorta dell'onda emotiva suscitata dall'evento, è stato da più parti detto che, a valle di questo evento, "non è possibile pensare di ricostruire e costruire come prima"; non si può non concordare, almeno in linea di principio, con questa affermazione, pur nella consapevolezza dell'estrema difficoltà di attuazione di questo principio. Quello che è certo, tenuto conto sia dell'eccezionalità dell'evento che delle peculiarità del territorio, è che appare necessaria una profonda revisione dell'approccio tradizionale alla difesa idraulica e idrogeologica del territorio.

Va detto innanzitutto che, per quanto riguarda il rischio idraulico, l'evento in questione ha mostrato chiaramente la necessità di innalzare il livello di protezione dai fenomeni alluvionali rispetto ai livelli garantiti dalle opere di presidio attualmente presenti sul territorio, ancora lontano dagli standard ritenuti ottimali nella pianificazione di bacino.

In questa ottica, assume certamente primaria importanza la realizzazione di nuove opere di laminazione delle piene, quali casse di espansione e invasi montani; si tratta di opere idonee a immagazzinare i deflussi idrici di piena, riducendo in tal modo i colmi delle onde che transitano a valle. Opere che possono essere pensate a scopi multipli, contribuendo ad accumulare riserve idriche utilizzabili nei periodi siccitosi per scopi potabili o irrigui, visto che, è bene ricordare, in un'ottica di cambiamento climatico, vi è anche un'altra complessa emergenza da fronteggiare, quella della siccità. Non mancano sul territorio romagnolo opportunità favorevoli e localizzazioni idonee per la realizzazione di casse di espansione vallive e nemmeno di invasi montani; tuttavia, la morfologia del territorio fa dubitare che siano reperibili volumi di invaso così importanti da consentire di elevare in maniera decisiva il grado di protezione idraulica offerto dalle opere esistenti così da poter raggiungere quello che è normalmente l'obiettivo della pianificazione di bacino, ovvero il contrasto della piena 200-ennale.

Del pari, andranno attentamente considerati interventi strutturali indirizzati a restituire maggiore spazio ai fiumi, che prevedano, ove possibile, modifiche della sagoma degli alvei e arretramenti verso campagna dell'attuale posizione dei rilevati arginali. Tuttavia, nel caso in esame, l'assetto del territorio e la diffusa presenza di insediamenti urbani e di infrastrutture vitali di trasporto in adiacenza ai fiumi rende questi interventi attuabili solo in alcune situazioni locali e non a una scala territoriale di asta fluviale.

Per quanto riguarda la manutenzione degli alvei fluviali, alla luce della caratterizzazione statistica dell'evento alluvionale che ne ha chiaramente evidenziato l'eccezionalità, il ruolo della vegetazione ripariale quale fattore causale degli effetti al suolo dell'evento sembra essere stato eccessivamente enfatizzato nel dibattito

pubblico che ha fatto seguito all'evento. Per il futuro, comunque, si raccomanda la predisposizione di appositi piani di gestione della vegetazione ripariale che indirizzino, su solide basi tecnico-scientifiche, la manutenzione degli alvei fluviali; tali piani dovranno valutare attentamente, caso per caso, i migliori punti di equilibrio tra gli aspetti idraulici e tutti gli altri servizi ecosistemici svolti da questa fascia di vegetazione, effettuando, per quanto necessario, modellazioni matematiche specifiche riferite ai diversi possibili assetti vegetazionali e definendo, in base alle risultanze di queste ultime, opportuni protocolli di gestione della vegetazione ripariale.

Sempre in tema di rischio idraulico, una riflessione di grande importanza emersa a seguito dell'evento è quella della necessità di superare la rigidità di alcuni obiettivi della pianificazione di bacino. Ad oggi la pianificazione degli interventi di difesa idraulica del territorio è ancorata all'obiettivo di difendere tutto il territorio dall'evento di piena a ricorrenza duecentennale; a questo obiettivo si commisurano la pianificazione, il proporzionamento e la progettazione delle opere di difesa idraulica. Orbene, anche alla luce di quanto avvenuto in Emilia-Romagna, questo obiettivo sembra meritevole di essere riconsiderato. Da un lato alla luce del fatto che, in molte situazioni, la stratificazione di vincoli e condizionamenti infrastrutturali, territoriali, urbanistici esistenti lo rende tecnicamente impraticabile; si pensi, solo ad esempio, alle enormi difficoltà poste dall'adeguamento alla piena duecentennale di alcune infrastrutture di trasporto, in particolare linee ferroviarie, soprattutto laddove attraversano centri abitati. Dall'altro lato, sembra concettualmente poco sensato e anche, almeno in una situazione di risorse economiche comunque limitate, in qualche modo velleitario porsi l'obiettivo di assicurare il medesimo livello di protezione ad aree che hanno beni e valori esposti molto diversi l'uno dall'altra. Per riprendere una celebre frase che Giulio De Marchi scrisse subito dopo l'alluvione del Polesine del 1951: occorrerebbe "considerare... l'intero territorio come una entità unica e solidale, da proteggere con il minimo danno complessivo".

Occorrerebbe quindi passare a una pianificazione degli interventi di difesa idraulica che, superando le rigidità dell'impostazione attuale, sia indirizzata a minimizzare il rischio residuale, ovvero quella inevitabile porzione di rischio che permane anche dopo la realizzazione degli interventi. E' del tutto chiaro che i criteri attuali, legati all'adozione di un unico tempo di ritorno di riferimento per tutto il territorio, non tengono conto, anzi obiettivamente contravvengono, questo principio. Chiaramente, si tratta di una questione di grande rilevanza, della quale va verificata la fattibilità ai sensi della legislazione e dei regolamenti vigenti, e la cui percorribilità potrebbe necessitare anche di adeguamenti normativi.

Nella medesima ottica innovativa, si colloca anche l'uso sistematico dell'inondazioni controllate di specifiche porzioni di territorio esterne al sistema difensivo attuale, quale strategia di mitigazione del rischio residuale di inondazione. Si tratta di prendere in considerazione e valutare allagamenti controllati, con moderati tiranti, da effettuarsi in caso di piene eccezionali, di aree di minor pregio a maggiore salvaguardia di altre aree caratterizzate da una maggiore esposizione in termini di beni e valori insediati. Qualche esempio, relativamente circoscritto ma comunque encomiabile, di allagamento controllato di territori di minore pregio per preservare dall'alluvione aree cittadine si è avuto nella gestione emergenziale dell'evento del maggio 2023. Appare però raccomandabile che queste operazioni non siano definite in un contesto emergenziale ma seguano le indicazioni di una preesistente pianificazione idraulica di dettaglio; si suggerisce quindi l'approntamento di un piano di allagamenti controllati che possa essere utilizzato in caso di accadimento o nell'imminenza di importanti eventi di piena, non contenibili dal reticolo idrografico. Tale piano sarà prezioso nel non breve intervallo di tempo necessario all'approntamento delle opere strutturali di mitigazione del rischio e comunque utile anche successivamente allo stesso, qualora dovessero verificarsi eventi più intensi di quello di progetto.

L'utilizzo della strategia degli allagamenti controllati porta con sé la necessità di considerare un ricondizionamento dei rilevati arginali, al fine di renderli idonei a sopportare la tracimazione senza che si inneschino breccie che portano al rapido crollo del manufatto. La questione del ricondizionamento dei rilevati arginali è di grande interesse anche in se stessa e ha una valenza intrinseca, indipendente dalla predisposizione di strategie di allagamento controllato. Ciò in quanto i volumi di esondazione uscenti a campagna nel caso di un argine, ricondizionato in modo da sopportare il sormonto, sono notevolmente inferiori a quelli che uscirebbero da una breccia arginale. Pertanto, il ricondizionamento degli argini, da

effettuarsi localmente, nelle zone in cui l'assetto geometrico del rilevato rende più probabile il sormonto, può comportare una netta diminuzione dei volumi esondati a campagna.

La questione della definizione di strategie di mitigazione del rischio residuale di inondazione attraverso allagamenti controllati, ma anche quella del semplice ricondizionamento degli argini, sono notevolmente complesse. Sia per le già notevoli complicazioni derivanti da aspetti puramente tecnici, quali la corretta definizione della sollecitazione idrologica, ovvero dell'onda di piena di riferimento, i problemi tecnologici legati allo svolgimento in condizioni di sicurezza della tracimazione arginale, quelli dell'ordinata gestione dell'allagamento dei territori esterni alle arginature, del rapido ed efficiente smaltimento attraverso la rete minore dei volumi esondati. Sia, soprattutto, per le implicazioni socio-economiche, gli aspetti di formazione del consenso sociale e quelli comunicativi.

Infine, si segnala che, a livello nazionale, sarebbe importante approntare un grande programma di investimenti pubblici per implementare opere efficaci di difesa contro i rischi idrogeologici e idraulici. Esso dovrebbe procedere di pari passo con una decisa semplificazione normativa. È infatti necessario superare l'eccessiva regolamentazione che, negli ultimi decenni, ha interessato il settore dei contratti pubblici, ostacolando l'azione della pubblica amministrazione, ritardando gli investimenti pubblici e penalizzando soprattutto la piccola e media impresa nel settore della difesa del suolo e della protezione idrogeologica.

Infine, va segnalato come la pianificazione degli interventi strutturali e non strutturali, in un'ottica di strategia di adattamento, debba essere eseguita tenendo attentamente conto degli impatti derivanti dai cambiamenti climatici, attesi lungo l'intero periodo di vita utile delle opere, adeguatamente quantificati attraverso analisi modellistiche a scala opportuna.

Quanto sopra esposto propone strategie di carattere generale, che dovranno però trovare declinazione specifica e connotazione per ogni singolo corso d'acqua e bacino, tenendo conto delle sue specificità idrologiche e territoriali. Vista la complessità del percorso attuativo prospettato e gli elementi di novità rispetto al passato che esso presenta, pare superfluo raccomandare che esso sia accompagnato da un costante supporto tecnico-scientifico.

In conclusione, l'evento che ha colpito la Regione Emilia-Romagna nel maggio 2023 ha avuto caratteristiche di intensità e vastità territoriale tali da potere essere considerato uno spartiacque tra passato e futuro nel settore della difesa idraulica e idrogeologica del territorio. L'evento ha chiaramente mostrato come non sia oggi proponibile una ricostruzione che preveda la semplice riproposizione di modelli di intervento per la difesa idraulica e idrogeologica del territorio tipici del passato. L'urgenza di intervenire nella ricostruzione non deve quindi pregiudicare lo sviluppo dei percorsi di approfondimento tecnico-scientifico necessari all'implementazione di modelli di intervento adeguati all'altezza delle sfide che debbono essere affrontate.

9 Ringraziamenti

Si ringraziano per il prezioso supporto alle attività della Commissione:

- La Direzione generale Cura del Territorio e dell'Ambiente della Regione Emilia-Romagna
- L'Agenzia Prevenzione Ambiente e Energia - Struttura Idro-Meteo-Clima della Regione Emilia-Romagna
- L'Agenzia per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile della Regione Emilia-Romagna
- Il Settore Difesa del Territorio della Regione Emilia-Romagna
- Il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna
- Il Settore aree protette, foreste e sviluppo zone montane della Regione Emilia-Romagna
- L'Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po

Si ringraziano inoltre per la fattiva collaborazione:

- Ing. Giuliana Barbato - Fondazione CMCC
- Dott. Tommaso Beni - Università degli Studi di Firenze
- Prof.ssa Silvia Bianchini - Università degli Studi di Firenze
- Dott.ssa Alessia Bono - Università degli Studi di Torino
- Ing. Giacomo Capitani - Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Dr. Maria Francesca Caruso - Università degli Studi di Padova
- Prof. Attilio Castellarin - Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Dott. Pierluigi Confuorto - Università degli Studi di Firenze
- Dott. Pietro Devò - Università degli Studi di Padova
- Prof. Alessio Domeneghetti - Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Sig. Hamidreza Eshaqi - Università degli Studi di Padova
- Dott.ssa Rachele Franceschini - Università degli Studi di Firenze
- Dott. Alessio Gatto - Università degli Studi di Firenze
- Ing. Gianluca Lelli - Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Prof. Federico Magnani - Alma Mater Studiorum Università di Bologna
- Prof. Davide Pettenella - Università degli Studi di Padova
- Ing. Mario Raffa - Fondazione CMCC
- Ing. Alfredo Reder - Fondazione CMCC
- Ing. Guido Rianna - Fondazione CMCC
- Dott. Santatriniaina Omena Finaritra Andriamanantena - Università degli Studi di Padova
- Prof. Samuele Segoni - Università degli Studi di Firenze

10 Riferimenti bibliografici

- Alewell C., Bebi P. (2011). Forest Development in the European Alps and Potential Consequences on Hydrological Regime. In: Bredemeier, M., Cohen, S., Godbold, D.L., Lode, E., Pichler, V., Schleppe, P. (Eds.), *Forest Management and the Water Cycle: An Ecosystem-Based Approach*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 111-126.
- Brath A., Franchini M. (1999) La valutazione delle piogge intense su base regionale, in Maione, U. e A. Brath (eds.) *L'ingegneria naturalistica nella sistemazione dei corsi d'acqua*, Atti del Corso di aggiornamento, Milano, ottobre 1998, Editoriale BIOS, Cosenza, settembre 1999.
- Brath A., Castellarin A., Franchini M., Galeati G. (1999). La stima della portata indice mediante metodi indiretti. *L'Acqua*, 3, 9-16.
- Brown A.E., Western A.W., McMahon T.A., Zhang L. (2013). Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves. *Journal of Hydrology* 483, 39-50.
- E. Bucchignani M., Montesarchio A.L., Zollo, Mercogliano P. (2015), High resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century, *International Journal of Climatology*, , DOI: [10.1002/joc.4379](https://doi.org/10.1002/joc.4379).
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?, *Journal of Climatology*, 28, pp. 6938-6959.
- Caine N (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska annaler: series A, Physical geography*, 62(1-2), 23-27.
- Casagli et al. (2020) Convenzione Quadro tra Regione Emilia-Romagna - Agenzia per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile e Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per le attività di Protezione Civile di competenza regionale: previsione, prevenzione, pianificazione e gestione delle emergenze relative al rischio da frana. *Rapporto finale POA 2020*. Firenze.
- Casagli et al. (2021) Sviluppo della conoscenza e supporto tecnico-scientifico per la valutazione degli scenari di pericolosità idrogeologica e vulcanica. Accordo fra il Dipartimento della Protezione Civile e il Centro per la Protezione Civile dell'Università degli Studi di Firenze. *Rapporto finale*, Firenze.
- Comiti F., Lucía A., Rickenmann D. (2016), Large wood recruitment and transport during large floods: A review. *Geomorphology*, 269, 23-39.
- Conedera M., Fonti P., Nicoloso A., Meloni F., Pividori M. (2009). Ribaltamento delle ceppaie di castagno. Individuazione delle zone a rischio e proposte selvicolturali, *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* ,15, 15-18.
- Ebone A., Brenta P., Canavesio A., Terzuolo P.G., Pignochino M. (2014). *I boschi ripari. Diverse funzioni da gestire*, Regione Piemonte, Settore foreste, Torino.
- Ferretti F., Sboarina C., Tattoni C., Vitti A., Zatelli P., Geri F., Pompei E., Ciolli M. (2018). The 1936 Italian Kingdom Forest Map reviewed: a dataset for landscape and ecological research. *Annals of Silvicultural Research*, Vol 42, No 1 (2018) DO - 10.12899/asr-1411.
- Gasperi G., Bettelli G., Panini F., Pizziolo M. (2005) Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 2019, Sassuolo.
- Iovino, F., Borghetti, M., Veltri, A. (2009). Foreste e ciclo dell'acqua, *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 6, 256-273.
- ISPRA (2007). *Rapporto sulle frane in Italia – Capitolo 13. Analisi del dissesto da frana in Emilia-Romagna* G. Gozza, M. Pizziolo APAT Rapporti 78/2007 ISBN: 978-88-448-0310-0.
- Munafò M. (Ed.) (2023). *Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici*, Edizione 2023. Report SNPA 37/23 Roma.
- Padulano R., Reder A., Rianna, G. (2019). An ensemble approach for the analysis of extreme rainfall under climate change in Naples (Italy), *Hydrological Processes*, 33.14, 2020-2036, <https://doi.org/10.1002/hyp.13449>.
- Persichillo M.G., Bordoni M., Meisina C. (2017). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science of The Total Environment*, 574, 924-937.

- Santi T. (2022). *Espansione del bosco in relazione a fattori stagionali nella Regione Emilia-Romagna dal 1853 al 2017*. In, Corso di Laurea Magistrale in Progettazione e Gestione degli Ecosistemi Agro-Territoriali, Forestali e del Paesaggio. Università di Bologna, Bologna.
- Santoro A., Venturi M., Piras F., Fiore B., Corrieri F., Agnoletti M. (2021). Forest Area Changes in Cinque Terre National Park in the Last 80 Years. Consequences on Landslides and Forest Fire Risks. In, Land.
- Segoni S. Piciullo L, Gariano SL (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501.
- Segoni S., Rossi G., Rosi A., Catani F. (2014) Landslides triggered by rainfall: A semi-automated procedure to define consistent intensity–duration thresholds, *Computers & Geosciences*, 63, 123-131.
- Raffa M., Adinolfi M., Reder A. et al (2023). Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. *Sci Data* 10, 238, <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02144-9>
- Scoccimarro E., Gualdi S., Bellucci A., Sanna P.G., Fogli E., Manzini M., Vichi P., Oddo, Navarra A. (2011). Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High Resolution Coupled General Circulation Model, *Journal of Climate*, 24, 4368-4384.
- Trigila A., Iadanza C., Bussetini M., Lastoria B. (Eds.) (2018). *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. Edizione 2018*, ISPRA, Rapporti 287/2018 Roma
- Vezzoli R., Del Longo M., Mercogliano P., Montesarchio M., Pecora S., Tonelli F., Zollo A. L. (2014). Hydrological simulations driven by RCM climate scenarios at basin scale in the Po River, Italy. *Evolving Water Resources Systems: Understanding, Predicting and Managing Water-Society Interactions*. Proceedings of ICWRS2014, Bologna (IT), June 2014 (IAHS Publ. 364).
- Vezzoli R., Mercogliano P., Pecora S., Zollo A. L., Cacciamani C. (2015). Hydrological simulation of the Po River (North Italy) discharge under climate change scenarios using the RCM COSMO-CLM. *Science of the Total Environment* 521-522, 346-358.
- Vogt J., Fonti P., Conedera M., Schroder B. (2006). Temporal and spatial dynamic of stool uprooting in abandoned chestnut coppice forests. *Forest Ecology and Management*, 235.
- Zhang M., Liu N., Harper R., Li Q., Liu K., Wei X., Ning D., Hou Y., Liu S. (2017). A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime, *Journal of Hydrology*, 546, 44-59.
- Zollo A. L., Rillo V., Bucchignani E., Montesarchio M., Mercogliano P. (2015). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios, *International Journal of Climatology*, 2015. DOI: [10.1002/joc.4401](https://doi.org/10.1002/joc.4401)