

Analisi del trend climatico ed impatto  
sulle misure del PGRA del Distretto  
Idrografico della Sicilia – 2° Ciclo

RELAZIONE METODOLOGICA

PROF. ING. GABRIELE FRENI

Hanno partecipato alla stesura del presente studio:

- *Dr. Ing. Mariacrocetta Sambito nella messa a punto della metodologia per la stima del rischio di piena lampo e nella sua applicazione ai bacini del PGRA.*
- *Dr. Ing. Stefania Piazza nella preparazione del database di dati pluviometrici e nella sistematizzazione delle informazioni geomorfologiche dei bacini.*

## Indice

<b>1</b>	<b>Premessa .....</b>	<b>3</b>
1.1	Incarico.....	3
1.2	<b>Articolazione dello studio.....</b>	<b>3</b>
1.2.1	FASE 1 - Studio dei cambiamenti climatici.....	5
1.2.2	FASE 2-Aggiornamento dei punteggi tecnici Tw delle misure non strutturali in relazione agli aggiornati scenari di cambiamento climatico e delle relative priorità (All. B, PGRA 1 ciclo)	6
1.3	<b>Struttura della relazione .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Metodologie adottate .....</b>	<b>8</b>
2.1	<b>Analisi bibliografica .....</b>	<b>8</b>
2.2	<b>La valutazione dell'impatto del cambiamento climatico con approccio locale</b>	<b>19</b>
2.3	<b>La valutazione del rischio di piene lampo attraverso l'approccio Arno</b>	<b>29</b>
2.4	<b>Introduzione di parametri aggiunti per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico e del consumo di suolo sul rischio di piene lampo .....</b>	<b>32</b>
2.5	<b>Gli allegati alla relazione.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>Modifiche alle misure di piano .....</b>	<b>37</b>
3.1	<b>Aggiornamento della valutazione dei punteggi tecnici alle misure inserite nel piano in relazione alla valutazione del cambiamento climatico .....</b>	<b>37</b>
3.1.1	Sintesi del metodo per l'attribuzione delle priorità alle misure del piano.....	37
3.2	<b>Proposta di nuove misure per la mitigazione delle piene lampo e dell'impatto del cambiamento climatico.....</b>	<b>41</b>
3.2.1	Introduzione del cambiamento climatico nelle valutazioni per la riclassificazione delle aree a pericolosità idraulica .....	41
3.2.2	Sistemi di allertamento e segnalazione.....	43
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>45</b>

## 1 Premessa

### 1.1 Incarico

Con Decreto del Segretario Generale n° 268/2020, il Dipartimento Regionale dell'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico della Sicilia ha avviato la procedura di affidamento diretto ai sensi dell'art. 36, comma 2, lett. a) del D.Lgs. 50/2016 e ss.mm.ii., del Servizio di ricerca e sviluppo riguardante la Consulenza alle attività di valutazione degli effetti del cambiamento climatico nei bacini siciliani, finalizzate al primo aggiornamento del Piano di gestione del rischio alluvioni (PGRA) Il ciclo di pianificazione (2015-2021), mediante piattaforma digitale.

A seguito dell'espletamento della procedura telematica e nelle more delle verifiche richieste per la contrattualizzazione, d'ordine del R.U.P. in data 26 novembre 2020, è stato dato l'avvio all'esecuzione del servizio in via d'urgenza ai sensi del art. 19 comma 3 D.M.7/3/2019 n. 49, art. 8 comma 1 lett. a) D.L. 16/7/2020 n. 76.

I termini temporali fissati per lo studio sono pari a 30 (trenta) giorni naturali e consecutivi e, per via delle festività natalizie, la consegna è fissata per il giorno 28 dicembre 2020.

Nel seguito sarà descritta l'articolazione dello studio e la struttura della presente relazione al fine di fornire al Dipartimento ogni elemento utile all'integrazione dello studio nella revisione del PGRA vigente per il secondo ciclo di pianificazione (2015-2021).

### 1.2 Articolazione dello studio

La Direttiva Comunitaria 2007/60/CE del 23 ottobre 2007 (cosiddetta Direttiva Alluvioni) ha istituito un quadro di riferimento omogeneo a scala europea per la gestione dei fenomeni alluvionali e persegue l'obiettivo di ridurre i rischi di conseguenze negative derivanti dalle alluvioni soprattutto per la vita e la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale, l'attività economica e le infrastrutture.

La Direttiva Alluvioni è stata recepita in Italia dal D.Lgs. del 23 febbraio 2010, n. 49, che ha introdotto il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni (PGRA), da predisporre per ciascuno dei distretti idrografici individuati nell'art. 64 del D.Lgs. 152/2006 e ss.mm.ii.

La Direttiva Alluvioni ha disposto, al fine della riduzione del rischio, l'individuazione delle misure idonee sulla base di un'attività di pianificazione preliminare suddivisa in tre fasi successive e tra loro concatenate, così articolate:

- fase 1: valutazione preliminare del rischio di alluvioni;
- fase 2: elaborazione di mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni;
- fase 3: predisposizione e attuazione del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni.

La normativa prevede che gli elementi di cui al PGRA (fasi 1, 2 e 3) siano soggetti ad un esame periodico da effettuarsi ogni 6 anni, come previsto dall'art. 12 del D.Lgs. 49/2010, e, se del caso, aggiornati anche tenendo conto degli effetti dei cambiamenti climatici sul verificarsi delle alluvioni.



Il PGRA del Distretto Idrografico della Sicilia relativo al I ciclo di pianificazione (2011-2015) è stato approvato con Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri (DPCM) n. 49 del 7 marzo 2019.

Le attività pertinenti alle fasi 1 e 2, relativamente al II ciclo di pianificazione, sono state concluse rispettivamente nell'aprile 2019 e nel luglio 2020. Gli elaborati del PGRA relativi alle citate fasi sono pubblicati nelle pagine web del sito dell'Autorità di Bacino dedicate alla Valutazione preliminare del rischio e alla Partecipazione Pubblica

Le attività inerenti alla fase 3 (predisposizione e attuazione del piano di gestione del rischio alluvioni, fissate dalla normativa e ribadite dal MATTM – Ex Direzione Generale per la Salvaguardia del territorio e delle Acque – con nota prot. n. 24799 del 03/12/2019) prevedono l'elaborazione e l'adozione da parte della Conferenza Istituzionale Permanente (CIP) del Progetto di primo aggiornamento del PGRA, per il quale è necessario tenere conto degli effetti dei cambiamenti climatici, e l'elaborazione e trasmissione al MATTM del Rapporto Preliminare, previsto nell'ambito della procedura di assoggettabilità a VAS (art. 12, comma 4, D.Lgs. 152/2006), relativo ai soli aggiornamenti apportati al PGRA approvato. Nel caso in cui l'aggiornamento del PGRA dovesse essere assoggettato a VAS, sarà necessario elaborare e trasmettere al MATTM, oltre al Progetto di aggiornamento del PGRA, il Rapporto Ambientale e la Sintesi non tecnica ai sensi dell'art. 13 del D.Lgs. 152/2006.

Relativamente all'aggiornamento del PGRA, sono in corso di elaborazione, da parte dell'Autorità di Bacino, il Progetto di PGRA e il Rapporto Preliminare per la verifica di assoggettabilità a VAS. Il servizio di supporto oggetto dell'affidamento in argomento riguarda le attività connesse alla redazione di detto Rapporto Preliminare.

Il presente studio si pone l'obiettivo di costituire la fase di esame ed eventuale aggiornamento del PGRA per quanto attiene agli aspetti previsti dalla normativa in relazione all'impatto del cambiamento climatico.

L'attività si divide in due fasi, ciascuna delle quali produce un elaborato finale che, dopo l'approvazione della Committenza, farà parte dell'aggiornamento del Piano.

Le attività di cui al paragrafo 1 saranno validate sui bacini del Distretto Idrografico della Regione Sicilia scelti in ragione della loro rilevanza ai fini della Gestione del Rischio Alluvioni. In particolare, dei 107 bacini ed aree omogenee definite dal Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia, saranno oggetto di studio i seguenti bacini idrografici (per un totale di 37):

- 004 Bacino della Fiumara Niceto
- 009 Bacino del Torrente Termini
- 018 Bacino del Torrente Inganno
- 019 Bacino del Torrente Furiano
- 024 Bacino del Torrente Tusa
- 026 Bacino del Fiume Pollina
- 028 Bacino del Torrente Piletto
- 029 Bacino del Torrente Roccella
- 030 Bacino del Fiume Imera Settentrionale
- 031 Bacino del Fiume Torto
- 033 Bacino del Fiume San Leonardo
- 035 Bacino del Fiume Milicia
- 037 Bacino del Fiume Eleuterio

- 039 Bacino del Fiume Oreto
- 042 Bacino del Fiume Nocella
- 043 Bacino del Fiume Jato
- 044 Area Territoriale tra il Bacino del F. Jato ed il Bacino del F. San Bartolomeo (bacino del Torrente Canalotto)
- 045 Bacino del Fiume San Bartolomeo
- 046 Area Territoriale tra il Bacino del F. San Bartolomeo e la Punta di Solanto (bacino del Torrente Guidaloca)
- 051 Bacino del Fiume Birgi
- 054 Bacino del Fiume Arena
- 057 Bacino del Fiume Belice
- 059 Bacino del Fiume Carboj
- 061 Bacino del Fiume Verdura
- 062 Bacino del Fiume Magazzolo
- 063 Bacino del Fiume Platani
- 067 Bacino del Fiume San Leone
- 068 Bacino del Fiume Naro
- 072 Bacino del Fiume Imera Meridionale
- 074 Bacino del Torrente Rizzuto
- 075 Bacino del Torrente Comunelli
- 076a Area Territoriale tra il Bacino del F. Gela e il Bacino del T.te Comunelli (bacino del torrente Roccazzelle)
- 076b Area Territoriale tra il Bacino del F. Gela e il Bacino del T.te Comunelli (bacino del torrente Gattano)
- 077 Bacino del Fiume Gela
- 087 Bacino del Fiume Asinaro
- 091 Bacino del Fiume Anapo
- 093 Bacino del Fiume San Leonardo Irminio
- 094 Bacino del Fiume Simeto
- 101 Bacino del Torrente Fiumedinisi

### **1.2.1 FASE 1 - Studio dei cambiamenti climatici**

L'attività consiste nell'analisi preliminare del probabile impatto dei cambiamenti climatici sul verificarsi di alluvioni, in accordo con l'art 14.4 della Direttiva 2007/60. Essa sarà condotta in una prima fase attraverso l'applicazione della metodologia già applicata dall'Autorità di Distretto dell'Appennino Settentrionale, che si basa sulla valutazione della propensione al rischio di flash-floods dei sottobacini, estendendone l'applicazione, già condotta nell'ambito della valutazione preliminare del rischio di alluvioni e definizione delle aree a potenziale rischio significativo con riferimento al solo bacino dell'Imera Meridionale, a tutti i bacini siciliani (Analisi climatico – geomorfologica).

Il metodo sarà aggiornato in relazione alle soglie previste dall'applicazione originale e per renderlo applicabile alle peculiarità dei bacini siciliani. Inoltre il metodo sarà esteso per integrare alcuni parametri significativi, come, ad esempio, il consumo di suolo, che sono considerati rilevanti ai fini dell'aggiornamento del rischio di formazione di piene lampo.

Il metodo inoltre non tiene conto degli aspetti di cambiamento climatico che possono interessare le piene in bacini di dimensioni più ampie e che non hanno diretta correlazione con le tendenze climatiche sulle piogge di brevissima durata.

A tal fine, sarà inoltre condotta una analisi delle possibili tendenze dei dati pluviometrici di massima intensità e fissata durata al fine di definire la possibile vulnerabilità dei bacini ai cambiamenti climatici. L'analisi sarà effettuata a scala di singolo pluviometro (nell'ambito della banca dati dell'Osservatorio Regionale delle Acque) e i risultati saranno aggregati a scala di bacino.

### **1.2.2 FASE 2-Aggiornamento dei punteggi tecnici Tw delle misure non strutturali in relazione agli aggiornati scenari di cambiamento climatico e delle relative priorità (All. B, PGRA 1 ciclo)**

L'attività consiste nell'aggiornamento dei punteggi tecnici Tw assegnati alle misure non strutturali in relazione agli scenari di vulnerabilità ai cambiamenti climatici individuati nella fase precedente. Tali variazioni consentiranno l'aggiornamento delle priorità identificate dal piano rispetto a quanto previsto nel PGRA 1° ciclo (vd. All. B, PGRA 1° ciclo). In particolare, saranno aggiornate le misure non strutturali inizialmente previste nel 1° ciclo per ciascuno dei 35 sottobacini individuati in detto allegato, e definiti i relativi livelli di priorità secondo le indicazioni del documento comunitario "Guidance for Reporting under the Floods Directive (2007/60/EC)" utilizzando la metodologia sviluppata dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) riportata nel documento "NOTE sulla compilazione del Database Access conforme a gli SCHEMA per il reporting della Dir. 2007/60/CE art. 7: Piani di Gestione del Rischio Alluvioni".

### **1.3 Struttura della relazione**

La presente relazione si pone l'obiettivo di fornire l'inquadramento bibliografico, gli elementi metodologici dello studio ed i risultati generali a scala regionale delle valutazioni effettuate nell'ambito della Fase 1 in relazione al cambiamento climatico ed ai parametri aggiuntivi introdotti nella metodologia "Arno" per la stima della suscettibilità dei bacini alle piene lampo.

In particolare, la relazione si concentrerà sulla valutazione dei trend climatici sulle piogge intense registrate dalla rete pluviometrica gestita inizialmente dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale e, successivamente, transitata all'Osservatorio Regionale delle Acque e quindi all'Autorità di Bacino. Tale informazione costituisce un elemento statisticamente rilevante ma registrato puntualmente nelle porzioni di territorio dove sono localizzati gli strumenti. Successivamente tali valutazioni sono state estrapolate a tutto il territorio regionale attraverso interpolazione geografica stimando sia gli indicatori climatici previsti dal metodo "Arno" sia, in generale, i trend climatici sulle piogge di massima intensità di tutte le durate disponibili.

In relazione alla Fase 2, la relazione proporrà l'aggiornamento del metodo per la valutazione dei punteggi assegnati alle singole misure e le integrerà con ulteriori possibili interventi che abbiano diretto impatto sul rischio di piene improvvise e sull'impatto del cambiamento climatico.

In allegato alla relazione, è stata predisposta una monografia per ogni bacino o area territoriale oggetto di incarico al fine di specificare nel dettaglio e per tutti i sottobacini di area superiore ai 2 km<sup>2</sup>:

- L'applicazione del metodo di valutazione della suscettibilità del bacino alle piene lampo
- La stima dell'impatto del cambiamento climatico sulle piene fluviali in generale
- L'eventuale proposta di nuove misure per la mitigazione dei due aspetti sopra discussi

In ciascuna delle monografie, l'analisi è stata riproposta a scala di bacino in modo da offrire un adeguato livello di dettaglio necessario per l'identificazione delle misure di mitigazione.

## 2 Metodologie adottate

### 2.1 Analisi bibliografica

Negli ultimi anni gli effetti del cambiamento climatico sulle precipitazioni estreme hanno suscitato un notevole interesse tra i ricercatori, in quanto si è osservato che, a seguito di variazioni della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, si verificano importanti conseguenze in ambito sociale, economico e ambientale. In letteratura numerosi studi sono stati condotti per valutare i trends climatici delle precipitazioni estreme per differenti aree geografiche, che vanno dagli Stati Uniti (Karl, Knight, & Baker, 2000), (Alexander, et al., 2006), (Kunkel, et al., 2013)), al Giappone (Iwashima & Yamamoto, 1993), (Fujibe, Yamazaki, Katsuyama, & Kobayashi, 2005)), alla Cina (Wang & Zhou, 2005), all'Europa (Zolina, Simmer, Belyaev, Kapala, & Gulev, 2009), (Gallant, Karoly, & Gleason, 2014), (Blöschl, et al., 2019)) e all'Italia (Brunetti, Maugeri, & Nanni, 2000), (Frei & Schär, 2001)), in cui sono stati osservati significativi trends positivi di piogge estreme intense.

È stato riscontrato che le variazioni della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi possono avere un'importante rilevanza ingegneristica, in quanto sono informazioni critiche comunemente richieste per una varietà di problemi di progettazione nel drenaggio urbano e nella mitigazione delle inondazioni. Nelle applicazioni pratiche, le caratteristiche del clima locale sono prese in considerazione attraverso la definizione delle curve profondità-durata-frequenza (DDF).

Per adattare efficacemente la procedura di progettazione a un clima in continuo cambiamento, sono necessarie migliori previsioni degli eventi estremi (Dessai, Hulme, Lempert, & Pielke, 2009). Ciò significa che per la progettazione dei sistemi di drenaggio urbano e dei sistemi di mitigazione delle inondazioni, le attuali curve profondità-durata-frequenza (DDF) non saranno più valide, a causa del cambiamento climatico e richiedono un adeguamento (Arnbjerg-Nielsen, 2006). La letteratura internazionale fornisce alcuni studi in cui sono state sviluppate e proposte procedure per integrare gli effetti dei cambiamenti climatici sulla valutazione delle piogge di progetto (ad esempio, Burlando & Rosso, Extreme storm rainfall and climatic change, 1991), (Mailhot & Duchesne, 2009)).

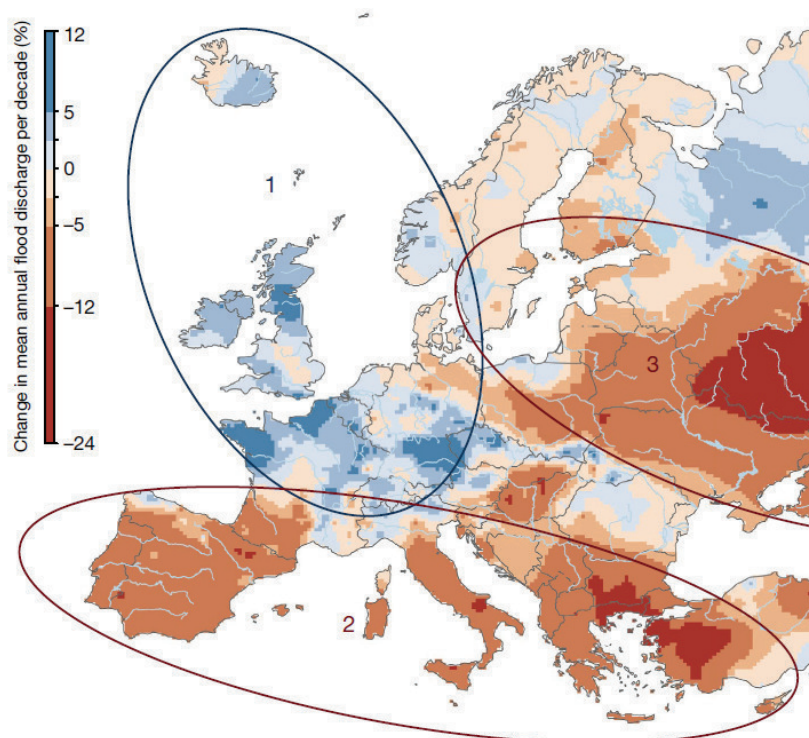
Tra gli studi eseguiti sul territorio europeo, Blöschl et al., (2019) hanno analizzato il set di dati più completo delle osservazioni di inondazioni in tutta Europa e hanno dimostrato che il cambiamento climatico ha contribuito all'aumento dei deflussi dovuti alle inondazioni fluviali in alcune regioni d'Europa, con una conseguente diminuzione delle stesse in altre. Per le loro analisi, gli autori hanno utilizzato le osservazioni di portata fluviale, ricavati da 3.738 stazioni di misura per un periodo compreso tra 1960-2010. L'analisi è stata quindi condotta considerando i massimi annuali, grazie ai quali sono stati stimati i trend, attraverso l'utilizzo dello stimatore della pendenza Theil-Sen, è stata testata la significatività statistica con il test di Mann-Kendall e sono stati stimati i trends regionali, mediante l'interpolazione spaziale. Inoltre, gli autori hanno determinato l'evoluzione a lungo termine delle inondazioni, utilizzando un filtro della media mobile di dieci anni, e allo stesso modo hanno analizzato come cambiano le precipitazioni massime annuali di sette giorni, l'umidità del suolo mensile e la temperatura media dell'aria primaverile, i quali sono fattori strettamente collegati alle inondazioni. La coerenza tra i cambiamenti in questi driver e i cambiamenti nelle inondazioni sono state esaminate confrontando i loro

modelli di cambiamento e utilizzando i coefficienti di correlazione dei ranghi di Spearman (Blöschl, et al., 2019).

La Figura 2.1 mostra i risultati del modello regionale dei trend delle alluvioni in tutta Europa, che oscillano tra un + 11.4% a un -23.1% per decennio. I modelli spaziali dei trend sono raggruppati in tre regioni principali. Nell'Europa nord-occidentale (Figura 2.1, regione 1), circa il 69% delle stazioni mostra un trend di piena in aumento, con un aumento locale medio del +2.3% per decennio. È stato riscontrato che gli aumenti delle precipitazioni estreme sono correlati agli spostamenti verso i poli del getto subpolare e delle tracce delle piogge associate, osservate dagli anni '70. Inoltre, è stato notato che le inondazioni nell'hotspot settentrionale del Regno Unito sono strettamente correlate all'aumento delle precipitazioni, che determinano un trend medio di deflussi delle inondazioni del + 6,6%. Nell'Europa meridionale (Figura 2.1, regione 2), lo spostamento verso nord del getto subtropicale e delle tracce delle tempeste associate ha portato a una diminuzione delle precipitazioni, che, insieme all'aumento dell'evapotraspirazione ha ridotto l'umidità del suolo in modo sostanziale, di circa il 5% per decennio. Il loro effetto combinato ha portato alla diminuzione dei deflussi alluvionali nei bacini idrografici analizzati, con un trend medio regionale del -5% per decennio.

Nell'Europa orientale (Figura 2.1, regione 3), circa il 78% delle stazioni mostra un trend in diminuzione con una diminuzione media del -6% per decennio. Nei territori della Scandinavia settentrionale e della Russia nord-occidentale, i trends sono meno pronunciati. I risultati hanno mostrato che in questa regione la temperatura dell'aria primaverile è aumentata fino a 1 ° C per decennio. Ciò ha comportato una copertura nevosa primaverile molto meno estesa, con una conseguente modifica delle precipitazioni (da nevicate a piogge) quando la temperatura dell'aria è intorno allo zero, manti nevosi meno profondi, scioglimento della neve più precoce, probabile aumento dell'infiltrazione derivante da profondità di congelamento inferiori e quindi inondazioni più piccole. Il trend medio delle inondazioni nell'hotspot della Russia occidentale è di -18.2%. Data la temperatura di fondo più fredda e il manto nevoso più ampio nella Russia nord-occidentale, le temperature in aumento non stanno ancora modificando i modelli di scioglimento della neve e quindi non diminuiscono le alluvioni.





**Figura 2.1 Trends regionali osservati dei deflussi di inondazioni fluviali in Europa (1960-2010). Il blu indica un aumento dei deflussi alluvionali e il rosso indica una diminuzione dei deflussi alluvionali (variazione percentuale della portata media annua delle piene per decennio). I numeri 1–3 indicano le regioni con driver distinti. 1, Europa nordoccidentale: aumento delle precipitazioni e dell'umidità del suolo. 2, Europa meridionale: diminuzione delle precipitazioni e aumento dell'evaporazione. 3, Europa orientale: diminuzione e precoce scioglimento della neve. Le tendenze si basano sui dati di n = 2.370 stazioni idrometriche.**

Tra gli studi eseguiti sul territorio italiano, Bonaccorso et al. (2005) hanno studiato la presenza di andamenti lineari e non lineari nelle serie di precipitazioni massime annuali di diversa durata in Sicilia. I risultati hanno indicato che, per periodi più brevi, i trends in aumento erano frequenti e i trends in diminuzione si verificavano frequentemente per periodi più lunghi. Il loro studio si è concentrato sull'impatto delle tendenze nella stima di un tempo di ritorno storico delle precipitazioni. Per quanto riguarda le metodologie, sono stati utilizzati diversi approcci per quantificare l'impatto dei cambiamenti climatici sulle serie di precipitazioni estreme, che includono modelli climatici regionali (RCMs) (Gregersen, et al., 2013), metodo peak over threshold (POT) (Roth, Buishand, Jongbloed, Klein Tank, & Van Zanten, 2012), (Gregersen, Madsen, Rosbjerg, & Arnbjerg-Nielsen, 2014)) e analisi statistica (Willems, 2013).

Brugioni et al., (2010) hanno proposto un approccio simile a quello utilizzato per la mappatura della pericolosità e dei rischi per gli eventi di inondazione improvvisa, con una strategia di indagine basata sui modelli disponibili di Profondità-Durata-Frequenza e un'analisi della distribuzione spaziale dei parametri del modello o dei valori di frequenza assegnati per precipitazioni di breve durata. Questo metodo è stato applicato al bacino idrografico del fiume Arno, da qui la denominazione di metodo Arno, che sarà approfondito nel paragrafo successivo (Brugioni, Mazzanti, & Franceschini, How meaningful is flash flood risk mapping?, 2010). Anche se il metodo prevede delle semplificazioni, dovute all'uso delle curve DDF, della soglia fissa di precipitazione e di un unico parametro per la caratterizzazione del bacino, i risultati

mostrano alcune caratteristiche interessanti, al fine di identificare una differenziazione spaziale della predisposizione alle inondazioni improvvise.

Un ulteriore studio riguarda quello di Liuzzo e Freni (2015) in cui sono stati valutati i trends statisticamente significativi delle precipitazioni estreme per i tempi di ritorno tipicamente utilizzati nella progettazione al fine di ottenere informazioni utili per la definizione delle curve di profondità-durata-frequenza (DDF) negli scenari futuri di cambiamento climatico (Liuzzo & Freni, 2015). Nel suddetto studio, sono state analizzate le serie storiche delle precipitazioni estreme di durata 1, 3, 6, 12 e 24 h per il periodo compreso tra 1950-2008 (mostrate in Figura 2.2), registrate da 65 pluviometri distribuiti in Sicilia, al fine di rilevare i trend statisticamente significativi mediante il test non parametrico di Mann-Kendall, che permette di valutare la presenza di trends monotoni nei dati delle serie temporali. Sono state effettuate analisi statistiche per ciascuna durata per stimare i quantili per diversi tempi di ritorno. Inoltre, la distribuzione dei valori estremi generalizzati (GEV) (Jenkinson 1955) è stata impiegata per calcolare le precipitazioni estreme con tempi di ritorno pari a 5, 10 e 20 anni (Figura 2.3).

Attraverso gli L-momenti (Hosking e Wallis 1997), gli autori hanno stimato i parametri di distribuzione del GEV e, in seguito alla valutazione dei quantili per un dato tempo di ritorno, sono state determinate le curve DDF adattando un'equazione parametrica specificata per ciascun periodo di ritorno ai quantili stimati, utilizzando tecniche di regressione. I parametri della curva DDF sono stati stimati per le condizioni climatiche attuali e per due scenari di cambiamento climatico, che rappresentano le proiezioni climatiche per gli anni 2050 e 2100. Gli scenari climatici sono stati definiti a partire dai risultati dell'analisi di tendenza, che hanno fornito una quantificazione dei cambiamenti futuri delle precipitazioni estreme. La procedura, basata su metodologie collaudate e di uso frequente, può essere facilmente applicata ad altri casi di studio, al fine di quantificare gli effetti del cambiamento climatico sulle precipitazioni estreme e di tenerne conto nelle curve DDF.



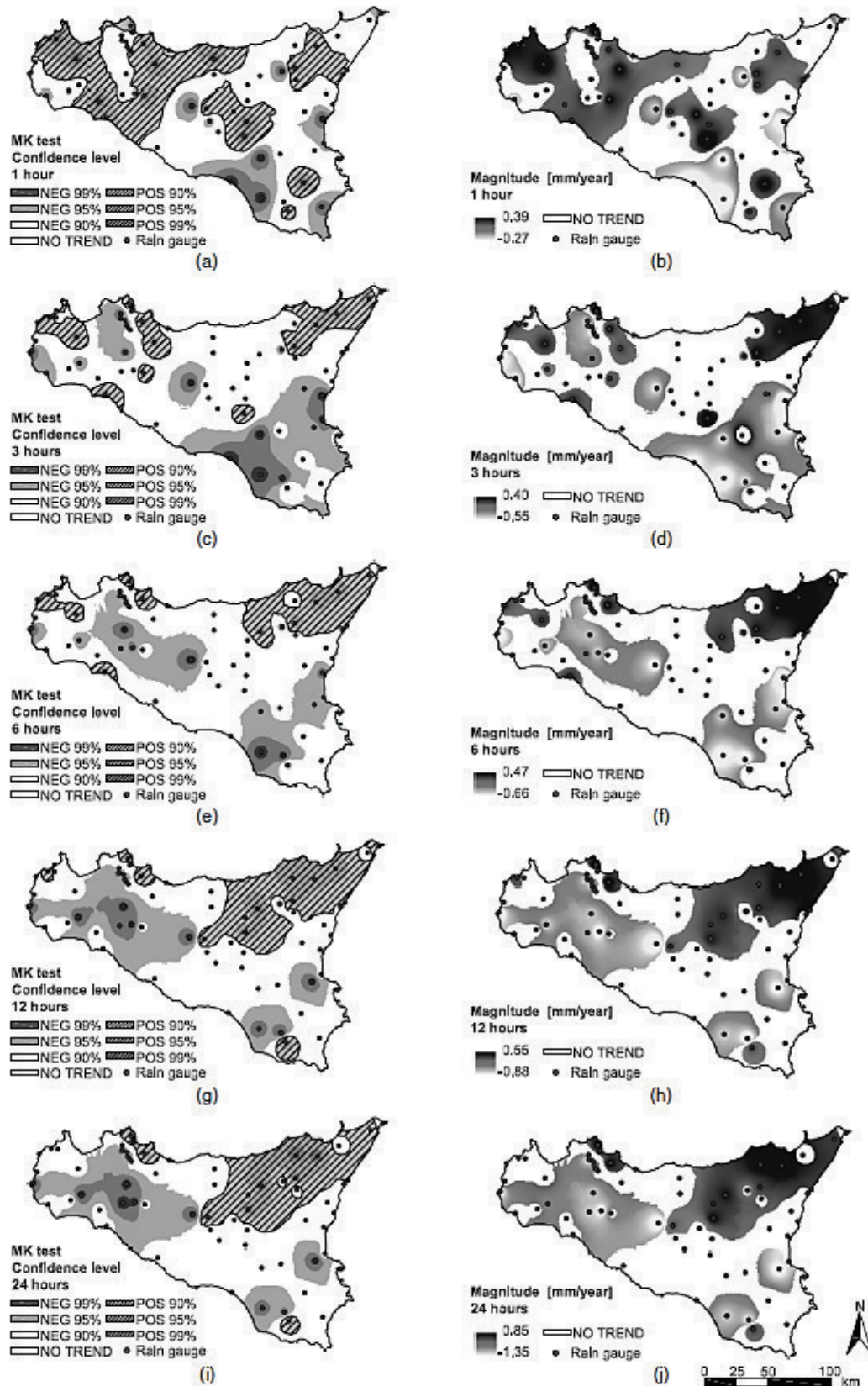


Figura 2.2 Distribuzione spaziale dei trends statisticamente significativi e la loro entità (al livello di confidenza del 90%) per (a e b) 1; (c e d) 3; (e ed f) 6; (g e h) 12; (i e j) 24 ore di durata.

La Figura 2.2 mostra i trends interpolati e l'entità dei trends significativi per ciascuna durata (1, 3, 6, 12, 24 ore). Dallo studio di Liuzzo e Freni (2015) si osserva che, per un livello di significatività del 90%, le aree in cui non sono stati rilevati dei trends sono state nascoste, mentre sono stati identificati gli andamenti positivi e negativi, rispettivamente nelle aree occidentali e sud-orientali (Figura 2.2a e Figura 2.2b), per quanto riguarda la durata  $d=1$  ora, con un incremento positivo di circa  $+0.39$  mm/anno nelle aree occidentali. Per  $d=3$  ore si riscontrano trends negativi nella parte meridionale dell'isola e trends positivi nell'area nord-est, con magnitudo massima pari a  $+0.4$  mm/anno (Figura 2.2c e Figura 2.2d). Per quanto riguarda la durata  $d=6$  sono state identificate due aree distinte: una nel settore centro-meridionale, con trends negativo, e una nell'area nord-est in cui si osserva una concentrazione di trend positivi (Figura 2.2e e Figura 2.2f). I modelli spaziali per  $d=12$  e  $24$  h sono simili, come evidenziato in Figura 2.2g, Figura 2.2h, Figura 2.2i e Figura 2.2j, e sono caratterizzati da un'area in cui il trend delle piogge estreme è in aumento nel nord-est dell'isola, mentre nella parte nord-ovest si osserva una prevalenza di trends negativi.

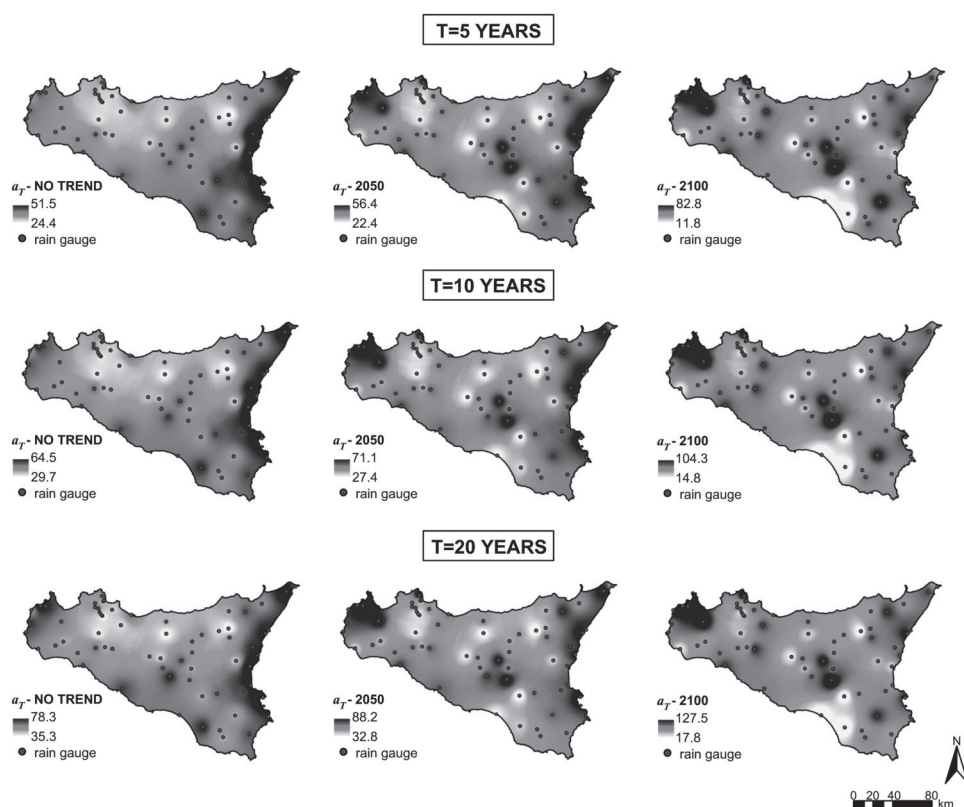


Figura 2.3 Distribuzione spaziale del parametro  $a_T$  negli scenari "Nessun trend", "2050" e "2100" per periodi di ritorno di 5, 10 e 20 anni.

La Figura 2.3 fornisce una distribuzione spaziale del parametro  $a_T$  delle curve DDF per tutti i pluviometri nelle condizioni climatiche attuali e nei due scenari di cambiamento climatico al 2050 e al 2100, studiate mediante la tecnica IDW per i tempi di ritorno di 5, 10 e 20 anni. Si osserva che, per il tempo di ritorno  $T=5$  anni, si ha una diminuzione del parametro  $a_T$  nel sud-ovest nello scenario 2050, con riduzioni fino a  $-13.4\%$ ; tuttavia, in tale scenario, l'ampia area del nord, caratterizzata da valori inferiori del parametro, si riduce progressivamente con incrementi percentuali fino a  $+19.5\%$ . Nello scenario del 2100, le diminuzioni massime di  $a_T$  nell'area sud-ovest sono di circa  $-31.6\%$  e gli aumenti nella parte settentrionale dell'isola sono pari a

+45.8%. Per quanto riguarda il tempo di ritorno  $T=10$  anni, gli intervalli di variazione del parametro  $a_T$  vanno da  $-16.6$  a  $+24.5\%$  per lo scenario 2050 e da  $-39.4$  a  $+57.7\%$  per lo scenario 2100. Confrontando la mappa dello scenario "Nessun trend" con lo scenario 2050 per  $T=20$  anni, la diminuzione più bassa del parametro  $a_T$  è di circa  $-20.0\%$  e l'aumento più alto è  $+30.0\%$ . Le variazioni vanno da  $-47.3$  a  $+70.6\%$  nello scenario 2100.

Un ulteriore studio riferito al territorio siciliano è quello di Forestieri et al., (2018), in cui sono stati valutati i cambiamenti nelle curve di Altezza-Durata-Frequenza (DDF) in generale sul territorio siciliano e in particolare per le due aree urbane di Palermo e di Catania. Il dataset utilizzato si riferisce al periodo 1927-2003. Gli autori si sono concentrati su queste due aree urbane, in quanto presentano differenti caratteristiche meteorologiche (Palermo è influenzata dal mar Tirreno e da sistemi pluviali di bassa pressione da nord, mentre Catania è interessata da sistemi di bassa pressione da sud-ovest che interagiscono con l'orografia in prossimità della costa, generando precipitazioni più pesanti) e permettono di valutare il comportamento del modello climatico regionale (RCM) in differenti condizioni climatiche. Questo modello tende però a sovrastimare gli output, in termini di giorni di pioggia e di conseguenza anche di precipitazioni totali, creando un "effetto pioggerella". Al fine di ridurre tale effetto, gli autori hanno adottato una tecnica di regolazione del bias basata sulla trasformazione della mappatura quantile-quantile sviluppata da Boé et al. (2007) e Piani et al. (2010b), che permette di correggere la precipitazione simulata per il tempo di controllo e le proiezioni future e di ridimensionare le precipitazioni dalle scale temporali giornaliere a quelle orarie.

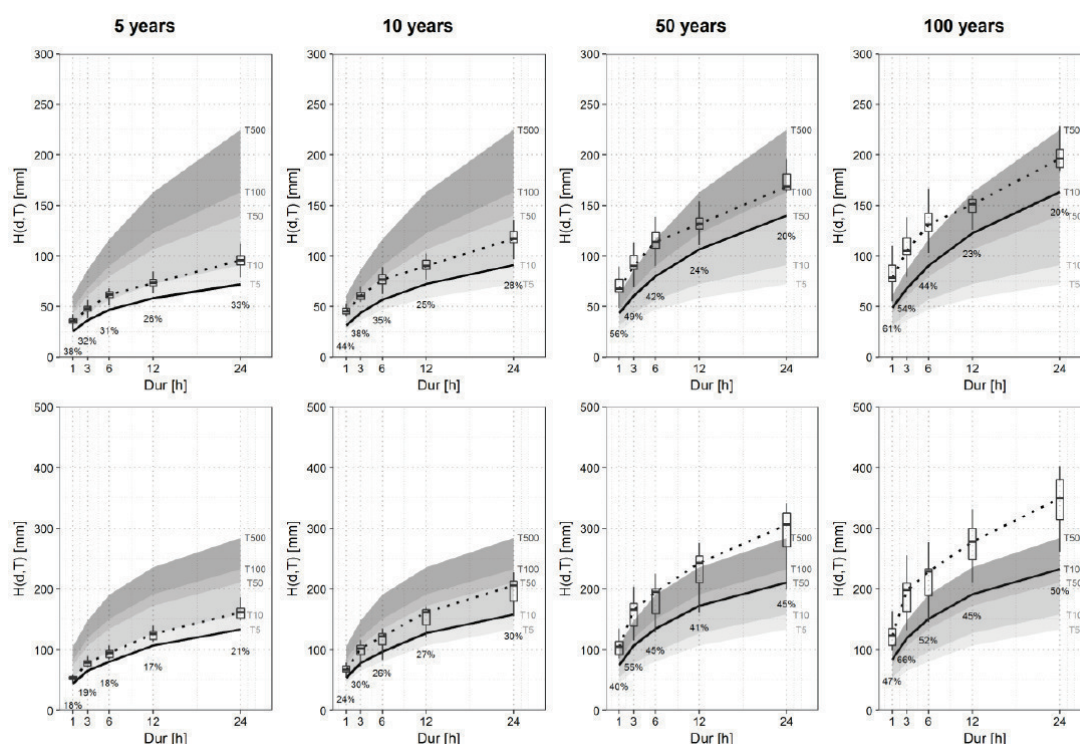
Gli autori hanno utilizzato i risultati del modello climatico regionale (RCM) ottenuti dalle simulazioni dell'insieme EURO-CORDEX con una risoluzione spaziale di circa 12 km, per il periodo corrente e per due orizzonti futuri nello scenario 8.5 dei percorsi di concentrazione rappresentativi (RCP). Gli eventi estremi su scala giornaliera sono stati studiati per la prima volta confrontando i quantili stimati dalle osservazioni dei pluviometri e dai risultati RCM. In secondo luogo, gli autori hanno implementato un approccio di downscaling temporale per stimare le precipitazioni per durate sub-giornaliere dalle precipitazioni giornaliere modellate e, infine, hanno analizzato le proiezioni future su scale giornaliere e sub-giornaliere. Una distribuzione di frequenza è stata adattata alle serie temporali dei massimi annuali per le durate sub-giornaliere per derivare le curve DDF per due orizzonti temporali futuri e le due aree urbane.

In Figura 2.4 e Figura 2.5 sono mostrate le curve DDF per tempi di ritorno di 5, 10, 50 e 100 anni derivate dai dati storici (linea nera continua e aree ombreggiate in grigio) e dagli output RCM ridotti (box plot), rispettivamente per l'orizzonte futuro 2005-2050 e 2050-2100, e per Palermo (a) e Catania (b). Si osserva che le curve DDF "storiche" nel caso di Catania sono leggermente superiori a quelle di Palermo, a conferma che questa parte dell'isola è solitamente caratterizzata da precipitazioni più intense. Per Palermo, lo scenario futuro porta a un netto aumento delle intensità sulla base delle mediane dell'insieme RCM, con un intervallo di incertezza relativamente ridotto rispetto all'insieme modello. In termini di periodo di rendimento, le curve DDF dello scenario futuro corrispondono approssimativamente alle curve attuali, ma a periodi di rendimento più elevati, ad esempio, la mediana della futura curva DDF a 5 anni corrisponde a quella attuale a 10 anni. Lo stesso comportamento può essere osservato per altri periodi di ritorno. La variabilità rappresentata dall'intervallo

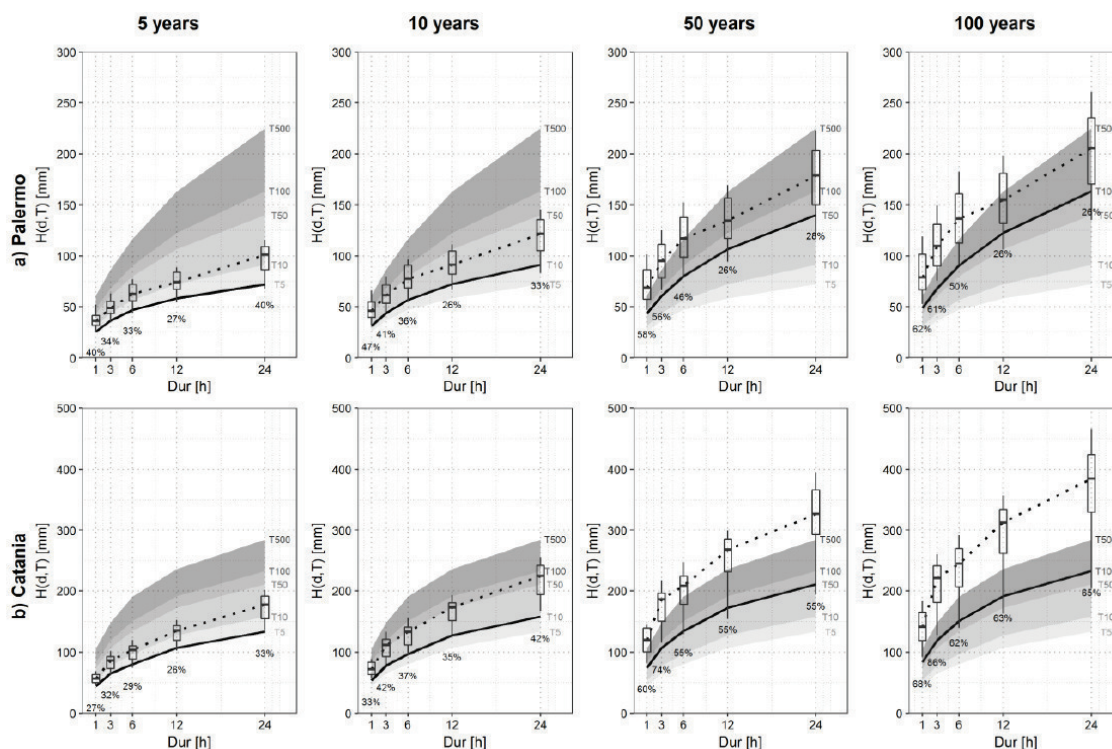


interquartile dei boxplot varia da pochi mm a 5 anni a circa 20 mm a 100 anni, denotando che, per questo caso, l'RCM produce risultati simili. Tuttavia, in alcuni casi, esiste una forte variabilità in termini di estremi bassi e alti, come per le durate molto brevi (cioè 1, 3, 6 ore) a 50 e 100 anni.

Nel caso di Catania (Figura 2.4b), le curve DDF derivate dagli RCM nello scenario del cambiamento climatico mostrano una maggiore variabilità che aumenta significativamente con la durata e ancora di più con il periodo di ritorno. Per tutti e quattro i tempi di ritorno, la variazione dei quantili futuri rispetto ai quantili storici non aumenta linearmente con la durata, con aumenti maggiori a durate maggiori. In alcuni casi, i quantili ottenuti con alcuni modelli RCM forniscono valori inferiori a quelli ottenuti con i dati storici, come per 3, 6 e 12 ore a 10 anni, 6, 12 e 24 ore a 50 anni e 6 ore a 100 anni. Gli autori associano questo fenomeno all'incertezza strutturale associata ai modelli climatici regionali, nonché all'incertezza derivante dalla procedura di downscaling temporale (Forestieri, et al., 2018).



**Figura 2.4** Curve DDF per i tempi di ritorno di 5, 10, 50 e 100 anni (rispettivamente dalla prima alla quarta colonna) derivate dai dati storici (linea nera continua) e dalle uscite RCM ridotte (box plot), per l'orizzonte futuro 2005-2050 e per Palermo (a) e Catania (b). In ogni pannello le linee tratteggiate rappresentano la mediana dell'insieme degli RCM, mentre le aree ombreggiate in grigio graduale delimitano gli intervalli dei tempi di ritorno (cioè, T5, T10, T50, T100, T500) corrispondenti alle curve DDF correnti. Infine, i numeri percentuali indicano gli aumenti relativi rispetto all'ensemble RCM per le diverse durate.



**Figura 2.5** Curve DDF per i tempi di ritorno di 5, 10, 50 e 100 anni (rispettivamente dalla prima alla quarta colonna) derivate dai dati storici (linea nera continua) e dalle uscite RCM ridotte (box plot), per l'orizzonte futuro 2050-2100 e per Palermo (a) e Catania (b). In ogni pannello le linee tratteggiate rappresentano la mediana dell'insieme degli RCM, mentre le aree ombreggiate in grigio graduale delimitano gli intervalli dei tempi di ritorno (cioè, T5, T10, T50, T100, T500) corrispondenti alle curve DDF correnti. Infine, i numeri percentuali indicano gli aumenti relativi rispetto all'ensemble RCM per le diverse durate.

Libertino et al., (2019) hanno studiato gli eventi estremi di breve durata (inferiori al giorno), valutando come le eterogeneità spaziali possono influenzare i risultati delle analisi delle tendenze su larga scala. Sono state valutate la presenza dei trends regionali in termini di entità e frequenza dei massimi annuali di precipitazione, attraverso il test di Mann-Kendall, applicato singolarmente alle singole stazioni e poi esteso a livello regionale con il Regional Kendall Test (RKT) (Helsel & Frans, Regional Kendall test for trend, 2006), che corregge i risultati MK specifici del sito per tenere conto della correlazione incrociata tra le serie, che si traduce in una statistica di test regionale, e un'analisi da record RB, che considera le correlazioni spaziali. Ciò è stato fatto considerando gli estremi delle precipitazioni di cinque diverse durate, che variano da 1 a 24 ore. Sia l'ampiezza delle intensità registrate che la frequenza degli eventi più grandi (cioè, record da record, RB) sono considerati per fornire un controllo completo per la loro possibile non stazionarietà sia su scala nazionale che su aree più limitate e geograficamente omogenee.

La procedura completa (RB + RKT) è stata inizialmente applicata considerando l'intera area d'Italia come una regione unica (ITA region) per rilevare la presenza di trend a livello di Paese. Quindi, per valutare il ruolo delle disomogeneità spaziali, cinque sotto-regioni pilota sono state considerate con maggiore dettaglio (Figura 2.6). Queste aree minori sono state individuate come rappresentative delle diverse caratteristiche morfologiche e climatologiche del Paese, a partire da criteri di omogeneità geografica. In dettaglio, con riferimento alla Figura 2.6, si possono

considerare rappresentativi dei pluviometri UP\_PO (60 pluviometri), DOL (55 pluviometri), LIG (61 pluviometri), CAL (69 pluviometri) e SAR (55 pluviometri) ambienti pianeggianti, alpini, costieri, peninsulari e insulari, rispettivamente. Le ultime tre regioni sono anche particolarmente interessanti, perché includono siti in cui sono stati registrati eventi nazionali di RB (cioè massimi assoluti a livello di paese) negli ultimi 60 anni.

I risultati hanno mostrato che non si verificano trends significativi su scala nazionale, ma emergono modelli di cambiamento distinti in domini più piccoli con caratteristiche geografiche omogenee.

I risultati dello studio sottolineano l'importanza di un approccio multi-scala all'analisi delle tendenze regionali e la necessità di spiegazioni più avanzate delle tendenze localizzate (Libertino, Ganora, & Claps, Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: The case of Italy, 2019).

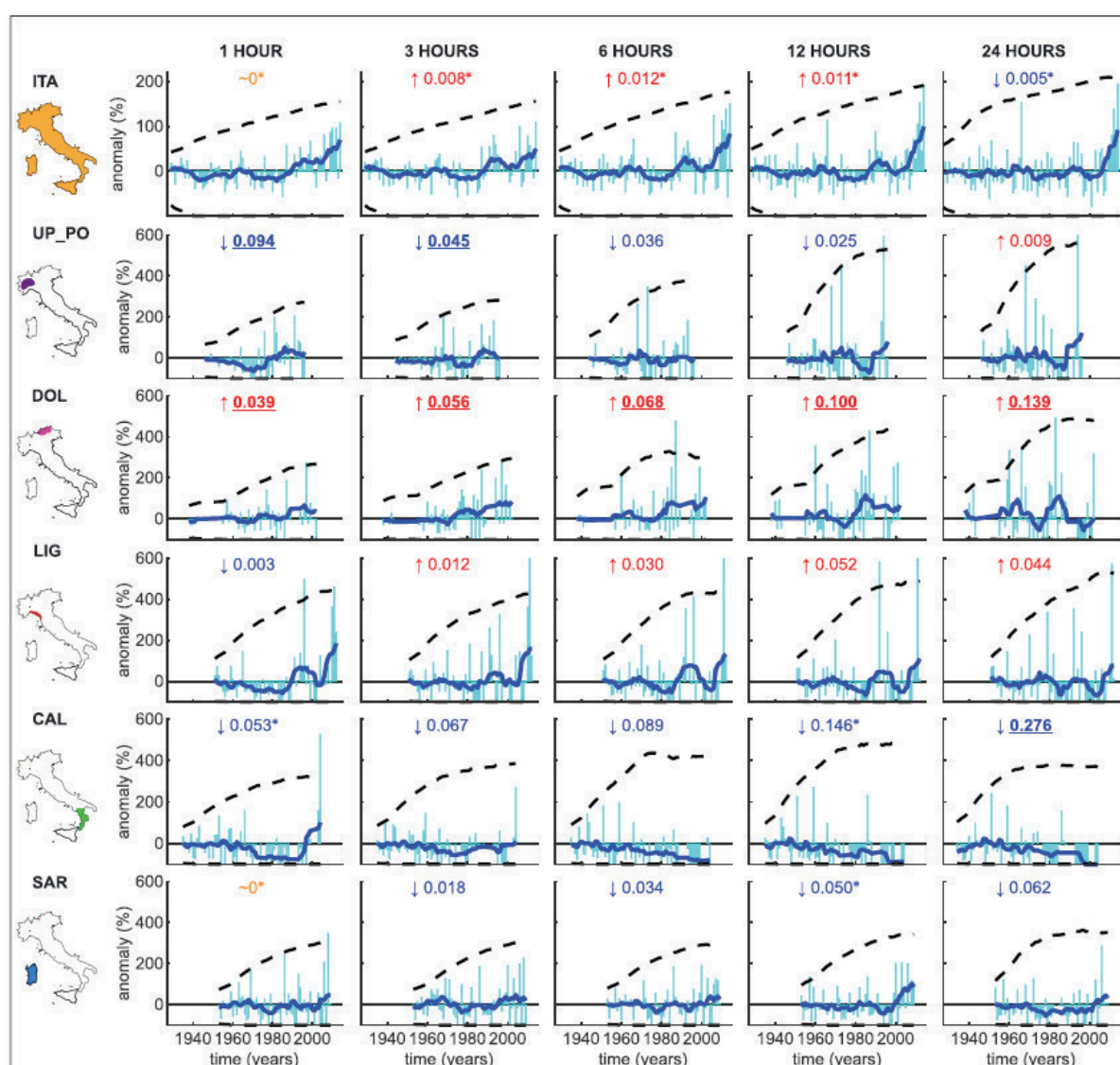


Figura 2.6 Risultati dell'analisi RB-RKT. Le righe si riferiscono alle regioni considerate: ITA (cioè l'intero paese), UP\_PO, DOL, LIG, CAL e SAR, rispettivamente, mentre le colonne si riferiscono a 1-, 3-, 6-, 12- e 24- ore durate, rispettivamente. I grafici si riferiscono all'analisi RB; le anomalie annuali RB (gli istogrammi ciano) sono livellate con un filtro a media mobile a 10 anni per mostrare le tendenze delle anomalie RB non lineari a lungo termine (le linee blu).



Le linee tratteggiate nere rappresentano l'intervallo di confidenza del 95% per il modello iid. I numeri colorati si riferiscono all'analisi RKT; i valori rosso / blu rappresentano la pendenza Kendall crescente / decrescente; i valori gialli indicano una pendenza nulla. Le tendenze significative sotto un livello di significatività del 5% sono riportate in grassetto e sottolineate. \* indica che le tendenze nella regione non sono omogenee secondo un test di Belle e Hughes (1984). RB = record; RKT = Regional Kendall Test.

Dalla sintesi di quanto emerso in letteratura, possono essere tratte alcune considerazioni generali utili ai fini del presente studio:

- A livello globale, appare chiaro lo sviluppo di scenari di cambiamento climatico che si traducono in un complessivo aumento delle temperature e riduzione delle precipitazioni medie
- Tale tendenza è meno evidente in relazione alla valutazione delle piogge intense anche a causa della maggiore incertezza dei dati disponibili e la minore durata delle serie temporali utili alla valutazione dei trend climatici
- A livello di macro-regione geografica (Europa Mediterranea), lo studio di Blöschl et al. (2019) evidenzia un trend in decrescita sulle piene fluviali;
- A livello nazionale, lo studio di Libertino et al. (2010) evidenziano trend climatici in leggera crescita per quanto riguarda le piogge intense ma non esclude la presenza di trend più o meno significativi in regioni più piccole con caratteristiche climatiche omogenee.
- A livello locale, due studi (Liuzzo et al., 2015; Forestieri et al., 2017) evidenziano attraverso due approcci diversi (il primo basato sull'analisi delle serie pluviometriche locali; il secondo sull'applicazione e validazione di un modello climatico regionale) la presenza di probabili trend climatici significativi di crescita sebbene con differenze territoriali rilevanti all'interno della regione. Entrambi gli studi evidenziano trend climatici di ordine di grandezza paragonabile.

Nella presente analisi, dovendo effettuare un'analisi locale a livello di singolo bacino, si procederà attraverso un approccio basato sull'analisi locale delle piogge intense (in analogia a quanto proposto da Liuzzo et al., 2015) con la consapevolezza che tale analisi può essere maggiormente affetta dalle incertezze legate ai dati pluviometrici disponibili ma, al contempo, fornisce un livello di dettaglio idoneo alla valutazione dei singoli bacini idrografici ed è facilmente aggiornabile, in futuro, con la disponibilità di nuovi dati.

Tale ultima considerazione rende la metodologia particolarmente adatta al Piano di Gestione del Rischio Alluvioni che, per sua natura, deve mirare a valutazioni conservative e aggiornabili nel tempo seguendo i cicli di vita del piano.

Seguendo gli orientamenti generali di altre Autorità di Bacino a scala nazionale, l'approccio locale sopra discusso sarà integrato con l'approccio geomorfologico proposto da Brugioni et al. (2010) che tuttavia non si concentra in generale sull'impatto del cambiamento climatico ma ne particolarizza una valutazione per quanto riguarda le piene lampo. Sarà quindi applicato il metodo di Brugioni et al. (2010), rivisitato attraverso l'introduzione di variabili significative per il contesto territoriale siciliano, e tale applicazione fornirà una valutazione sul rischio di piene lampo nei bacini di dimensioni comprese tra 2 e 20 km<sup>2</sup> e sull'evoluzione di tale rischio in presenza di trend climatici significativi. Il metodo locale di stima dei trend climatici sarà applicato

anche ai bacini di dimensioni superiori in modo da stimare il possibile impatto climatico sulle piene fluviali.

Nel seguito sarà descritto il metodo di stima dei trend climatici in maggiore dettaglio e saranno presentati i principali risultati dell'aggiornamento a scala regionale. Successivamente, sarà descritto ed aggiornato il metodo geomorfologico per la valutazione delle piene lampo. I due metodi saranno entrambi applicati localmente ai bacini del PGR nell'ambito delle monografie allegate alla presente relazione generale.

## 2.2 La valutazione dell'impatto del cambiamento climatico con approccio locale

Tra i metodi disponibili per quantificare gli effetti del cambiamento climatico sulle precipitazioni estreme, è stata scelta la *rilevazione dell'andamento delle serie massime annuali* mediante un test statistico.

A causa della limitata disponibilità di dati storici, questo approccio è stato preferito ad altri, come ad esempio l'analisi peak over threshold POT, che richiedono set di dati lunghi e completi.

Diverse procedure statistiche possono essere utilizzate per il rilevamento dei trends, in particolare test parametrici e non parametrici. Questo studio ha utilizzato il test di Mann-Kendall non parametrico per il rilevamento dei trends (Mann, 1945), (Kendall, 1962)). Questo test identifica la presenza di un trend senza fare un'ipotesi sulle proprietà di distribuzione, sebbene non ci debba essere una correlazione seriale affinché i p-valori risultanti siano corretti (Helsel & Hirsch, *Statistical methods in water resources*, 1992). Inoltre, i metodi non parametrici sono meno influenzati dalla presenza di valori anomali.

In un test di tendenza, l'ipotesi nulla  $H_0$  è che non vi sia alcun trend nella popolazione da cui vengono tratti i dati, e l'ipotesi  $H_1$  è che vi sia una tendenza nei record [per la descrizione del test, vedere (Helsel & Hirsch, *Statistical methods in water resources*, 1992)].

L'entità dei trends è stata valutata utilizzando una stima robusta non parametrica determinata da (Hirsch, Slack, & Smith, 1982):

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{x_j - x_l}{j - l} \right) \quad \forall l < j \quad (1)$$

Dove  $x_l$  è l-esima osservazione.

I valori di progetto delle piogge estreme sono generalmente stimati mediante la *serie massima annuale* (AMS). L'approccio AMS, molto frequente in letteratura, considera solo l'evento massimo nell'arco di un anno, sebbene altri eventi nell'anno possano superare i massimi annuali di altri anni. In alternativa alla tecnica AMS, l'approccio POT definisce i valori estremi considerando tutti gli eventi al di sopra di una soglia. Pertanto, i campioni POT non sono limitati a un valore all'anno, tuttavia, la selezione di un valore di soglia introduce un grado di soggettività nell'analisi dei valori estremi.

In questo studio, gli AMS sono stati scelti principalmente per preservare il numero di stazioni e gli anni di stazione disponibili. Come è noto, alcuni pluviometri



presentano dati mancanti per brevi periodi di tempo. Invece, l'analisi POT richiede un periodo di analisi comune, che implicherebbe una riduzione del numero disponibile di stazioni e degli anni di stazione (Ngongondo, Xu, Tallaksen, Alemaw, & Chirwa, 2011).

I *valori massimi annuali* per tutte le durate per determinati tempi di ritorno sono stati valutati utilizzando la *distribuzione dei valori estremi generalizzati* (GEV), che fornisce un buon adattamento dei dati misurati ed è utilizzata in tutto il mondo per modellare le precipitazioni estreme (Fowler & Kilsby, 2003), (Koutsoyiannis, 2004), (Gilleland & Katz, 2006)). La funzione di densità cumulativa (CDF) è data da (Jenkinson, 1955):

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k - (x - \varepsilon)}{\alpha} \right]^{1/k} \right\} \quad (2)$$

dove  $\alpha$  = parametro di scala;  $\varepsilon$  = parametro di posizione; e  $k$  = parametro di forma, che determina il tipo di coda asintotica. La stima dei parametri della distribuzione GEV si basa sull'analisi delle serie annuali estreme utilizzando la tecnica degli L-momenti (Hosking, L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, 1990). (Hosking & Wallis, Regional frequency analysis, 1997) hanno suggerito l'uso degli L-momenti, al posto dei momenti ordinari perché sono adatti a descrivere distribuzioni diverse e sono più robusti nella stima di campioni in presenza di valori anomali.

Per un dato campione  $Q_1; Q_2; \dots; Q_n$  di lunghezza  $n$ , ordinati in ordine crescente, gli L-momenti possono essere calcolati come combinazione lineare dei momenti ponderati di probabilità (PWM) di ordine  $r$ .

I parametri della distribuzione GEV sono relativi ai primi tre L-momenti come segue (Hosking & Wallis, Some statistics useful in regional frequency analysis, 1993):

$$\varepsilon = l_1 + \frac{\alpha[\Gamma(1+k) - 1]}{k} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{k \cdot l_2}{\Gamma(1+k) \cdot (1 - 2^{-k})} \quad (4)$$

$$k = 7.859z + 2.955z^2 \quad (5)$$

Dove  $z$  è dato da

$$z = \frac{2l_2}{l_3 + 3l_2} - \frac{\ln 2}{\ln 3} \quad (6)$$

e  $l_1, l_2$  e  $l_3$  = gli L-momenti del primo ordine, del secondo e del terzo ordine. Una volta stimati i parametri del GEV, il *T-esimo* quantile di tempesta massima annuale  $x_T$  per una data durata de periodo di ritorno  $T$  può essere valutato come segue:

$$h_{d,T} = \varepsilon + \frac{\alpha}{k} \left[ 1 - \left( \ln \frac{T}{T-1} \right)^k \right] \quad (7)$$

dove  $h_{d,T}$  = T-esimo quantile della tempesta massima annuale per dati d e T; e  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  e  $k$  = parametri di distribuzione GEV.

Le curve di profondità-durata-frequenza delle precipitazioni (DDF) descrivono la profondità delle precipitazioni come funzione della durata per determinati periodi di ritorno e rappresentano uno strumento importante per la progettazione delle strutture idrauliche. Il rapporto DDF per il tempo di ritorno T assume spesso la forma di un rapporto di diritto di potere, comunemente utilizzato in Italia (Burlando & Rosso, Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation, 1996), (Ranzi, Mariani, Rossini, Armanelli, & Bacchi, 1999)

$$h(d)_T = a_T \cdot d^{n_T} \quad (8)$$

dove  $h(d)_T$  è la profondità della pioggia al tempo di ritorno specificato T e durata d; e  $a_T$  e  $n_T$  sono i parametri della curva di profondità-durata-frequenza.

La pioggia  $h(d)_T$  è caratterizzata dalla proprietà dell'invarianza di scala (Gupta & Waymire, 1990).

Denotando un fattore di scala con  $\lambda > 0$ , la proprietà dell'invarianza di scala è valida se la variabile casuale  $Z(\lambda d)$  e  $\lambda^n \cdot Z(d)$  hanno la stessa distribuzione di probabilità per  $t_{in} \leq t \leq t_{out}$  e  $t_{in} \leq \lambda t \leq t_{out}$ , dove  $t_{in}$  e  $t_{out}$  rappresentano il limite fisico per il quale è valida la proprietà di invarianza di scala.

Questa proprietà implica anche che i quantili e i momenti grezzi di qualsiasi ordine siano invarianti di scala, cioè

$$h_{\lambda d,T} = \lambda^n \cdot h_{d,T} \quad (9)$$

$$E[h_{\lambda d}^r] = \lambda^n \cdot E[h_d^r] \quad (10)$$

dove  $r$  corrisponde all'ordine del momento. Adottando le proprietà dell'invarianza di scala,  $h(d)_T$  può essere espresso come

$$h(d)_T = E[H_{60}^1] \cdot w_T \cdot d^{n_T} \quad (11)$$

dove  $E[H_{60}^1]$  corrisponde alla profondità massima annuale media per la durata di riferimento di (1 h); e  $w_T$  è invece il T-esimo quantile della profondità massima annuale della pioggia normalizzata dalla sua media per qualsiasi durata nell'intervallo di esistenza di un comportamento in scala (indicato anche come fattore di crescita). Per analogia con l'eq. (8) il prodotto tra  $E[H_{60}^1] \cdot w_T$  rappresenta proprio il parametro  $a_T$  della curva DDF.

L'analisi è partita da una valutazione del database a disposizione dell'Autorità di Bacino e relativo a 362 pluviometri distribuiti sull'intero territorio regionale ed aggiornato al 2016. Si è deciso di soffermarci sui soli dati successivi al 1950 in relazione all'aggiornamento della strumentazione di misura al fine di garantire una maggiore omogeneità al dataset e ridurre l'effetto distorsivo legato alla qualità del dato.

Come è evidente dalla seguente figura, il dataset è sparso e diverse stazioni hanno avuto lunghi periodi di mancato funzionamento che le rendono inidonee all'analisi. In Figura 2.8 sono invece riportate le sole stazioni (96) che hanno avuto un

periodo di funzionamento superiore a 30 anni (nel periodo dal 1950 al 2016) e con vuoti interni alla serie inferiori a 6 anni.

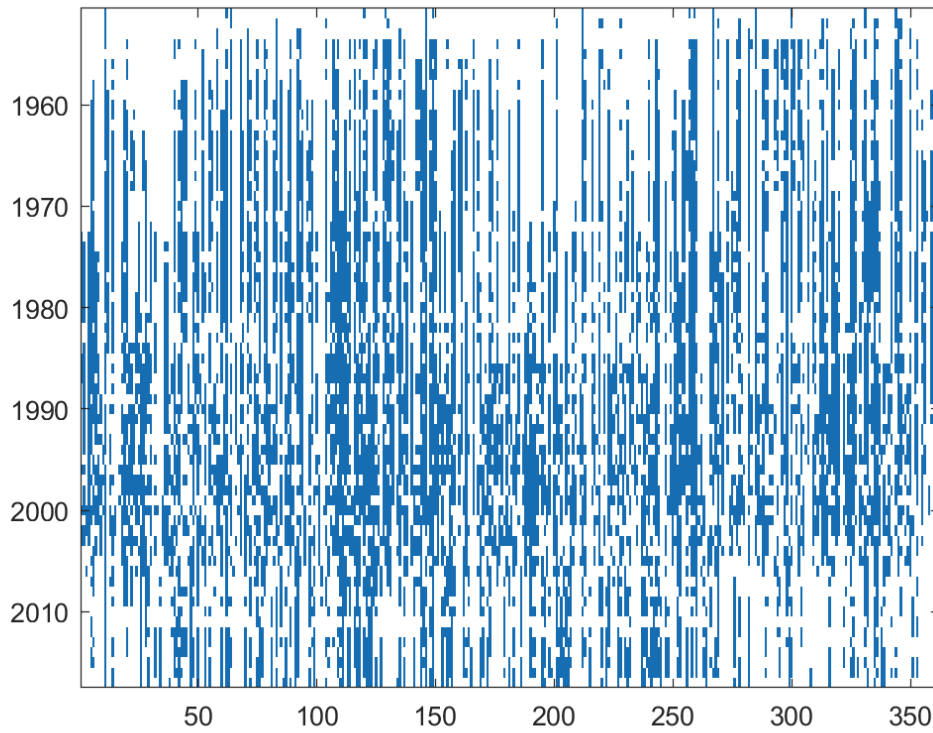
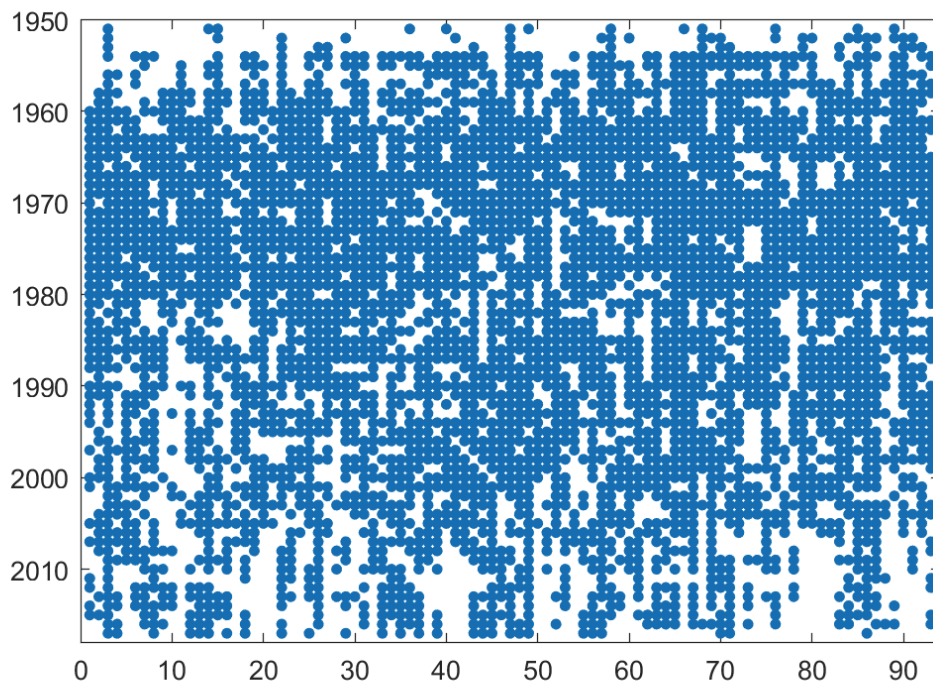
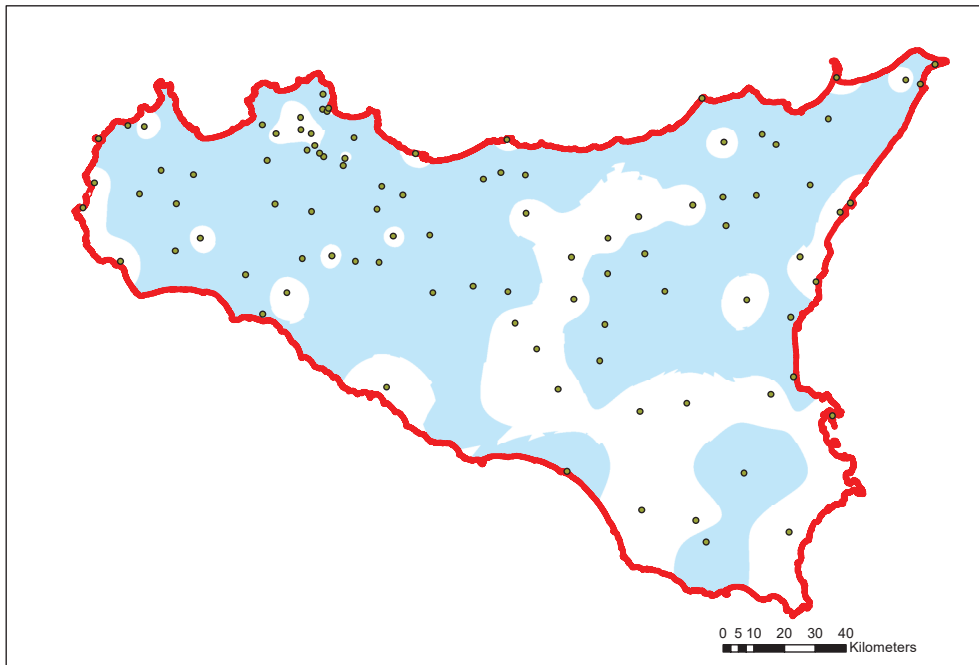


Figura 2.7 Consistenza della rete pluviometrica nel periodo 1950 - 2016.

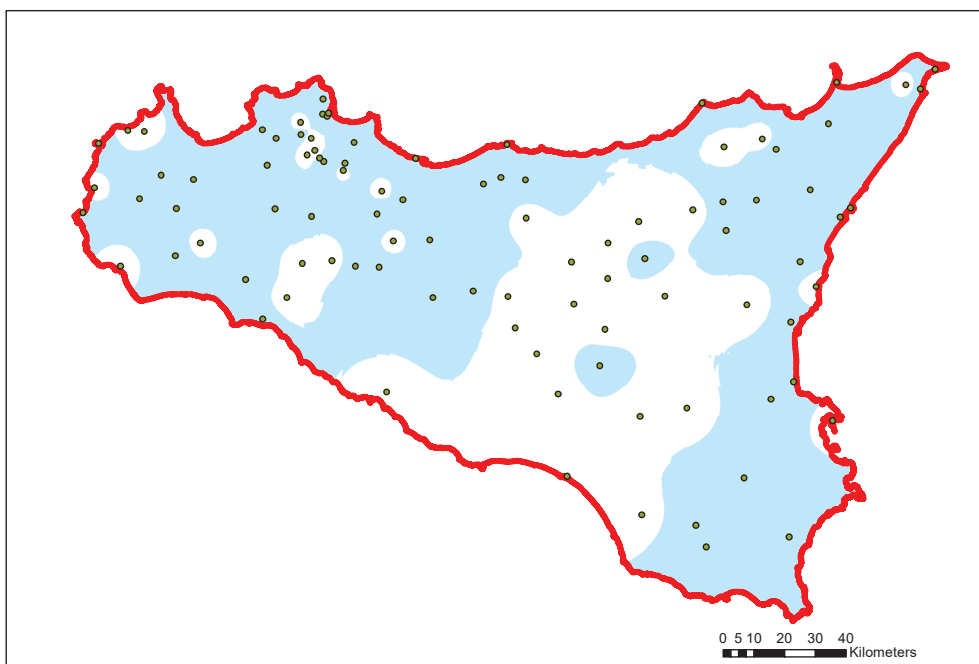


**Figura 2.8 Consistenza del dataset prescelto per l'analisi**

L'applicazione dell'approccio alle serie di dati disponibili ha evidenziato trend statistici significativi nelle aree riportate nelle seguenti figure per tutte le durate considerate (1h, 3h, 6h, 12h e 24h) e ipotizzando una significatività del trend pari a 0.05.



**Figura 2.9 Mappa della significatività del trend per le piogge intense di durata pari a 1h**



**Figura 2.10 Mappa della significatività del trend per le piogge intense di durata pari a 3h**

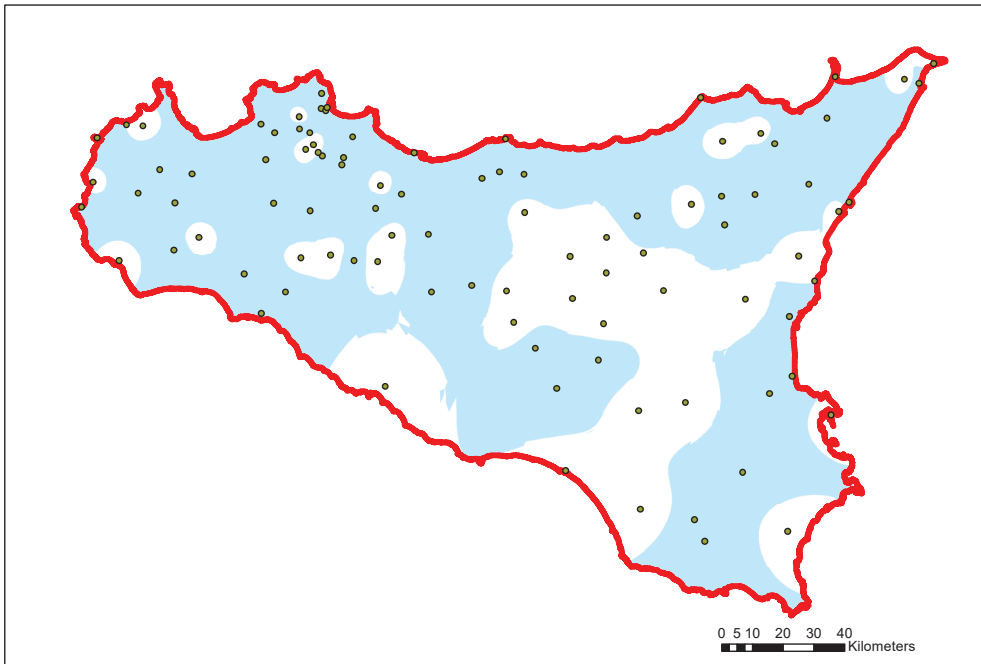


Figura 2.11 Mappa della significatività del trend per le piogge intense di durata pari a 6h

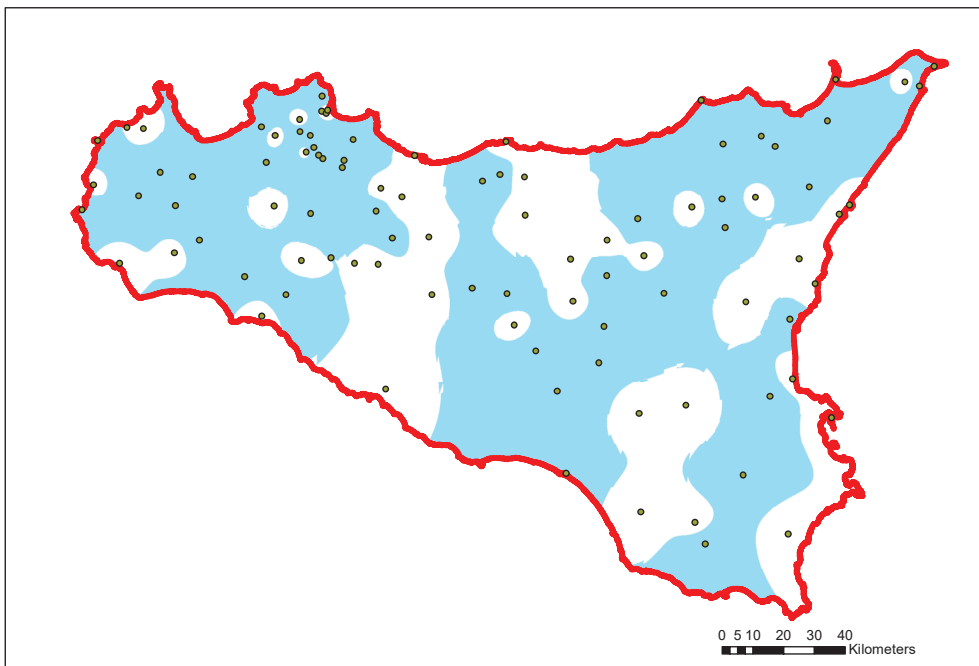
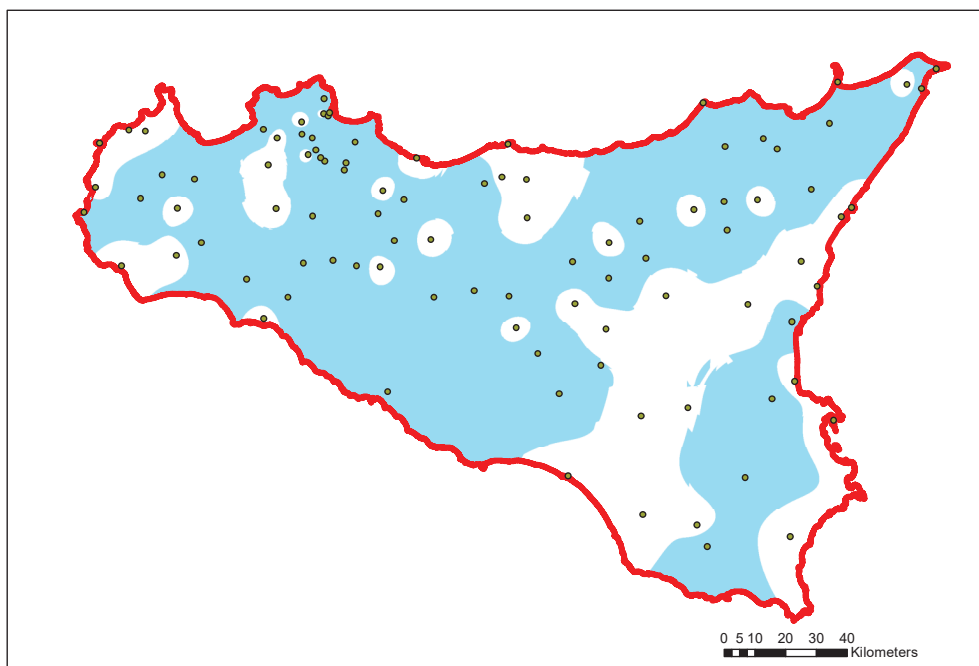


Figura 2.12 Mappa della significatività del trend per le piogge intense di durata pari a 12h



**Figura 2.13** Mappa della significatività del trend per le piogge intense di durata pari a 24h

L'analisi mostra che il trend climatico si manifesta in modo significativo sempre nell'area del Messinese e nella porzione occidentale dell'isola e appare meno significativo o assente nella porzione della Sicilia Centrale tra le province di Caltanissetta, Enna ed Agrigento.

Nelle seguenti figure è stata riportata l'entità del trend (espressa in mm/anno) che evidenzia per la maggior parte tendenze alla crescita delle piogge intense con i massimi che si manifestano nella Sicilia occidentale e sulla costa tirrenica della provincia di Palermo. La tendenza ad una riduzione delle altezze di pioggia di massima intensità e fissata durata si evidenzia, invece, in poche stazioni sostanzialmente concentrate lungo la costa ionica della Sicilia nell'area più prossima a Catania.

In linea generale, il trend si manifesta con segno omogeneo tra le piogge di diversa durata registrate nella medesima stazione. Il trend è, in valore assoluto, chiaramente crescente all'aumentare della durata delle precipitazioni considerate ma decrescente rispetto alla media delle serie registrate a testimonianza che il trend ha una maggiore intensità sulle piogge di breve durata (che in proporzione variano di più) rispetto alle piogge di durata pari a 12 ore e 24 ore. Le aree in bianco nelle seguenti figure non manifestano trend con livello di significatività pari a 0.05.

Le stesse mappe riportate nella presente relazione generale saranno poi riportate con maggiore dettaglio per i singoli bacini al fine di consentire l'applicazione dell'analisi sui singoli tratti fluviali.

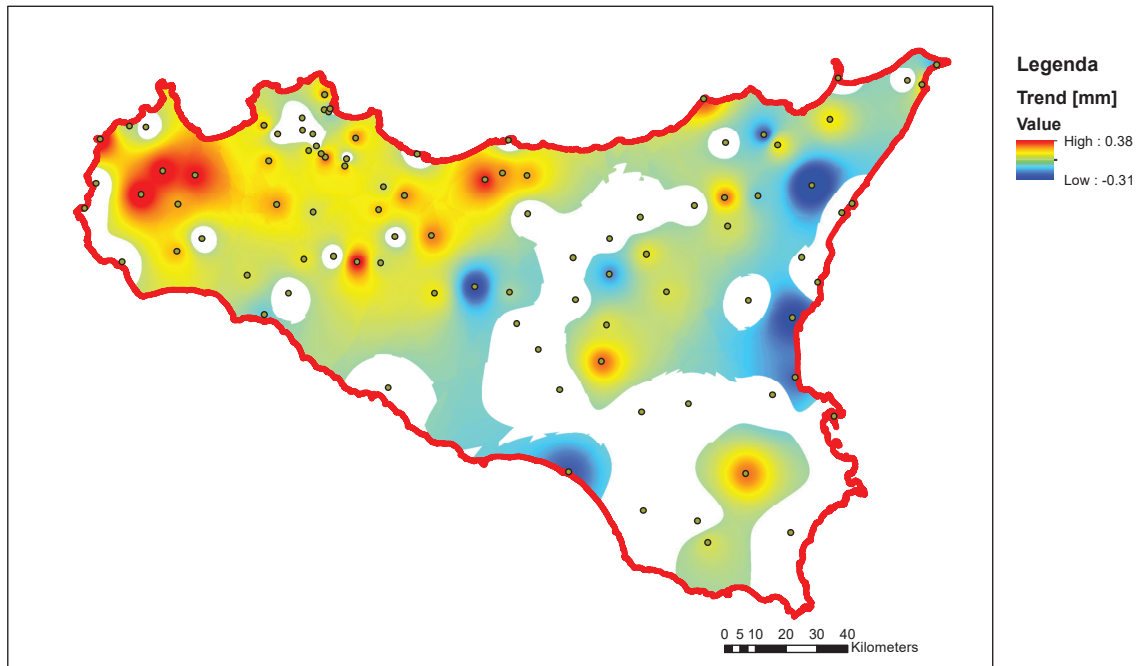


Figura 2.14 Andamento regionale del trend (in mm/anno) per le piogge intense di durata pari a 1h.

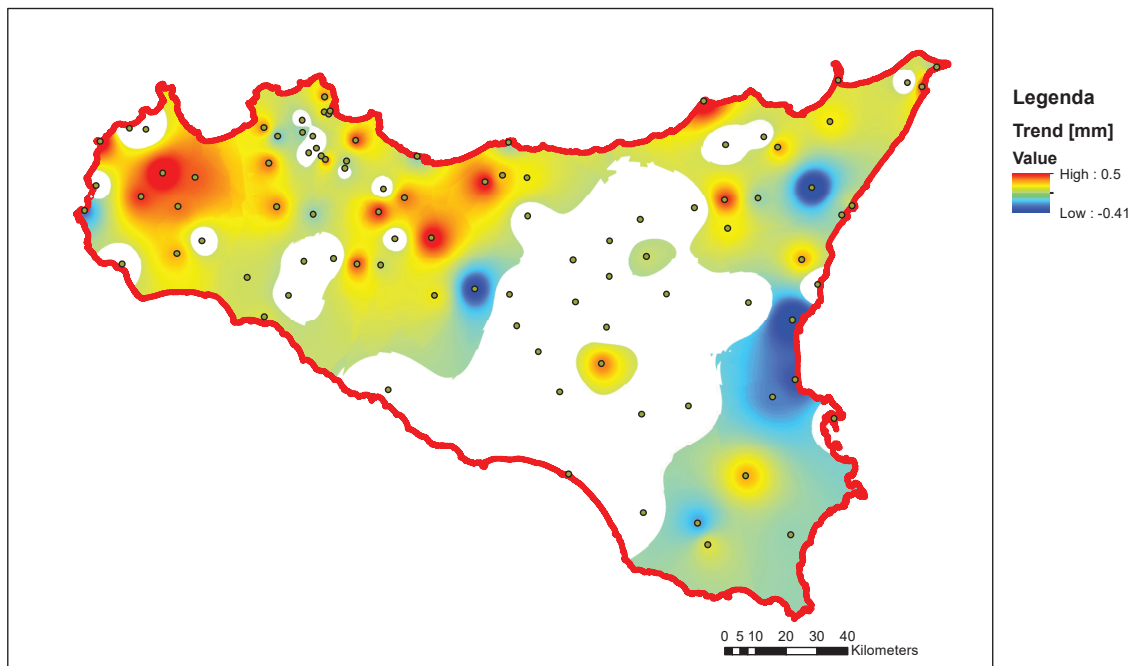


Figura 2.15 Andamento regionale del trend (in mm/anno) per le piogge intense di durata pari a 3h.

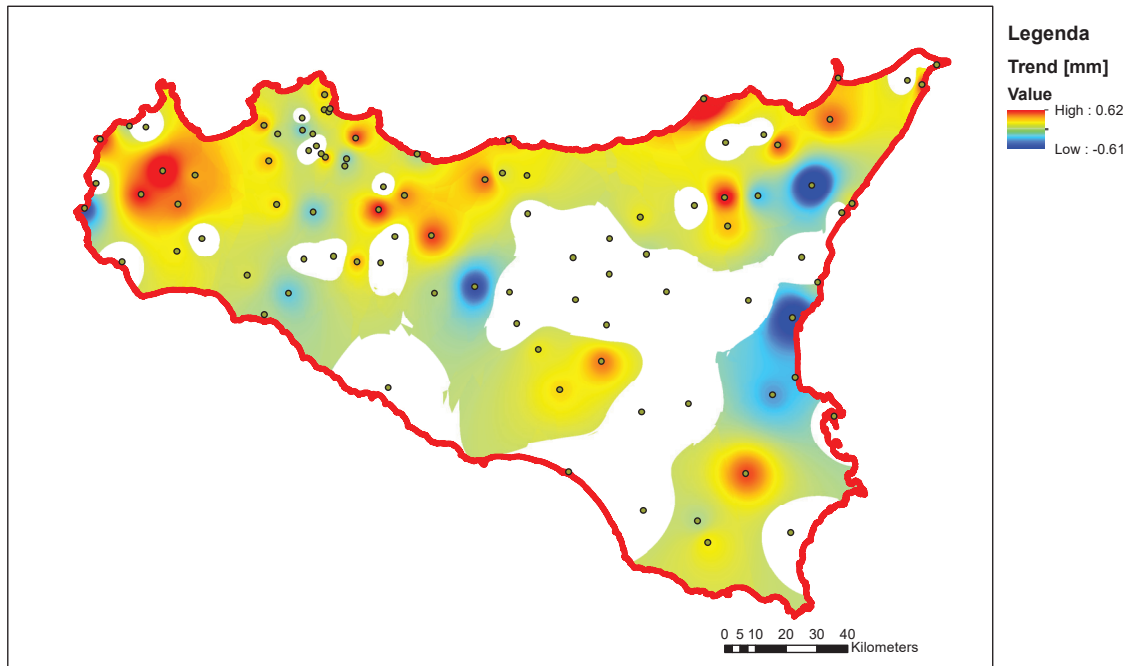


Figura 2.16 Andamento regionale del trend (in mm/anno) per le piogge intense di durata pari a 6h.

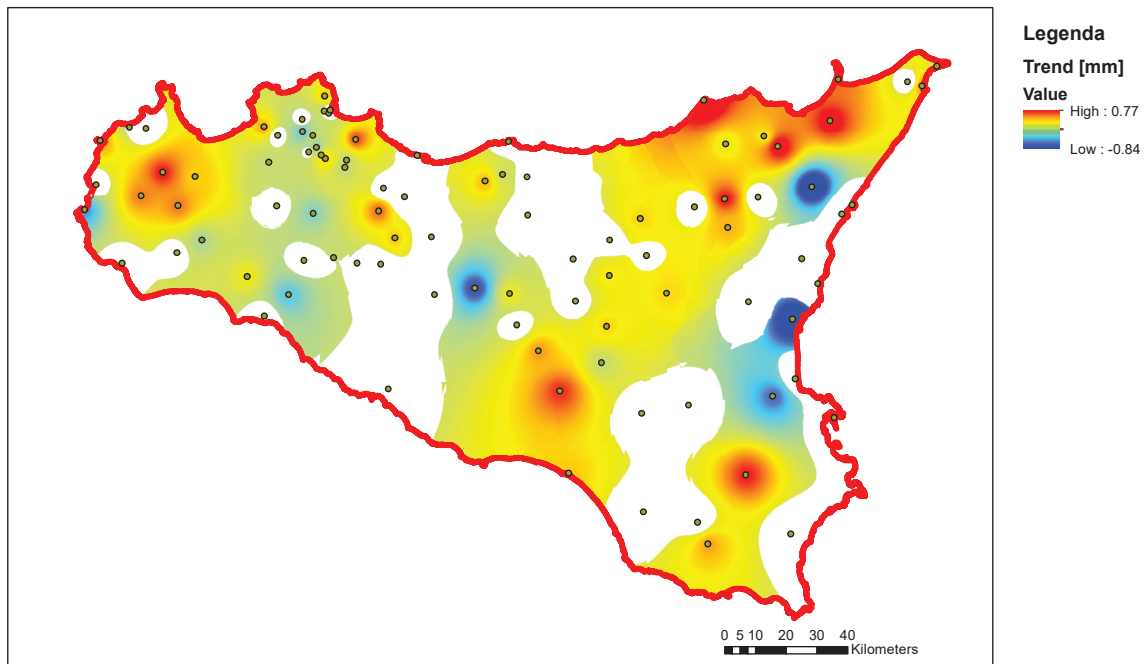
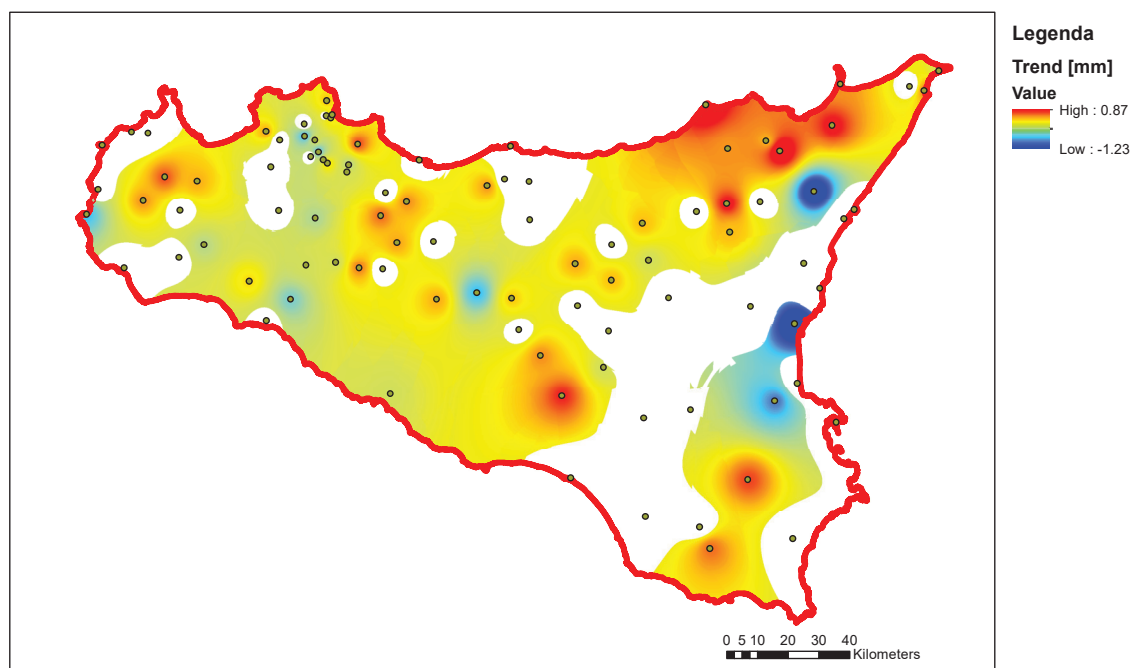


Figura 2.17 Andamento regionale del trend (in mm/anno) per le piogge intense di durata pari a 12h.





**Figura 2.18** Andamento regionale del trend (in mm/anno) per le piogge intense di durata pari a 24h.

Volendo fornire un'informazione utile alla valutazione delle suscettibilità delle piene fluviali al possibile cambiamento climatico si è deciso di utilizzare, come variabile proxy dell'impatto del trend sulle piene, la variazione delle piogge intense nello scenario climatico di medio termine (2050). Per ciascuna asta fluviale è stato quindi determinato il bacino drenato ed è stata stimata, sulla base dei trend climatici, la presumibile variazione, nel periodo di previsione 2017 – 2050, delle piogge di massima intensità e durata pari al tempo di corrivazione del bacino. Il tempo di corrivazione, in analogia al metodo proposto da Brugioni et al. (2010), è stato calcolato come media di diverse formulazioni che saranno descritte nel seguito e avendo cura di scartare quelle che, per caratteristiche del bacino drenante, non erano applicabili e quelle che forniscono rispettivamente il valore più alto e quello più basso (media con taglio degli estremi). Per i tempi di corrivazione intermedi tra le durate di pioggia di cui sono disponibili i dati, si è proceduto per interpolazione con legge di potenza in analogia a quanto sopra descritto.

L'analisi sulla variazione delle piogge intense non costituisce, di per sé, una valutazione dell'impatto climatico sulle piene dal momento che, nella presente analisi, viene trascurata l'analisi del processo di trasformazione afflussi – deflussi ma, nella logica del Piano, questa informazione ha la funzione di indirizzare le misure di mitigazione in una logica conservativa, di richiedere studi di maggior dettaglio (soprattutto nei bacini dove maggiore è la variabilità climatica) e di prevedere un aggiornamento dell'analisi climatica nei futuri cicli del Piano.

### 2.3 La valutazione del rischio di piene lampo attraverso l'approccio Arno

L'analisi climatica generale ha evidenziato che le piogge di breve e brevissima intensità manifestano la maggiore tendenza alla crescita nello scenario di medio termine. Tale processo, evidenziato con una significatività statistica pari a 0.05, potrebbe condurre ad un aumento della frequenza delle piene nei bacini di piccole dimensioni e con tempi di corrivazione inferiori all'ora. Si è quindi ritenuto opportuno effettuare un'analisi della suscettibilità dei bacini alle piene lampo attraverso l'applicazione del metodo proposto da Brugioni et al. (2010) modificato per tenere conto di parametri connessi con il consumo di suolo e per tenere conto del trend climatico.

Il metodo Arno consiste in un approccio utile alla verifica della propensione di un determinato bacino idrografico al verificarsi di eventi di piena improvvisi. La metodologia fu presentata per la prima volta nel 2010 nell'ambito del Workshop "*Flash Floods and Pluvial Flooding*" che si tenne a Cagliari (Brugioni et al., 2010) dal Distretto dell'Appennino Settentrionale ed è stata successivamente inserita nelle mappe del primo ciclo del Piano di Gestione del Rischio Alluvioni.

L'approccio prevede la valutazione di alcuni parametri che indica come predisponenti alle piene lampo e una successiva classificazione del bacino idrografico.

In particolare, i tre parametri predisponenti sono i seguenti:

1. Area del bacino idrografico: a parità di altre condizioni, minore è la superficie di un bacino idrografico e maggiore è il rischio che eventi pluviometrici brevi e intensi originino fenomeni di piena improvvisa. In tal senso, tale criterio è valido per bacini sotto i 500 kmq (rappresenta una soglia oltre la quale le problematiche di rischio idraulico non sono più connesse più a fenomeni flash-flood ma piuttosto ad alluvioni "classiche"). Per quest'ultima ragione, nei bacini che superano tale soglia di superficie, i sottobacini vallivi non saranno considerati.
2. Lag Time: il Lag Time, rappresentando il tempo di ritardo dell'onda di piena rispetto al baricentro della precipitazione, risulta un utile elemento per la valutazione della propensione al verificarsi di eventi di piena improvvisa in un bacino di piccole dimensioni. Ovviamente, minore è questo valore e maggiore è la predisposizione del bacino verso eventi di questo tipo.
3. Distribuzione del tempo di ritorno della precipitazione indice: oltre alla naturale predisposizione del bacino idrografico in funzione delle sue caratteristiche geometriche e idrauliche, un ulteriore parametro è il tempo di ritorno della precipitazione minima in grado di innescare fenomeni di piena improvvisa.

Successivamente, al fine di effettuare una valutazione della predisposizione dei bacini considerati al verificarsi di fenomeni tipo Flash Flood, per ognuno di precedenti parametri viene assegnata una classe attraverso un valore numerico crescente (1, 2, 3, 4) in funzione della rispettiva corrispondenza al criterio o meno; la combinazione di queste tre informazioni fornisce a sua volta un ulteriore classificazione (1, 2, 3, e 4) che descrive l'attitudine dell'area in esame ad essere soggetta ad eventi di flash flood e quindi alla suscettività al fenomeno.

Entrando nel dettaglio sull'applicazione del metodo, il primo passo è la definizione dei dati di input. Tali dati sono:

- il modello digitale del terreno (DEM) con maglia a 10 m, reso disponibile per tutto il territorio dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e disponibile su [http://tinality.pi.ingv.it/Download\\_Area2.html](http://tinality.pi.ingv.it/Download_Area2.html) (Tarquini e Nannipieri, 2017)<sup>1</sup>
- il reticolo idrografico di interesse derivato dagli strati informativi del Sistema Informativo Territoriale Regionale della Regione Siciliana;
- le statistiche pluviometriche degli eventi estremi.

Successivamente per procedere al calcolo dei tre parametri richiesti dalla metodologia, ovvero l'area, il tempo di lag ed il tempo di ritorno associato ad una soglia pluviometrica tipica di eventi intensi e concentrati, pari a 50mm in 1h (come in accordo con la metodologia originaria), occorre definire i sottobacini del bacino idrografico di riferimento che per l'appunto, vengono delineati in riferimento ad ogni asta del reticolo idrografico dello stesso.

In merito al calcolo del tempo di lag, il parametro è calcolato in funzione del tempo di corrivazione ( $Lag\ time = 0.6 \cdot tempo\ di\ corrivazione$ ) a sua volta calcolato confrontando 10 formulazioni differenti da letteratura e che di seguito sono riportate (Giandotti, Kirpick, Johnstone, California, Pezzoli, Puglisi, Ventura, Tournon, Pasini e Viparelli). Per ciascun sottobacino, è stata effettuata la media di tutte le formulazioni applicabili sulla base delle dimensioni dell'area analizzata, avendo cura di eliminare la formulazione che determina il valore massimo e quella che determina il valore minimo (media con taglio degli estremi).

$$Giandotti = (4 \cdot A^{0.5} + 1.5 \cdot L) / (0.8 \cdot (Q_{med} - Q_{min})^{0.5})$$

$$Kirpick = 0.000325 \cdot (L \cdot 1000)^{0.77} \cdot i_b^{-0.385}$$

$$Johnstone\ and\ Cross = (3.258 \cdot (D_{max} / i_b)^{0.5}) / 60$$

$$California\ Culvert\ Practice = ((11.9 \cdot (L \cdot 0.621371)^3) / ((Q_{max} - Q_{min}) \cdot 3.28084))^{0.385}$$

$$Pezzoli = 0.055 \cdot L / i_a^{0.5}$$

$$Puglisi = 6 \cdot LunghezzaAsta^{2/3} \cdot (Q_{max} - Q_{min})^{-1/3}$$

$$Ventura = 0.1272 \cdot (A / i_a)^{0.5}$$

$$Tournon = ((0.396 \cdot L) / (i_a)^{0.5}) \cdot ((A / L^2) \cdot (i_a / i_b)^{0.5})^{0.72}$$

$$Pasini = 0.108 \cdot ((A \cdot L)^{1/3}) / (i_a^{0.5})$$

$$Viparelli = L / (3.5 \cdot 1.5)$$

Dove:

A [Km<sup>2</sup>], Area del bacino idrografico.

L [Km], Lunghezza dell'asta principale.

<sup>1</sup> Tarquini S., Nannipieri L., (2017) The 10 m-resolution TINITALY DEM as a trans-disciplinary basis for the analysis of the Italian territory: Current trends and new perspectives. *Geomorphology*, 281, 108-115.

$Q_{max}$  [m], Quota massima del bacino idrografico.

$Q_{med}$  [m], Quota media del bacino idrografico.

$Q_{min}$  [m], Quota minima del bacino idrografico.

$D_{max}$  [Km], Distanza massima tra lo spartiacque e la sezione di chiusura.

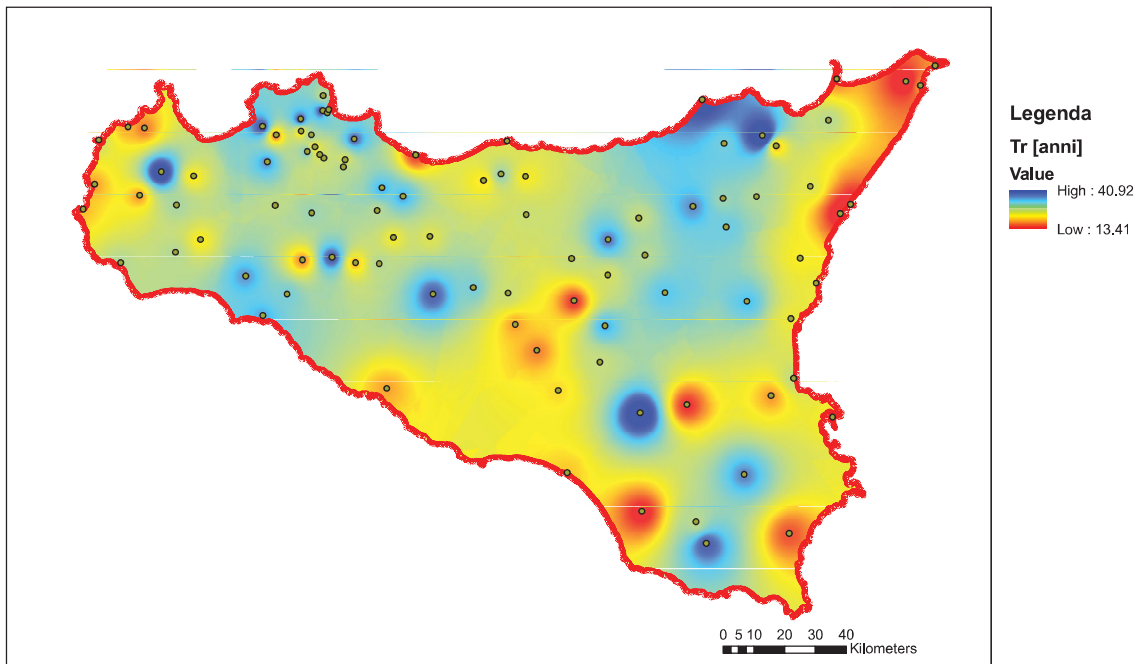
$i_b$  [m/m], Pendenza media del bacino idrografico.

$i_a$  [m/m], Pendenza media dell'asta principale.

V, Velocità media di deflusso all'interno dei canali, i valori suggeriti dell'autore sono compresi tra [1;1.5 ] m/s, nell'applicazione online si assume il limite superiore.

P[Km], Perimetro del bacino idrografico.

Il parametro climatico (il tempo di ritorno della pioggia indice) è stato stimato sulla base dell'analisi statistica, presentata nel precedente paragrafo, e svolta attraverso l'applicazione della distribuzione GEV avendo verificato l'ipotesi dell'invarianza di scala. Per omogeneità, la valutazione del tempo di ritorno a livello regionale è stata effettuata sulla base del database di 96 pluviometri utilizzato per le analisi sui trend climatici.



**Figura 2.19** Andamento del tempo di ritorno a scala regionale della pioggia indice di altezza pari a 50mm e durata pari ad 1 ora.

Calcolati i 3 parametri occorre poi assegnare un valore numerico ad ognuno dei sottobacini delineati al fine di ottenere una classificazione e quindi un punteggio che ne determinerà il livello di suscettività finale.

Come detto in precedenza, riguardo al criterio funzione delle aree dei sottobacini, minore è l'area e maggiore è il suo punteggio e viceversa; lo stesso vale per gli altri due criteri basati sul tempo di lag e quello di ritorno.

Alla fine, ogni sottobacino avrà un punteggio differente e la classe finale verrà individuata in base alla sommatoria dei tre indici precedenti, determinando quindi la definizione di quattro classi finali a cui corrisponde il valore 1 per una suscettività di livello basso, 2 di livello moderato, 3 elevato e 4 molto elevato.

## 2.4 Introduzione di parametri aggiunti per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico e del consumo di suolo sul rischio di piene lampo

Il metodo proposto da Brugioni et al. (2010) ha il vantaggio di fornire una stima indiretta (geomorfologica e climatica) della suscettibilità del territorio alle piene lampo senza richiedere la disponibilità di dati su eventi storici (spesso poco documentati) che limiterebbero enormemente l'applicabilità sul territorio nazionale.

Nel corso degli anni altre Autorità di Distretto hanno sperimentato l'applicazione di questo metodo implementandolo sui rispettivi territori e proponendo alcune varianti che tengono anche conto dell'incremento del consumo di suolo e con indicatori di variabilità climatica.

Nella presente applicazione, sulla base del metodo proposto nel paragrafo 2.2, si è proceduto ad una stima aggiornata del tempo di ritorno della pioggia indice nello scenario climatico di medio termine 2050. Tale analisi ha consentito di stimare il parametro idrologico del metodo anche nello scenario di futuro cambiamento climatico. La seguente figura, in analogia a quella riportata nel precedente paragrafo, mostra l'andamento dei tempi di ritorno della pioggia indice di altezza pari a 50 mm e durata pari ad 1 ora.

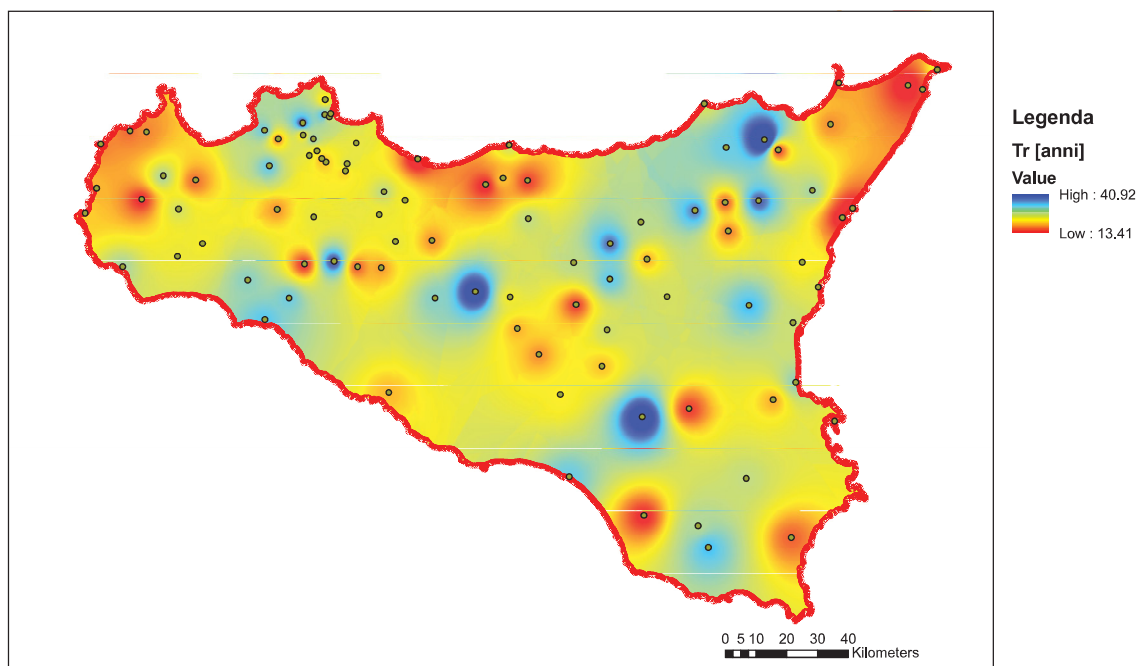


Figura 2.20 Andamento del tempo di ritorno a scala regionale della pioggia indice di altezza pari a 50mm e durata pari ad 1 ora nello scenario di cambiamento climatico di medio termine (2050)



Tale analisi consente di valutare il parametro climatico nella condizione attuale e nella condizione di medio termine fornendo sia una mappa della suscettibilità attuale alle piene lampo sia un'evoluzione futura. Tali valutazioni saranno effettuate sui singoli bacini nell'ambito delle monografie allegata alla presente relazione.

Anche nel presente studio si è scelto di integrare la metodologia Arno con la valutazione del consumo del suolo, classificando anche quest'ultima attraverso dei valori numerici (1, 2, 3 e 4) a cui corrisponde un valore più basso ad un consumo di suolo minore e un valore più alto nel caso opposto.

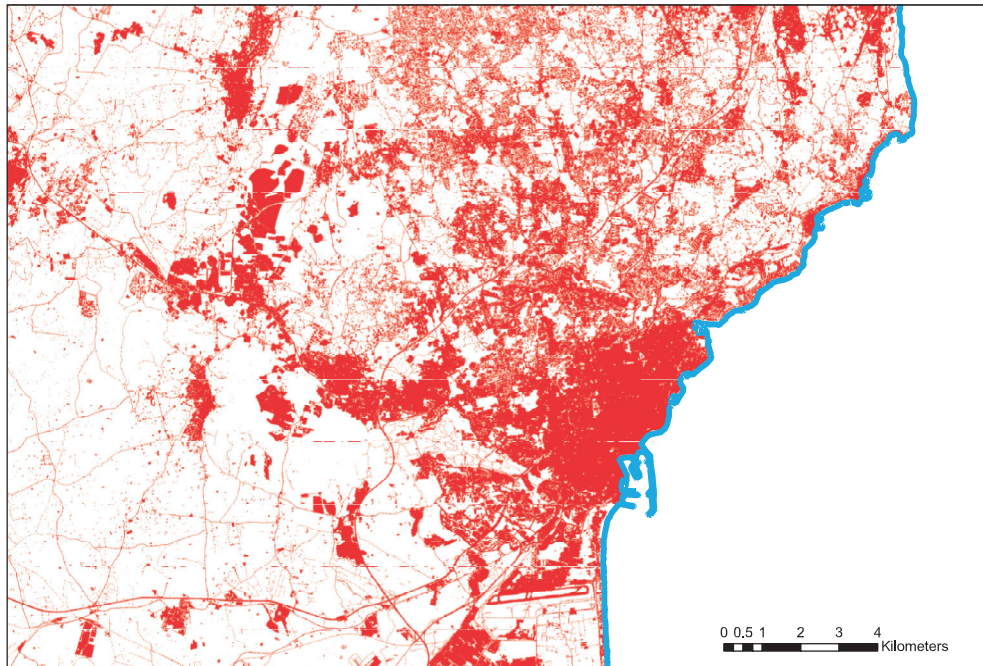
L'analisi è stata fatta a scala di ciascun sottobacino in cui è stato diviso ciascun bacino idrografico incluso nel PGR a partire dai dati di consumo di suolo disponibili presso il Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (Report 15/2020 del 22 luglio 2020)<sup>2</sup>. Il dato disponibile su tutto il territorio regionale con dettaglio spaziale pari a 10m è aggiornato al 2019 e consente di effettuare confronti con le edizioni precedenti (2012, 2015, 2016, 2017, 2018). Le seguenti figure mostrano il dettaglio del suolo consumato nelle due maggiori aree urbane della Sicilia (Palermo e Catania) a titolo di esempio per comprendere il livello di dettaglio fornito dai dati.

Il confronto con le precedenti valutazioni consente anche di valutare una tendenza futura al consumo di suolo come interpolazione dei dati ottenuti dalle 6 edizioni dello studio sviluppato da ISPRA. Le figure 2.23 e 2.24 mostrano la variazione del consumo di suolo tra il 2012 ed il 2019. Il dato di tendenza al consumo di suolo è stato utilizzato per stimare la variazione dell'indicatore nel tempo e, in particolare, nello scenario di medio termine (2050).

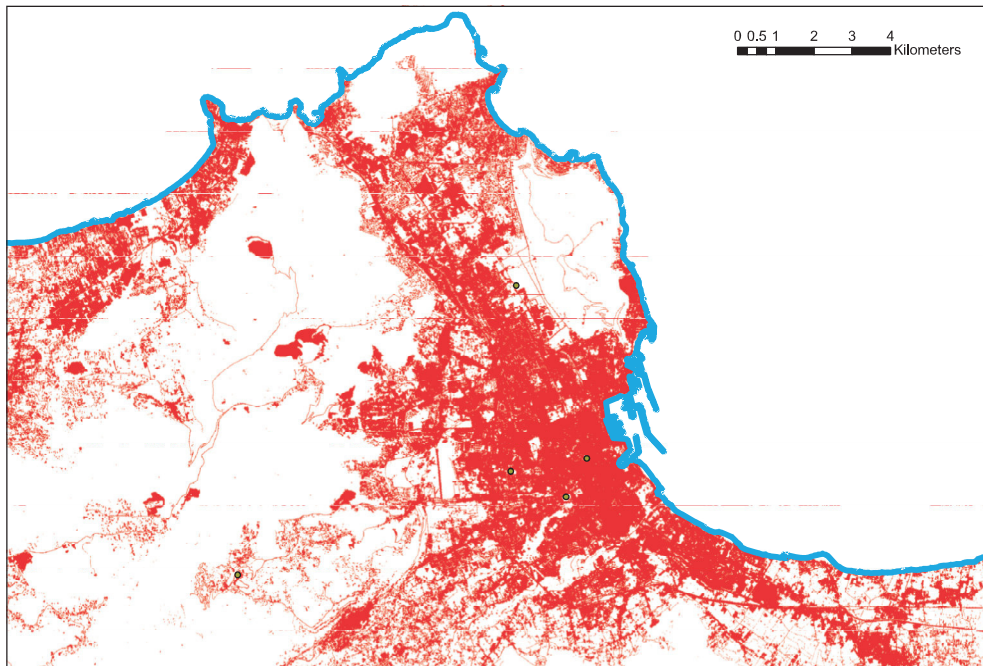
Tale aggiornamento ha consentito di effettuare l'analisi di suscettibilità alle piene lampo anche nello scenario di medio termine (2050) lasciando, ovviamente invariati, i parametri geomorfologici e idrologici (area del bacino e lag time) e variando i parametri climatici (Tr della pioggia indice) e di consumo del suolo (% di bacino consumato).

---

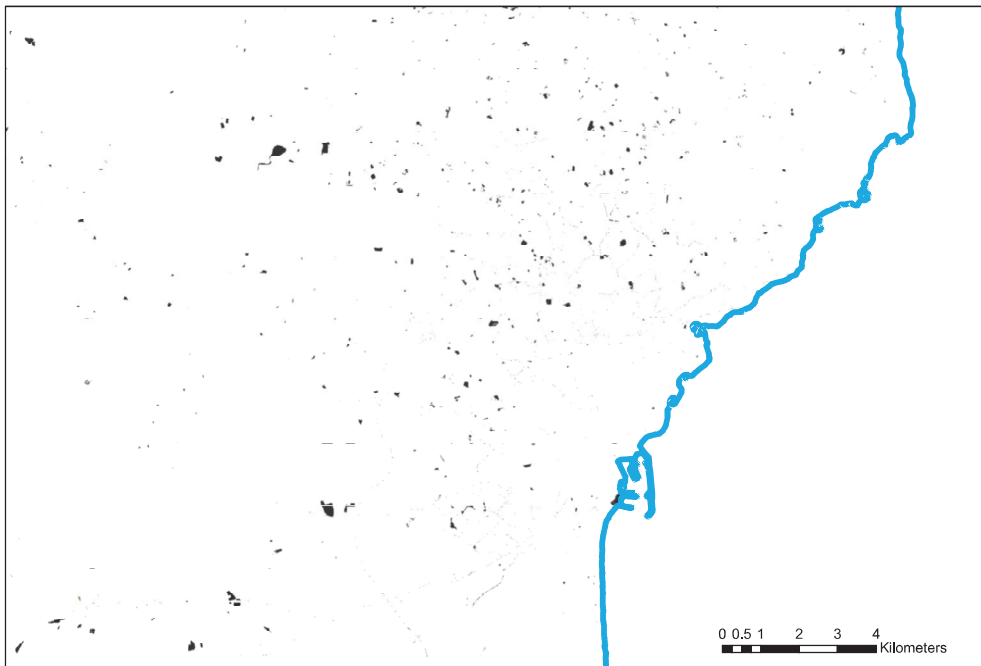
<sup>2</sup> Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2020. Report SNPA n. 15/2020



**Figura 2.21 Suolo consumato nell'area metropolitana di Catania al 2019**



**Figura 2.22 Suolo consumato nell'area metropolitana di Palermo al 2019**



**Figura 2.23** Variazione del consumo di suolo tra il 2012 ed il 2019 nell'area metropolitana di Catania: in nero le aree consumate nel periodo; in verde le aree ripristinate nel periodo



**Figura 2.24** Variazione del consumo di suolo tra il 2012 ed il 2019 nell'area metropolitana di Palermo: in nero le aree consumate nel periodo; in verde le aree ripristinate nel periodo



## 2.5 Gli allegati alla relazione

Per rendere la relazione più gestibile, si è preferito rimandare l'analisi di dettaglio di ciascun bacino a specifiche monografie allegate alla presente relazione metodologica e di seguito elencate:

- 004 Bacino Niceto
- 009 Bacino Termini
- 018 Bacino Inganno
- 019 Bacino Furiano
- 024 Bacino Tusa
- 026 028 029 Bacino Pollina e Aree intermedie
- 030 Bacino Imera Settentrionale
- 031 Bacino Torto
- 033 Bacino San Leonardo
- 035 Bacino Milicia
- 037 Bacino Eleuterio
- 039 Bacino Oreto
- 042 Bacino Nocella
- 043 Bacino Jato
- 044 045 046 Bacino San Bartolomeo e Aree intermedie
- 051 Bacino Birgi
- 054 Bacino Arena
- 057 Bacino Belice
- 058 Bacino Carboj
- 061 Bacino Verdura
- 062 Bacino Magazzolo
- 063 Bacino Platani
- 067 Bacino San Leone
- 068 Bacino Naro
- 073 Area Territoriale tra il Bacino del T.te Rizzuto e il bacino del F. Imera Meridionale
- 074 Bacino Rizzuto
- 075 Bacino Comunelli
- 076 Area Territoriale tra il Bacino del F. Gela e il Bacino del T.te Comunelli
- 077 Bacino Gela
- 087 Bacino Asinaro
- 091 Bacino Anapo
- 093 Bacino San Leonardo Irminio
- 094 Bacino Simeto
- 101 Bacino Fiumedinisi

A corredo di ciascuna monografia, sono presenti le tavole richiamate nel testo e predisposte in ambiente GIS.

### **3 Modifiche alle misure di piano**

#### **3.1 Aggiornamento della valutazione dei punteggi tecnici alle misure inserite nel piano in relazione alla valutazione del cambiamento climatico**

##### **3.1.1 Sintesi del metodo per l'attribuzione delle priorità alle misure del piano**

Si riporta una breve sintesi del metodo adottato nel PGRA per l'individuazione delle priorità di intervento e le relative aree di impatto nella mitigazione del rischio.

In accordo con quanto presente nelle indicazioni stabilite dalla Direttiva 2007/60 e dal Decreto Legislativo 49/2010, nel presente documento sono riportate per ciascun bacino idrografico le misure previste e il livello di priorità (distinti in basso, medio, critico, alto e molto alto, secondo le indicazioni del documento comunitario "Guidance for Reporting under the Floods Directive (2007/60/EC)").

La metodologia utilizzata per l'individuazione dei livelli di priorità di ciascuna misura assume un approccio di tipo multi criteriale.

Vengono definiti una serie di Obiettivi che consistono nella riduzione del rischio per le 4 tipologie di elementi esposti: salute umana, attività economiche, patrimonio culturale, ambiente e di 12 Sub-Obiettivi, che costituiscono un'ulteriore specificazione degli Obiettivi stessi, così suddivisi: 2 per la salute umana, 5 per le attività economiche, 2 per il patrimonio culturale e 3 per l'ambiente.

Considerando che gli obiettivi non sono tutti di uguale importanza, il metodo prevede di assegnare ad essi dei pesi in funzione del loro valore sociale e possono essere distinti in due tipologie: Global Weight (GW) e Local Weight (LW). Il GW fornisce la rilevanza assoluta attribuita agli elementi a rischio (maggiore per il sub-obiettivo "salute umana"); tale rilevanza è stabilita a livello nazionale. Il LW consente di tener conto dell'applicabilità degli obiettivi al contesto locale, in funzione della presenza degli elementi a rischio sull'area a cui è applicata la misura. Ciò implica che a differenza del GW, il LW può essere 0 se un dato obiettivo non è applicabile all'area di studio. Ciascuna misura viene valutata in relazione alla propria capacità di ridurre o meno il rischio sulle varie tipologie di beni esposti presenti nell'area di efficacia della misura stessa.

Il primo passo per l'applicazione della metodologia è quello di individuare quale sia l'area su cui la misura avrà incidenza e quindi calcolare i LW su tutti i sub-obiettivi. Si procede quindi al calcolo dei prodotti  $GW \cdot LW$ .

Analisi del trend climatico ed impatto sulle misure del PGRA

OBIETTIVI	SUB-OBIETTIVI	GLOBAL WEIGHT (GW)	LOCAL WEIGHT (LW) valori	LOCAL WEIGHT (LW) Descrizione	GW*LW
Riduzione del rischio sociale	Riduzione del rischio per la salute umana	50	5	oltre 2000 abitanti	
			4	meno di 2000 abitanti meno di 1000 abitanti	
			3		
			2	meno di 200 abitanti meno di 50 abitanti	
			1	assenza di abitanti	
	Riduzione del rischio per l'operatività di strutture di interesse sociale (scuole, università, ospedali, case di cura, di accoglienza, municipi, prefetture, caserme, carceri, ecc.)	25	5	più di una infrastruttura	
			2	almeno una infrastruttura	
Riduzione del rischio per Attività Economiche	Riduzione del rischio per infrastrutture di servizio (centrali e reti elettriche, reti idropotabili, impianti di trattamento delle acque, impianti di depurazione, ecc.)	15	5	più di 15000 ab serviti	
			4	meno di 15000 ab serviti	
			3	meno di 10000 ab serviti	
			2	meno di 5000 ab serviti	
			1	meno di 2000 ab serviti	
	Riduzione del rischio per infrastrutture di trasporto (strade, autostrade, ferrovie, aeroporti, ecc.)	10	5	ferrovie, aeroporti, autostrade	
			4	strade statali	
			3	strade regionali	
			2	strade comunali	
			1	altre tipologie di collegamenti di importanza locale	
	Riduzione del rischio per le attività commerciali e industriali	20	5	più di 1000 addetti	
			3	meno di 1000 addetti	
			1	meno di 200 addetti	
	Riduzione del rischio per attività agricole	5	5	nessuna attività presente	
			4	estensione > di 2000 ha	
3			estensione < di 2000 ha		
2			estensione < di 500 ha		
1			estensione < di 200 ha		
0	estensione < di 20 ha				
0	nessuna attività presente				

	Riduzione del rischio per proprietà immobiliari (stimato in base al n. di abitanti)	15	5 4 3 2 1 0	oltre 2000 abitanti meno di 2000 abitanti meno di 1000 abitanti meno di 200 abitanti meno di 50 abitanti assenza di abitanti	
Riduzione del rischio per Beni Culturali	Riduzione del rischio per i beni architettonici, storici, culturali	35	5 3 0	beni di rilevanza nazionale e internazionale beni di rilevanza locale nessun bene presente	
	Riduzione del rischio per il paesaggio	15	5 2 0	beni di rilevanza nazionale beni di rilevanza locale nessun bene presente	
Riduzione del rischio per l'Ambiente	Riduzione del rischio per lo stato ecologico dei corpi idrici ai sensi della WFD	10	5 4 3 0	corpi idrici WFD in stato elevato corpi idrici WFD in stato buono corpi idrici WFD in stato inferiore al buono nessun corpo idrico WFD	
	Riduzione da fonti di inquinamento	20	5 0	presenza di fonti di inquinamento nessuna fonte di inquinamento	
	Riduzione del rischio per le aree protette ai sensi della WFD	10	5 0	presenza di aree protette danneggiabili nessuna area protetta danneggiabile	

Nel caso in cui non fosse possibile reperire dati sul numero di abitanti serviti per la valutazione delle infrastrutture di servizio, in alternativa si può utilizzare in alternativa il seguente schema di punteggi:

Riduzione del rischio per Attività Economiche	Riduzione del rischio per infrastrutture di servizio (centrali e reti elettriche, reti idropotabili, impianti di trattamento delle acque, impianti di depurazione, ecc.)	15	3 1 0	più di una infrastruttura di servizio almeno una infrastruttura di servizio nessuna infrastruttura di servizio
---	--	----	-------------	--

Il livello di performance della misura rispetto agli obiettivi viene valutato in termini di "Score" (S), ossia un punteggio impostato in modo tale da essere uguale a 0 nel caso in cui la misura non produca alcun effetto rispetto ad un determinato

obiettivo. Punteggi positivi e simmetricamente negativi sono attribuiti a seconda che la misura produca una riduzione o un incremento del rischio.

SCORE = efficacia rispetto alla riduzione/incremento di rischio						SCORE*(GW*LW)
riduzione significativa	riduzione limitata	solo in caso di misure che consistono in studi, indagini conoscitive	nessuna variazione	incremento limitato	Incremento significativo	
5	3	1		-3	-5	

Una volta identificato il valore dello Score per ciascun sub-obiettivo, si calcola il prodotto GW\*LW\*S che fornisce una quantificazione, per sub-obiettivo dell'efficacia che la misura può avere in termini di riduzione/incremento del rischio nell'area di interesse (come riportato nella tabella precedente). L'efficacia complessiva della misura si ottiene dalla somma di tali prodotti che è denominata MCA (Multi-Criteria Assesment) Score e si determina come di seguito:

$$MCA = \sum_{t=1}^{t=12} (GW \cdot LW \cdot S)$$

Infine, il metodo prevede un'ulteriore valutazione rispetto ad alcuni aspetti che ne caratterizzano la "Fattibilità e sostenibilità tecnica" mediante un Technical Weight (TW) che va a moltiplicare lo MCA score. Questa operazione permette di verificare che la misura soddisfi alcuni dei criteri preferenziali specificati all'art. 7 comma 2 della Direttiva Floods ([omissis] nonstructural initiatives and/or the reduction of the likelihood of flooding), in modo che essa sia adattabile a variazioni del rischio indotte dai cambiamenti climatici e di uso del suolo, sia efficace rispetto a più tipologie di alluvioni e richieda meno interventi manutentivi possibili. Il valore di TW dovrà risultare  $\geq 1$ , in quanto se TW = 1 la misura non ottempera a nessuno dei criteri tecnici suddetti.

Fattibilità e Sostenibilità tecnica della misura	Si=1; No=0
Adattabilità della misura a futuri cambiamenti del livello di rischio (cambiamenti climatici e di uso del suolo)	
Efficacia rispetto a diversi TYPE of FLOOD	
Misura non strutturale	
Riduzione della probabilità di inondazione	
Scarsa manutenzione richiesta	
TOTALE	
Technical Weight (TW)= 1+ TOTALE	
Total MCA Score = TW*MCA Score	

Di seguito sono riportati i valori di efficacia (Score) di ciascuna misura in relazione agli obiettivi da perseguire (Tabella 3.1), e il grado di fattibilità e sostenibilità tecnica (technical weight) (Tabella 3.2).



**Tabella 3.1 Valutazione dell'efficacia delle misure in relazione agli obiettivi**

Obiettivi	Regolamentazione	Riduzione vulnerabilità	Sorveglianza	Manutenzione	Programmi conoscenza	Gestione naturalistica	Piani laminazione	SUDS	Centro funzionale	Presidio territoriale	Piani di emergenza
Agricolo	0	0	0	3	1	5	5	5	0	0	0
Vita umana	3	3	3	3	1	5	5	5	5	5	5
Immobili	3	3	3	3	1	5	5	5	5	3	5
Vie trasporto	0	3	0	3	1	5	5	5	0	3	0

**Tabella 3.2 Valori di Technical Weight (TW)**

	Regolamentazione	Riduzione vulnerabilità	Sorveglianza	Manutenzione	Programmi conoscenza	Gestione naturalistica	Piani laminazione	SUDS	Centro funzionale	Presidio territoriale	Piani di emergenza
Adattabilità	1		1	1	1				1	1	1
Efficacia rispetto a diversi tipi	1		1	1	1				1	1	1
Misura non strutturale	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
Riduzione probabilità						1	1	1	1	1	1
Scarsa manutenzione	1			1	1	1	1				
Totale	4	1	3	4	4	3	3	1	4	4	4
Technical weight (TW)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	5	2	4	5	5	4	4	2	5	5	5

Alla luce del fatto che il Piano è stato recentemente approvato nella sua prima stesura e che, da allora, pochi interventi sono stati effettivamente attuati, non si ritiene, in questa sede, di intervenire sui punteggi inizialmente attribuiti (che necessiterebbero principalmente di verifiche ex-post in seguito alla valutazione della reale efficacia delle misure di mitigazione) ma si propongono alcune misure integrative per la mitigazione del cambiamento climatico. Le misure si inseriscono negli ambiti già previsti della “regolamentazione” e del “preparazione degli interventi di protezione civile” e potrebbero essere adottate dall’Autorità di Bacino in relazione alla specifica valutazione dell’impatto climatico sui territori.

### 3.2 Proposta di nuove misure per la mitigazione delle piene lampo e dell’impatto del cambiamento climatico

#### 3.2.1 Introduzione del cambiamento climatico nelle valutazioni per la riclassificazione delle aree a pericolosità idraulica

Questa misura non strutturale si inquadra tra le misure di regolamentazione del territorio ed è indirizzata all’integrazione delle Norme Tecniche di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico. In particolar modo si propone di integrare **le verifiche idrauliche necessarie per il giudizio di compatibilità idraulica nel caso di realizzazione di nuove opere, di interventi su opere esistenti, di interventi che modificano il quadro attuale di pericolosità idraulica identificato dal Piano di Assetto Idrogeologico.**

L'analisi proposta nel paragrafo 2.2 individua 4 classi di impatto climatico:

- Livello Modesto (variazione della pioggia indice inferiore a +5%)
- Livello Moderato (variazione compresa tra il +5% ed il +10%)
- Livello Elevato (variazione compresa tra il +10% ed il +20%)
- Livello Molto Elevato (variazione superiore al +20%)

Il trend minimo riscontrato a livello regionale è pari a -8% (registrato nel bacino del Fiume San Leone) ed il massimo pari al +29.7% (registrato nel bacino del Fiume Birgi).

Si propone una misura graduale da applicare ai tratti fluviali (ed ai relativi bacini) in cui l'impatto climatico è stato valutato elevato o molto elevato.

Nelle monografie allegate alla presente relazione, tali tratti fluviali sono stati indicati in arancione e in rosso e, per essi, gli attuali metodi di stima delle portate di piena, basati sul principio di stazionarietà del dato pluviometrico o idrometrico, potrebbero condurre ad una sostanziale sottostima delle portate di piena con un conseguente sottodimensionamento degli interventi di mitigazione.

**Nei bacini con Livello Elevato** di impatto climatico, la misura dovrebbe riguardare i soli interventi nei punti critici (*black spots*) del reticolo idrografico che possono essere soggetti a sovraccarico (attraversamenti, tratti tombati, ecc.). Per tali punti, **sarà necessario effettuare una verifica idraulica aggiuntiva, tenendo conto delle forzanti idrologiche previste dallo scenario di cambiamento climatico a medio termine (2050).**

**Nei bacini con Livello Molto Elevato di impatto climatico si applicano le verifiche ai punti critici del reticolo idrografico** come descritto nei precedenti capoversi e, **ove necessario, le analisi di rivalutazione della pericolosità idraulica dovranno espressamente considerare l'impatto climatico nello scenario di medio termine.**

Tale impatto potrà essere stimato applicando il metodo proposto nel presente studio o altri equivalenti presenti in letteratura, tra cui quelli discussi nei precedenti paragrafi.

In assenza di tali studi di dettaglio, in forma semplificata ma in favore di sicurezza, si potranno utilizzare i seguenti coefficienti amplificativi (derivati dalle massime variazioni riscontrate nel presente studio per ciascuna classe d'impatto):

- **nelle aree con livello molto elevato** di impatto climatico potrà essere applicata **una maggiorazione pari al 30%** delle piogge di massima intensità e fissata durata e tempo di ritorno
- **nelle aree con livello elevato** di impatto climatico potrà essere applicata **una maggiorazione pari al 20%** delle piogge di massima intensità e fissata durata e tempo di ritorno

Come sintesi delle monografie allegate alla presente relazione, la misura è stata proposta in 11 bacini o aree intermedie caratterizzati da impatto molto elevato e in 11 bacini o aree intermedie caratterizzati da impatto elevato (colorati nella seguente figura) sui 39 complessivamente analizzati.

Le singole monografie riportano nel dettaglio le aree di ciascun bacino in cui si applica la misura proposta con la relativa gradazione.

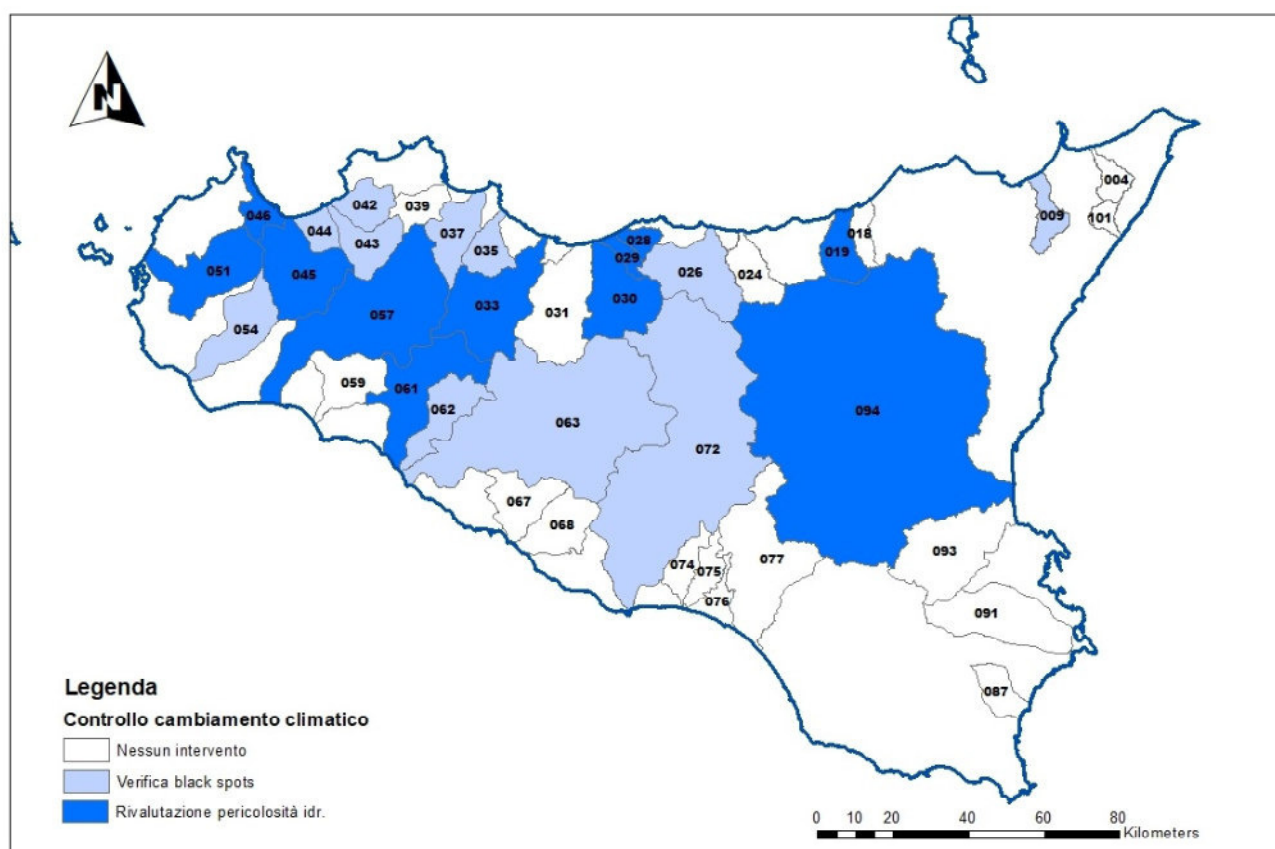


Figura 3.1 Bacini o aree intermedie in cui è proposta l'introduzione dell'obbligatorietà dell'analisi di scenari climatici nelle rivalutazioni di pericolosità idraulica

### 3.2.2 Sistemi di allertamento e segnalazione

Questa misura non strutturale si inquadra tra le misure di preparazione ed allerta ed è finalizzata alla specializzazione dei sistemi di allertamento, segnalazione e gestione dell'emergenza previsti nel piano.

L'ambito di applicazione della misura dovrebbe essere limitato alle aree a maggiore suscettibilità alle piene lampo (parametro pari a 4 nella scala proposta da Brugioni et al., 2010) nello scenario attuale o nello scenario futuro di medio termine (2050), dando maggiore priorità alle aree che raggiungono tale livello già nello scenario attuale.

La misura prevede una serie di interventi da integrare nei piani territoriali di protezione civile indirizzati ai seguenti obiettivi, con la collaborazione degli enti locali:

- Identificazione degli elementi critici del reticolo fluviale naturale o artificiale nel caso di piene improvvise;
- In caso di allerta gialla, l'avvio di procedure di verifica degli elementi critici volte a scongiurare fenomeni di occlusione o intasamento del reticolo idrografico nei punti critici;
- In caso di allerta arancione, l'avvio di procedure di monitoraggio continuo dei punti critici fino alla cessazione delle condizioni di rischio.

- la pianificazione e realizzazione di specifici sistemi di allertamento e di segnalazione del pericolo di piene lampo nelle aree a maggiore suscettibilità.

Come sintesi delle monografie allegate alla presente relazione, la misura è stata proposta in 29 bacini o aree intermedie (colorati nella seguente figura) sui 37 complessivamente analizzati: 17 con priorità alta perché l'intervento è legato allo scenario attuale di analisi e 12 con priorità bassa perché l'intervento è legato allo scenario futuro di medio termine (2050). Ovviamente le singole monografie specificano con maggiore dettaglio le aree in cui tale misura è suggerita e, in 3 soli casi, per bacini di modeste dimensioni, l'intervento è esteso all'intero bacino. I 3 bacini, su detti, sono lo 028 e 029 in uno scenario climatico di medio periodo (priorità bassa) e lo 087 in uno scenario climatico attuale (priorità alta).

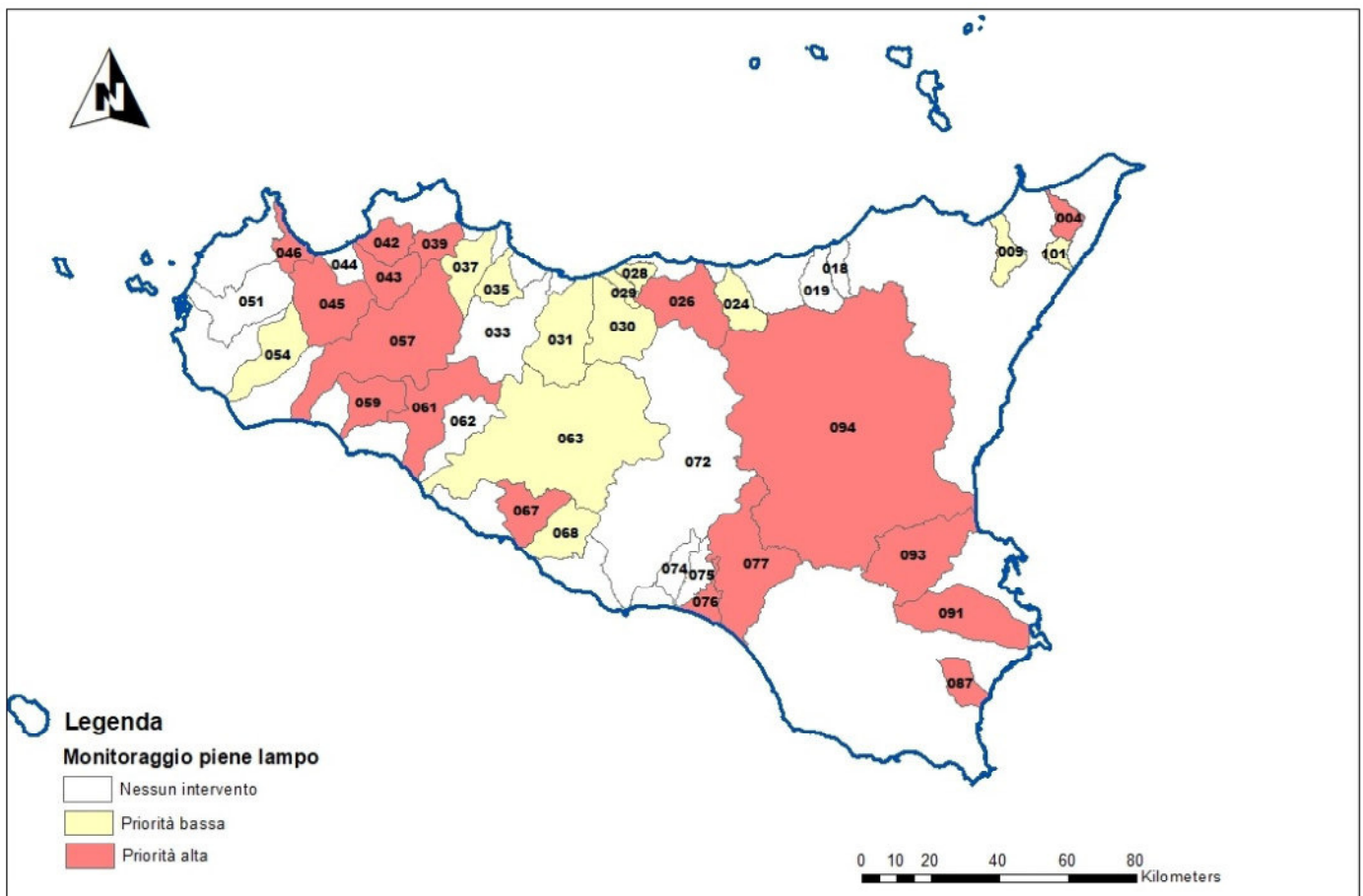


Figura 3.2 Bacini o aree intermedie in cui è proposta la predisposizione di specifici sistemi per il monitoraggio, l'allertamento e la segnalazione di piene lampo

## Bibliografia

- Liuzzo, L., & Freni, G. (2015). Analysis of Extreme Rainfall Trends in Sicily for the Evaluation of Depth-Duration-Frequency Curves in Climate Change Scenarios. *Journal of Hydrologic Engineering*, 04015036(12). doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001230
- Karl, T., Knight, R., & Baker, B. (2000). The record breaking global temperatures of 1997 and 1998: Evidence for an increase in the rate of global warming? *Geophys. Res. Lett.*, 27(5), 719-722.
- Alexander, R., Zhang, X., Peterson, T., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A., . . . Vazquez-Aguirre, J. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, D05109. doi:10.1029/2005JD006290
- Kunkel, K., Karl, T., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J., Arndt, D., . . . Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4), 499-514. doi:10.1175/BAMS-D-11-00262.1
- Iwashima, T., & Yamamoto, R. (1993). A statistical analysis of the extreme events: Long-term trend of heavy daily precipitation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 71(5), 637-640.
- Fujibe, F., Yamazaki, N., Katsuyama, M., & Kobayashi, K. (2005). The increasing trend of intense precipitation in Japan based on four-hourly data for a hundred years. *Sola*, 1, 41-44.
- Wang, Y., & Zhou, L. (2005). Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in largescale circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 32(9), L09707.
- Zolina, O., Simmer, C., Belyaev, K., Kapala, A., & Gulev, S. (2009). Improving estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rain gauges. *J. Hydrometeorol*, 10(3), 701-716.
- Gallant, A., Karoly, D., & Gleason, K. (2014). Consistent trends in a modified climate extremes index in the United States, Europe, and Australia. *J. Clim.*, 27(4), 1379-1394.
- Brunetti, M., Maugeri, M., & Nanni, T. (2000). Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1995. *Theor. Appl. Climatol.*, 65(3-4), 165-174.
- Frei, C., & Schär, C. (2001). Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *J. Clim.*, 14(7), 1568-1584.
- Gregersen, I., Sorup, H., Madsen, H., Rosbjerg, D., Mikkelsen, P., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2013). Assessing future climatic changes of rainfall extremes at small spatio-temporal scales. *Clim. Change*, 118(3-4), 783-797.
- Roth, M., Buishand, T., Jongbloed, G., Klein Tank, A., & Van Zanten, J. (2012). A regional peaks-over-threshold model in a nonstationary climate. *Water Resour. Res.*, 48(11), W11533.



- Gregersen, I., Madsen, H., Rosbjerg, D., & Arnbjerg-Nielsen, K. (2014). Long term variations of extreme rainfall in Denmark and southern Sweden. *Clim. Dyn.*, 44(11-12), 3155-3169. doi:10.1007/s00382-014-2276-4
- Willems, P. (2013). Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations. *J. Hydrol.*, 490, 126-133.
- Bonaccorso, B., Cancelliere, A., & Rossi, G. (2005). Detecting trends of extreme rainfall series in Sicily. *Adv. Geosci.*, 2, 7-11.
- Dessai, S., Hulme, M., Lempert, R., & Pielke, R. (2009). Climate prediction: A limit to adaptation. *Adapting to climate change: Thresholds, values, governance*, 64-78.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2006). Significant climate change of extreme rainfall in Denmark. *Water Sci. Technol.*, 54(6-7), 1-8.
- Burlando, P., & Rosso, R. (1991). Extreme storm rainfall and climatic change. *Atmos. Res.*, 27(1), 169-189.
- Mailhot, A., & Duchesne, S. (2009). Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136(2), 201-208.
- Mann, H. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: J. Econ. Soc.*, 13(3), 245-259.
- Kendall, M. (1962). *Rank correlation methods* (3rd ed.). New York: Hafner Publishing Company.
- Helsel, D., & Hirsch, R. (1992). *Statistical methods in water resources*. Amsterdam: Elsevier.
- Hirsch, R., Slack, J., & Smith, R. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resour. Res.*, 18(1), 107-121.
- Ngongondo, C., Xu, C., Tallaksen, L., Alemaw, B., & Chirwa, T. (2011). Regional frequency analysis of rainfall extremes in southern Malawi using the index rainfall and L-moments approaches. *Stochastic Environ. Res. Risk Assess.*, 25(7), 939-955.
- Fowler, H., & Kilsby, C. (2003). A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *Int. J. Climatol.*, 23(11), 1313-1334.
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation/statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique. *Hydrol. Sci. J.*, 49(4), 575-590. doi:10.1623/hysj.49.4.575.54430
- Gilleland, E., & Katz, R. (2006). Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit. *18th Conf. on Climate Variability and Change, 86th American Meteorological Society (AMS) Annual Meeting*, 29.
- Jenkinson, A. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 81(348), 158-171.
- Hosking, J. (1990). L-Moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *J. R. Stat. Soc.*, 52(2), 105-124.

- Hosking, J., & Wallis, J. (1997). *Regional frequency analysis*. New York: Cambridge University Press.
- Hosking, J., & Wallis, J. (1993). Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resour. Res.*, 29(2), 271-281.
- Burlando, P., & Rosso, R. (1996). Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation. *J. Hydrol.*, 187(1-2), 45-66.
- Ranzi, R., Mariani, M., Rossini, E., Armanelli, B., & Bacchi, B. (1999). Analisi e sintesi delle piogge intense del territorio bresciano. *Technical Rep. No 12*.
- Gupta, V., & Waymire, E. (1990). Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 95(D3), 1999-2009.
- Forestieri, A., Arnone, E., Blenkinsop, S., Candela, A., Fowler, H., & Noto, L. (2018). The impact of climate change on extreme precipitation in Sicily, Italy. *Hydrological Processes*, 32(3), 332-348. doi:10.1002/hyp.11421
- Libertino, A., Ganora, D., & Claps, P. (2019). Evidence for increasing rainfall extremes remains elusive at large spatial scales: The case of Italy. *Geophysical Research Letters*, 46, 7437-7446. doi:10.1029/2019GL083371
- Libertino, A., Ganora, D., & Claps, P. (2018). Technical note: Space-time analysis of rainfall extremes in Italy: Clues from a reconciled dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2705–2715.
- Helsel, D., & Frans, L. (2006). Regional Kendall test for trend. *Environmental Science & Technology*, 40(13), 4066–4073.
- Brugioni, M., Mazzanti, B., & Franceschini, F. (2010). How meaningful is flash flood risk mapping? Cagliari.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R., Parajka, J., Merz, B., . . . Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573, 108-123.
- Boé, J., Terray, L., Habets, F., & Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1643-1655.
- Piani, C., Weedon, G., Best, M., Gomes, S., Viterbo, P., Hagemann, S., & Haerter, J. (2010b). Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395(3), 199-215.
- Brugioni, M., Mazzanti, B., & Franceschini, F. (2010). How meaningful is flash flood risk mapping? Cagliari: Authority, Arno River Basin. WG F Thematic Workshop on Implementation of the Floods Directive 2007/60/EC "FLASH FLOODS AND PLUVIAL FLOODING". Tratto il giorno May 26th-28th, 2010
- Tarquini, S., & Nannipieri, L. (2017). The 10 m-resolution TINITALY DEM as a trans-disciplinary basis for the analysis of the Italian territory: Current trends and new perspectives. *Geomorphology*, 281, 108-115.