



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Valutazione dell'affidabilità delle stime di precipitazione fornite da dataset satellitari per il territorio italiano

**Corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Ambientale e Idraulica**

**XXXVI Ciclo**

**Facoltà di Ingegneria Industriale e Civile**

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale**

PhD Candidate:

**Luca Buonora**

Tutor: **Prof. Fabio Russo**



---

1	Introduzione	7
1.1	Valutazione dell'affidabilità delle stime di precipitazione fornite da dataset satellitari per il contesto di studio	8
1.2	Inquadramento della ricerca proposta	9
1.3	Obiettivi della tesi, conoscenza dello stato dell'arte e impianto metodologico	11
1.4	Innovatività della ricerca	13
1.5	Struttura della tesi	14
	Bibliografia	16
2	Affidabilità dei prodotti satellitari nella stima delle precipitazioni su tutta l'Italia	17
2.1	Introduzione	17
2.2	Caso di studio e datasets	20
2.2.1	Area di studio	20
2.2.2	Dataset delle precipitazioni	21
2.2.3	Rete di pluviometri: il sistema SCIA	22
2.2.4	CMORPH	22
2.2.5	PERSIANN-CCS-CDR	23
2.2.6	IMERG	23
2.2.7	ERA5-Land	23
2.2.8	CHIRPS	23
2.2.9	CERRA-Land	24
2.3	Metodologia	24
2.3.1	Procedura di interpolazione	24
2.3.2	Indicatori di prestazione	25
2.4	Risultati	26
2.4.1	Variabilità delle precipitazioni annuali e mensili	26
2.4.2	Confronto giornaliero	30
2.4.3	Miglior prodotto satellitare a scala di bacini idrografici e province amministrative	34
2.5	Discussione e conclusioni	35

Disponibilità dei dati	36
Bibliografia	37
3 Utilizzo delle stime di precipitazione dei dati satellitari al fine di progettare uno scarico superficiale di una diga in un sito non strumentato	43
3.1 Introduzione	43
3.2 Area di studio e dataset	43
3.3 Metodologia	45
3.4 IDAF (Intensità-Durata-Area-Frequenza) derivati dalla regionalizzazione basata su dati pluviometrici	45
3.5 Osservazioni sul dataset ERA-5 LAND	47
3.6 Risultati	52
3.6.1 La valutazione delle portate e delle dimensioni della paratoia	52
3.7 Discussione e limitazioni	53
3.8 Conclusioni	54
Bibliografia	56
4 Discussione delle analisi svolte e risultati	59
4.1 Conclusioni e raccomandazioni	59
4.2 Discussione	59
4.3 Contesto e Importanza dello Studio	61
4.4 Analisi Approfondita delle Prestazioni dei Prodotti Satellitari, limitazioni e punti di forza	61
4.5 Raccomandazioni	62
4.6 Implicazioni per la Gestione delle Risorse Idriche, Prospettive Future e Sviluppi Tecnologici	62
Appendice 1	
5 Affidabilità dei prodotti di precipitazione basati su satellite per la modellazione idrologica in aree non strumentate	65
5.1 Introduzione	65
5.2 Dataset e Caso di Studio	66
5.3 Metodologia	67
5.4 Risultati	68

---

Bibliografia	70
Appendice 2	
6 Curve IDF corrette (variazioni climatiche): un caso di studio a Roma, Italia	71
6.1 Introduzione	72
6.2 Dataset e Caso di Studio	73
6.3 Metodologia	73
6.4 Risultati e Conclusioni	74
Bibliografia	77
Appendice 3	
7 Test di Diverse Relazioni KE-I per la Valutazione del Rischio di Erosione del Suolo ad Amato (Italia)	79
7.1 Introduzione:	79
7.2 Dataset e Caso di Studio	80
7.3 Metodologia	81
7.4 Risultati e Conclusioni	82
Bibliografia	84
Appendice 4	
8 Valutazione della Sicurezza dei Ponti: Analisi e Criticità delle Linee Guida per la Gestione del Rischio	85
8.1 Introduzione	86
8.2 Classe di Attenzione Idraulica (HAC) basata sulle IG	87
8.3 Risultati e Discussione	88
8.4 Conclusioni	90
8.5 Ringraziamenti	91
Bibliografia	92
Appendice 5	
9 Analisi Preliminare sull'Accuratezza dei Dati per le Misure di Pioggia tramite IoT	93
9.1 Introduzione	93
9.2 Dataset e Caso Studio	95
9.3 Metodologia	96

9.4	Risultati e Conclusioni	96
	Bibliografia	99
	Appendice 6	
10	Influenza della Dimensione del Campione e della Recentità per la Definizione delle Precipitazioni di Progetto	101
10.1	Introduzione	101
10.2	Dataset e Caso Di Studio	102
10.3	Metodologia	103
10.4	Risultati e conclusioni	104
	Bibliografia	106
	Appendice 7	
11	Entropia per Applicazioni Idrologiche: una Revisione	107
11.1	Introduzione	107
11.2	Teoria dell'entropia nelle Applicazioni Idrologiche e Idrauliche	108
11.3	Teoria dell'Entropia per Reti di Monitoraggio	109
	Bibliografia	111

# 1 Introduzione

Nell'ambito dello studio delle precipitazioni, l'integrazione dei dati satellitari e pluviometrici è essenziale per comprendere l'importanza della pioggia e valutarne gli impatti su diversi contesti ambientali e socio-economici.

La pioggia riveste un ruolo fondamentale nell'ecologia e nell'interazione umana con l'ambiente, influenzando significativamente il clima e plasmando i paesaggi naturali. La raccolta di dati precisi e affidabili sulle precipitazioni è essenziale data la loro importanza. Tuttavia, la misurazione delle precipitazioni si confronta con sfide considerevoli a causa della loro elevata variabilità nello spazio e nel tempo.

Storicamente, le precipitazioni sono state monitorate principalmente tramite pluviometri a terra, ma recentemente sono state integrate osservazioni provenienti da radar e satelliti. Nonostante la maggiore fiducia storica nei pluviometri, le reti di monitoraggio basate su di essi si sono ridotte per via dei costi elevati, mentre le stime satellitari offrono una copertura più ampia, sebbene con alcune limitazioni di precisione.

L'uso delle stime satellitari è diventato sempre più diffuso nell'ambito dell'idrologia, consentendo una comprensione più approfondita dei processi idrologici in zone precedentemente non monitorate. Tuttavia, la loro affidabilità e accuratezza in determinate applicazioni idrologiche richiedono ancora una valutazione dettagliata.

Questo studio mira a esaminare fino a che punto le stime satellitari possano sostituire le misurazioni tradizionali a terra in specifiche applicazioni idrologiche. Tre aree principali di interesse includono la gestione degli eventi piovosi intensi, l'ottimizzazione delle reti di monitoraggio e la stima delle precipitazioni per scopi di progettazione idraulica.

I risultati preliminari indicano che l'utilizzo delle stime satellitari può essere vantaggioso in particolari contesti idrologici, ma tale utilità dipende da variabili contestuali e condizioni specifiche. La selezione accurata dei prodotti satellitari in base alle caratteristiche dell'area di studio è essenziale per garantire una migliore comprensione delle precipitazioni. Tuttavia, è importante considerare le potenziali distorsioni, soprattutto in relazione alle aree di analisi, e valutare attentamente l'applicabilità delle stime satellitari in ogni contesto idrologico specifico.

## **1.1 Valutazione dell'affidabilità delle stime di precipitazione fornite da dataset satellitari per il contesto di studio**

Comprendere e analizzare la distribuzione delle precipitazioni è fondamentale nella valutazione delle risorse idriche di un bacino idrografico. Tuttavia, tale comprensione è spesso ostacolata dall'assenza di stazioni pluviometriche o da reti di monitoraggio mal progettate. Per questo motivo, le stime delle precipitazioni satellitari (SPS) offrono dati alternativi alle precipitazioni osservate dalle stazioni meteorologiche al suolo. Grazie alla loro copertura quasi-globale, le SPS sono adatte anche per applicazioni a scala di bacino. In molti bacini, infatti, le stazioni pluviometriche sono assenti o scarsamente disponibili; pertanto, le SPS forniscono dati di pioggia alternativi e complementari rispetto ai classici metodi di interpolazione. A differenza delle registrazioni al suolo (specialmente in Italia), i dataset satellitari sono disponibili gratuitamente online, con risoluzione temporale anche a scala sub-oraria e risoluzione spaziale variabile, dalle più accurate (4 km x 4 km), alle più grossolane (25 km x 25 km).

Nonostante il recente sviluppo di numerosi dataset satellitari di precipitazione, diversi studi hanno evidenziato la necessità di una valutazione delle prestazioni delle SPS prima di un loro utilizzo (Gumindoga, W. 2019). Le stime satellitari di precipitazione possono essere, infatti, distorte a causa della natura degli strumenti e dei metodi con cui si eseguono le misurazioni. Per eseguire tale valutazione, le letture dei pluviometri vengono utilizzate come verità di base e punto di riferimento. Nonostante la necessità di eseguire tali confronti, determinare un metodo universale e affidabile per la valutazione delle informazioni sulle precipitazioni è ancora una sfida aperta. Diversi studi (Bhatti et al., 2016, Habib et al., 2012) hanno, infatti, incentrato la propria analisi sulla valutazione delle prestazioni di un singolo set di dati di precipitazione nella catena modellistica idrologica o confrontando le prestazioni di alcuni dataset di precipitazione nelle simulazioni idrologiche e idrauliche, limitando così la loro analisi a prodotti specifici.

Spesso, i set di dati di precipitazione basati sulla rianalisi non vengono presi in considerazione, oppure i modelli non sono stati ricalibrati per ciascun data-set di precipitazione; quindi, gli attuali confronti tra i prodotti satellitari non corretti con quelli basati in situ sono ad oggi affetti da incertezza ed indeterminazione. Inoltre, è stato esplorato, analizzato e verificato soltanto un numero limitato di prodotti, non chiarendo l'idoneità dei prodotti stessi di precipitazione misurati via satellite a livello globale o di modellistica idrologica su larga scala. Recenti contributi hanno eseguito una valutazione globale completa di più set di dati di precipitazione mediante osservazioni di pluviometri e modellistica idrologica. Tuttavia, queste analisi non hanno esplorato l'intera gamma di prodotti di precipitazione disponibili, la cui offerta negli ultimi anni è notevolmente aumentata e viene eseguita in base a modelli raggruppati o non ha confrontato i risultati delle simulazioni delle analisi idrologiche con valori osservati. D'altra parte, gli studi implementano completamente o in maniera semi distribuita la modellistica idrologica, che

si riferisce solo a un singolo caso studio specifico o su scala subcontinentale, perdendo così l'opportunità di generalizzare i risultati.

Ancor più incerto è l'effetto che la scelta del tipo di data-set ha in diverse applicazioni idrologiche/idrauliche, che vanno dalla progettazione e/o verifica delle opere ingegneristiche idrauliche (Buonora, 2020), alla delimitazione di zone soggette a inondazioni (Maggioni & Massari, 2018), all'identificazione di aree danneggiate, allo sviluppo di mappe di pericolosità, alla valutazione della tendenza all'erosione e alla desertificazione, alla calibrazione e validazione di modelli idraulici e idrologici (Mazzoleni et al., 2019), alla valutazione di eventuali trend negli eventi meteorici estremi.

Nonostante numerosi data-set satellitari siano stati usati in diverse parti del mondo e per diversi scopi, molti autori evidenziano l'impossibilità di determinare in assoluto quale prodotto satellitare sia migliore per una certa applicazione idrologica. Lo stesso prodotto satellitare, infatti, se usato per una stessa applicazione ma in località diverse, ha mostrato performance contrastanti (Gumindoga et al., 2019).

Inoltre, molti studiosi si stanno ancora interrogando su come sfruttare al meglio le informazioni fornite dai data-set satellitari, se da sole o combinate con le misurazioni a terra (Dinku et al., 2014; Woldemeskel et al., 2013).

È evidente come, dato il recente sviluppo di queste fonti di dati, molte domande in campo idrologico e idraulico siano ancora in attesa di risposta.

Lo scopo di questo lavoro di dottorato è di testare diversi prodotti satellitari per capire quale sia il più adatto per descrivere le precipitazioni in Italia e valutare gli effetti nella progettazione usandone diversi.

## **1.2 Inquadramento della ricerca proposta**

A causa della sua complessa orografia e all'influenza di numerosi fattori geografici, la penisola italiana è predisposta allo sviluppo di eventi estremi di precipitazione. Nonostante lo sforzo mostrato dalle autorità nel redigere piani di gestione per contenere gli impatti di tali eventi, questi continuano a provocare ogni anno ingenti danni al territorio e la perdita di vite umane. Per tale motivo, comprendere in quale luogo, con quale intensità e con quale frequenza un evento di precipitazione estrema può verificarsi è cruciale per la salvaguardia dell'ambiente e della società. La procedura standard per l'analisi delle precipitazioni prevede l'applicazione di un approccio probabilistico a partire da osservazioni storiche, generalmente registrate dalla rete pluviometrica. L'Italia può vantare un ruolo di altissimo livello nello sviluppo delle osservazioni meteorologiche (Brunetti et al, 2006) Il Servizio Idrografico Nazionale (SIN) e il Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN) hanno raccolto i dati di precipitazione a diverse scale temporali negli Annali Idrologici dal 1917 ai primi anni 2000. Il D.Lgs 112/1998 ha

smantellato il SIMN, trasferendone i compiti alle 19 regioni amministrative e alle 2 province autonome di Trento e Bolzano. Nonostante l'enorme patrimonio di dati, solamente una piccola parte di essi è attualmente disponibile gratuitamente online. Infatti, ogni servizio idrografico ha adottato le proprie regole per la pubblicazione delle osservazioni pluviometriche e, anche se la legge italiana ha adottato una politica open source per i dati pubblici per usi non commerciali (ai sensi del D.Lgs.82/2005, D.Lgs.36/2006, D.M.10/11/2011, L.221/2012, D.Lgs.179/2012 e L.114/2014), non esiste un'unica banca dati (specialmente dei massimi annuali di pioggia per durata sub-giornaliera). La difficoltà nel reperire osservazioni storiche si riflette anche in letteratura, dove studi a livello locale e regionale sono molto più frequenti rispetto a studi a scala nazionale. Nonostante le problematiche, l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha pubblicato nel 2007 il Sistema Nazionale per l'elaborazione e diffusione di dati climatici (SCIA) (Desiato et al., 2007), nel quale sono raccolti una varietà di variabili meteorologiche registrate dalla fine dell'800 ai giorni d'oggi. Per quanto riguarda i dati pluviometrici all'interno di SCIA sono fornite le serie storiche di pioggia giornaliera di circa 8500 stazioni che operano, o hanno operato, sull'intero territorio italiano. Chiaramente non tutti i pluviometri presenti nel sistema hanno registrato continuamente durante l'intero periodo di osservazione e inoltre negli ultimi anni si è riscontrata una riduzione delle stazioni attive sul territorio. Per questi motivi, le serie storiche in nostro possesso sono spesso incomplete e richiedono l'applicazione di procedure quali l'interpolazione o la regionalizzazione per avere informazioni sulle precipitazioni in tutte quelle aree prive di strumenti. Le informazioni derivate da queste tecniche sono chiaramente affette da errori che dipendono dalla sensibilità dell'interpolazione e dalla densità dei pluviometri utilizzati (Hofstra et al., 2008). Per risolvere le limitazioni della rete di monitoraggio al suolo, negli ultimi decenni le SPS hanno iniziato a prendere piede. Diversamente dalle stazioni a terra, i prodotti satellitari forniscono delle stime di precipitazione a copertura quasi-globale ad alta risoluzione e open source, avendo una governance decentralizzata [Sun et al., 2018]. La maggior parte di essi è stata proposta per fornire dataset completi, affidabili e aggiornati da condividere con la comunità. Nonostante gli aspetti positivi, le SPS sono comunque affette da errori, principalmente dovuti al fatto che si tratta di stime indirette. Per questo motivo, per poter utilizzare questi dataset, risulta opportuno testarne l'affidabilità, in maniera tale da poter comprendere ed eventualmente correggere gli errori. In questo progetto di ricerca, ci si pone l'obiettivo di valutare l'affidabilità di diversi dataset satellitari tra i più utilizzati a scala globale nel descrivere le precipitazioni. A differenza degli studi di letteratura, focalizzati a livello regionale, la disponibilità dell'intera rete di monitoraggio consente, per la prima volta, di poter testare e valutare le performance dei prodotti satellitari su tutta l'Italia.

### 1.3 Obiettivi della tesi, conoscenza dello stato dell'arte e impianto metodologico

L'obiettivo generale di questa tesi di dottorato mira alla valutazione delle performance dei prodotti satellitari e alla gestione degli stessi (in particolare agli aspetti legati ai modelli idrologici), nonché al miglioramento delle prestazioni dei dati satellitari al fine di rendere le missioni satellitari utilizzabili con margini di errori bassi o quasi nulli anche per fini idrologici mediante l'implementazione di una metodologia per la calibrazione e validazione di un nuovo metodo/modello matematico.

Bisogna premettere che le misurazioni delle precipitazioni sono di fondamentale importanza poiché sono il principale input per i modelli idrologici. Le precipitazioni sono infatti una componente fondamentale del ciclo idrologico e sono una variabile cruciale per molte applicazioni quali l'idrologia, le previsioni meteorologiche, la meteorologia e l'agricoltura (Ebert et al., 2007). La pioggia è, al tempo stesso, uno dei parametri meteorologici più difficili da stimare, a causa della sua elevata variabilità spazio-temporale. Deve essere misurata a diverse risoluzioni, a seconda delle applicazioni per cui sono richiesti i dati. Le misurazioni delle precipitazioni possono essere distinte in terrestri e satellitari. Le misurazioni al suolo vengono effettuate principalmente tramite pluviometri e ne sono disponibili molteplici tipologie, le quali differiscono tra loro essenzialmente per la tecnica adottata nella raccolta dei dati e nella risoluzione temporale dei dati registrati. Questo tipo di strumentazione è caratterizzata da limiti quali la carenza di pluviometri, la diminuzione progressiva delle reti di monitoraggio, l'inadeguata copertura a livello mondiale e inoltre le reti di monitoraggio hanno costi di manutenzione elevati. Con lo sviluppo della tecnologia satellitare, e quindi di una copertura globale ad alta risoluzione delle stime di precipitazione, sono stati avviati una serie di studi e campagne di misura sperimentali al fine di migliorare l'accuratezza delle stime delle SPS. Nonostante il recente sviluppo di numerosi dataset satellitari di precipitazione, molti studi indicano come la necessità di una valutazione delle prestazioni delle SPS prima di un loro utilizzo sia di particolare importanza (Gumindoga et al., 2019). Le SPS possono essere infatti distorte a causa della natura degli strumenti e dei metodi con cui si eseguono le misurazioni. Per eseguire tale valutazione, le letture dei pluviometri vengono utilizzate come benchmark. Nonostante la necessità di eseguire tali confronti, determinare un metodo universale e affidabile per la valutazione delle informazioni sulle precipitazioni è ancora una sfida aperta. Diversi studi (Bhatti et al., 2016, Habib et al., 2012) hanno incentrato la propria analisi sulla valutazione delle prestazioni di un singolo dataset di precipitazione nella catena modellistica idrologica o confrontando le prestazioni di alcuni dataset di precipitazione nelle simulazioni idrologiche e idrauliche, limitando così la loro analisi a prodotti specifici. Spesso, i dataset di precipitazione basati sulla rianalisi non vengono presi in considerazione, oppure i modelli non sono stati ricalibrati per ciascun dataset di precipitazione; quindi, gli attuali confronti tra i prodotti satellitari non corretti con quelli basati in situ sono ad oggi affetti da incertezza ed indeterminazione. Inoltre, è

stato analizzato e verificato soltanto un numero limitato di prodotti, non chiarendo l'idoneità dei prodotti stessi di precipitazione misurati via satellite a livello globale o nella modellistica idrologica su larga scala. Recenti contributi hanno eseguito una valutazione completa di più dataset di precipitazione mediante osservazioni di pluviometri e modellazione idrologica. Tuttavia, queste analisi non hanno esplorato l'intera gamma di prodotti di precipitazione disponibili, la cui offerta negli ultimi anni è notevolmente aumentata e viene eseguita in base a modelli raggruppati o non ha confrontato i risultati delle simulazioni delle analisi idrologiche con valori osservati. D'altra parte, gli studi implementano completamente o in maniera semi distribuita la modellistica idrologica, che si riferisce solo a un singolo caso studio specifico o su scala subcontinentale, perdendo così l'opportunità di generalizzare i risultati. Ancor più incerto è l'effetto che la scelta del tipo di dataset ha in diverse applicazioni idrologiche/idrauliche, che vanno dalla progettazione e/o verifica delle opere ingegneristiche idrauliche [Bertini et al., 2020], alla delimitazione di zone soggette a inondazioni (Maggioni&Massari , 2018), all'identificazione di aree danneggiate, allo sviluppo di mappe di pericolosità, alla valutazione della tendenza all'erosione e alla desertificazione, alla calibrazione e validazione di modelli idraulici e idrologici (Mazzoleni et al., 2019), alla valutazione degli eventi meteorici estremi (Moccia et al., 2021). Nonostante numerosi dataset satellitari siano stati usati in diverse parti del mondo e per diversi scopi, molti autori evidenziano l'impossibilità di determinare in assoluto quale prodotto satellitare sia migliore per una certa applicazione idrologica. Lo stesso prodotto satellitare, infatti, se usato per una stessa applicazione ma in località diverse, ha mostrato performance contrastanti (Gumindoga et al., 2019). Inoltre, capire come sfruttare al meglio le informazioni fornite dai dataset satellitari, se da sole o combinate con le misurazioni a terra, è ancora oggetto di studio (Dinku et al., 2014).

È evidente come, dato il recente sviluppo di queste fonti di dati, molte domande in campo idrologico e idraulico siano ancora in attesa di risposta. Fra le recenti applicazioni dei dataset satellitari, di notevole rilievo in campo idrologico è quella nella modellistica afflussi/deflussi. La pioggia è l'input primario per i modelli idrologici e di particolare importanza è la stima della sua variabilità spaziale per i modelli idrologici distribuiti. Normalmente, la distribuzione spaziale delle precipitazioni è stimata applicando diversi metodi di interpolazione per estendere l'informazione puntuale derivata da registrazioni pluviometriche a un'area più estesa. Sebbene le osservazioni pluviometriche siano considerate relativamente accurate e affidabili nel punto in cui si trova la stazione, la densità della rete di pluviometri sul territorio italiano non è generalmente abbastanza elevata da descrivere accuratamente la distribuzione spaziale delle precipitazioni. A questo problema va aggiunto quello dell'influenza del tipo di metodo di interpolazione scelto, che può portare a risultati significativamente diversi (Hofstra et al., 2008). Pertanto, l'osservazione satellitare (OS) può essere considerata un sostituto o un supplemento alle registrazioni delle stazioni di misura. Tuttavia, l'OS potrebbe non essere accurato come la registrazione del pluviometro in un punto designato poiché la stima delle precipitazioni

registrata su ciascuna cella della griglia satellitare è il risultato di una serie di analisi e spesso di una fusione di più stime satellitari, ognuna con un certo grado di incertezza che si propaga fino al prodotto finale (Ebert et al., 2007, Habib et al., 2012, Sapiano&Arkin, 2009). Nonostante questi limiti, alcuni studi hanno dimostrato l'efficienza dell'applicazione dei dati satellitari di pioggia nei modelli idrologici (Mazzoleni et al., 2019). I prodotti di telerilevamento satellitare sembrano essere adatti per le applicazioni in campo idraulico come la progettazione di reti pluviometriche al fine di generare migliori previsioni delle precipitazioni, previsioni e simulazioni del ciclo dell'acqua. Sono stati fatti tentativi per applicare i dati satellitari per ottimizzare e progettare reti di monitoraggio da terra, usando informazioni sull'entropia e sui metodi statistici (Huang et al., 2020). Nonostante la loro limitata disponibilità temporale, che va generalmente dagli anni 80-90 (o 2000 nel caso dei dataset con maggiore risoluzione spazio-temporale), numerosi autori hanno impiegato le stime di precipitazione da remoto per determinare le curve intensità-durata-frequenza in luoghi scarsamente o non strumentati (Marra et al., 2017). In altri casi, le osservazioni da satellite sono state unite a quelle pluviometriche per creare serie osservazioni di pioggia più lunghe (Dinku et al., 2014).

#### **1.4 Innovatività della ricerca**

La componente innovativa della proposta di ricerca risiede nell'uso di diverse fonti di osservazioni pluviometriche, nello specifico, l'utilizzo di differenti prodotti satellitari combinati con le misure a terra dei pluviometri che serviranno come benchmark. Molti degli approcci presenti in letteratura non sempre sono affidabili in quanto si ha la necessità di avere a disposizione dati di precipitazione continui e distribuiti uniformemente nella zona di interesse. A causa dell'elevata burocrazia richiesta dalle varie Regioni per ottenere dati pluviometrici, analisi comparative a livello nazionale tra prodotti satellitari e rete di monitoraggio al suolo non sono disponibili in letteratura. In questo progetto, avendo a disposizione circa 8500 stazioni pluviometriche distribuite più o meno omogeneamente sull'intero territorio italiano, si ha la possibilità di verificare l'affidabilità delle SPS con lo scopo di sfruttarle per applicazioni idrologiche e idrauliche.

L'obiettivo generale del progetto di ricerca mira alla valutazione della bontà dei prodotti satellitari e alla gestione degli stessi (in particolare agli aspetti legati ai modelli idrologici), mediante algoritmi di ottimizzazione, attraverso modelli di decisione multi-obiettivo che consentano di incorporare nel processo decisionale l'incremento della stima e la minimizzazione dell'errore commesso, nonché l'implementazione di software/modelli dedicati alla distribuzione dei campi di pioggia e all'utilizzazione corretta dei dati di interesse. Alla luce delle lacune e delle questioni irrisolte della letteratura attuale esposte nei due precedenti paragrafi, le domande poste alla base della ricerca proposta possono essere riassunte come segue:

- a) Di quanto la stima delle precipitazioni da satellite si discosta da quella registrata dai pluviometri e quali sono le conseguenze in ambito idrologico?

- b) Come può essere utilizzata la rete di monitoraggio al suolo per correggere (alcuni) dataset di precipitazione da satellite e come queste correzioni influenzano le applicazioni idrologiche?
- c) Attraverso i dettagli spaziali ottenuti utilizzando il modello di distribuzione idrologica e i dataset di precipitazione si determina effettivamente un miglioramento?
- d) È possibile individuare il dataset più adatto in funzione dell'applicazione idrologica e/o dell'area in esame?
- e) È possibile realizzare un dataset unico a scala italiana, unendo le stime satellitari con quelle pluviometriche?"

Ad oggi, è possibile rispondere soltanto parzialmente a queste domande. Si cercherà quindi, attraverso un'analisi e risoluzione delle varie problematiche, di sfruttare le varie fonti delle SPS per il raggiungimento di tale obiettivo.

Inoltre, qualora si riuscisse a identificare un metodo standardizzato in funzione delle differenti applicazioni idrologiche, tenendo conto di tutte le variabili (ad esempio il clima, l'altimetria, la vicinanza a corpi idrici, il numero di sensori a terra, ecc.), questo metodo/modello potrebbe rappresentare un primo importante passo verso l'uso esclusivo dei prodotti satellitari per le applicazioni idrologiche/idrauliche sia per i ricercatori scientifici che i progettisti del settore.

## 1.5 Struttura della tesi

Le attività svolte durante il percorso di dottorato si sono articolate in diverse fasi di lavoro, che si riflettono nella struttura della presente tesi.

Nel Capitolo 2 è riportato un approfondimento delle conoscenze di base per l'acquisizione di una corretta metodologia nella ricerca scientifica per identificare i migliori prodotti satellitari, che forniscano contemporaneamente un'accurata stima delle precipitazioni e un'elevata risoluzione spaziale, risolvendo inoltre le problematiche legate ai differenti dataset satellitari. I dati di ciascun prodotto satellitare sono stati confrontati con quelli registrati al suolo e collezionati nel sistema SCIA, che verrà considerato come benchmark nella valutazione delle performance. Nella seconda fase, sempre presente nel capitolo 2, si procederà alla definizione di un metodo di confronto tra i dati stimati dai prodotti satellitari e quelli registrati dalla rete di monitoraggio al suolo. Vista la differente natura delle due tipologie di dati (e.g., satellitari areali e pluviometrici puntuali), una prima indagine riguarderà la scelta della tipologia di confronto. Infatti, in letteratura esistono due tipologie di confronto, definite come "pixel-pixel" e "punto-pixel". Mentre, nella seconda tipologia vengono confrontati i valori di precipitazione così come vengono forniti, nella prima, è necessario operare tecniche di interpolazione del dato puntuale per poi trasformarlo in areale su un grigliato scelto opportunamente. Una volta definita la tipologia di confronto, l'impostazione della procedura di valutazione richiede la

rilevazione di alcuni parametri, prevedendo uno strumento d'indagine per la raccolta e la gestione dell'informazione ricavata. Questa seconda fase comprende pertanto lo studio, l'analisi e la valutazione di strumenti idonei per l'interpretazione dei dati rilevati. In generale, l'obiettivo è stato quello di ottenere un modello approfondito di quantificazione delle differenze tra le due misure.

Nel Capitolo 3, in relazione ai risultati ottenuti nella definizione del miglior prodotto satellitare, è stata eseguita un'applicazione progettuale al fine di testare quanto analizzato. Nella fattispecie, le osservazioni satellitari sono impiegate per derivare curve IDF/IDAF e calcolare i valori massimi di portata di progetto per un piccolo bacino idrografico in Sicilia. Successivamente, si viene confrontata la lunghezza progettuale di uno sfioratore superficiale di una diga esistente ottenuta sia con i dati pluviometrici che del satellite caratterizzato dalle migliori prestazioni ottenute.

Nelle appendici ai capitoli 5-11 vengono riportati studi complementari effettuati durante il percorso di dottorato (pubblicati e in attesa di pubblicazione), riguardanti diversi ambiti idrologici collegati, e non, al tema principale discusso nella presente tesi di dottorato.

## Bibliografia

1. Brunetti, M., Maugeri, M., Monti, F., and Nanni, T.: Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series; *Int. J. Climatol.*, 26, 2006.
2. Desiato, F., Lena, F., and Toreti, A.: SCIA: a system for a better knowledge of the Italian climate; *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, vol. 48, 2007.
3. Hofstra, N., Haylock, M., New, M., Jones, P., and Frei, C.: Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data; *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 113, 2008.
4. Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., and Hsu, K.: A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons; *Reviews of Geophysics*, vol. 56, 2018.
5. Ebert, E. E., Janowiak J. E. and Kidd, C.: *Comparison of Near-Real-Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models*, AMS, 2007.
6. Gumindoga, W., Rientjes, T.H.M., Haile, A.T., Makurira, H., and Reggiani, P.: Performance evaluation of CMORPH satellite precipitation product in the Zambezi Basin, *International Journal of Remote Sensing*, 2019.
7. Bhatti, H.A., Rientjes, T., Haile, A.T., Habib, E., Verhoef, W.: Evaluation of Bias Correction Method for Satellite-Based Rainfall Data, *MDPI*, 2016.
8. Habib, E., ElSaadani, M., and Haile, A. T.: Climatology-Focused Evaluation of CMORPH and TMPA Satellite Rainfall Products over the Nile Basin, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012.
9. Bertini, C., Buonora, L., Ridolfi, E., Russo, F., and Napolitano, F.: On the use of satellite rainfall data to design a dam in an ungauged site, *Water*, 2020.
10. Maggioni&Massari: On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review, *J. hydrol.*, 2018.
11. Mazzoleni, M., Brandimarte, L., and Amaranto, A.: Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. *J. Hydrol.*, 2019.
12. Moccia, B., Papalexiou, S. M., Russo, F., and Napolitano F.: Spatial variability of precipitation extremes over Italy using a fine-resolution gridded product; *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol. 37, 2021.
13. Dinku, T., Hailemariam, K., Maidment, R.: Combined use of satellite estimates and rain gauge observations to generate high-quality historical rainfall time series over Ethiopia, *Int. Jour. Of Climat.*, 2014.
14. Sapiano&Arkin: An Intercomparison and Validation of High-Resolution Satellite Precipitation Estimates with 3-Hourly Gauge Data, *AMS*, 2009.
15. Huang, Y.; Zhao, H.; Jiang, Y.; Lu, X.: A Method for the Optimized Design of a Rain Gauge Network Combined with Satellite Remote Sensing Data, 2020.
16. Marra, F., Morin, E., Peleg, N., Mei, Y., and Anagnostou, E. N.: Intensity-duration-frequency curves from remote sensing rainfall estimates: comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 2017.
17. Buonora, L.: "Studio dei Campi di Poggia da Satellite e da Pluviometri per il Dimensionamento degli Organi di Scarico di una Diga", 2020.

## 2 Affidabilità dei prodotti satellitari nella stima delle precipitazioni su tutta l'Italia

*"Satellite-based products reliability in estimating precipitation over Italy"*

In questo studio valutiamo l'accuratezza di sei prodotti satellitari (ovvero, CERRA-Land, CHIRPS, CMORPH, ERA5-Land, IMERG, PERSIANN-CCS-CDR) nel rilevare le precipitazioni a scale giornaliere, mensili e annuali. Testiamo l'affidabilità dei dataset utilizzando diversi indicatori e indici confrontandoli con le precipitazioni registrate da 5568 pluviometri della rete nazionale italiana (sistema SCIA) durante il periodo di 20 anni compreso tra il 2001 e il 2020.

### 2.1 Introduzione

Le precipitazioni sono il principale motore del ciclo dell'acqua. Rivestono un ruolo cruciale nel comprendere la dinamica climatica della Terra e la disponibilità di acqua, nel pianificare e gestire le risorse idriche, nell'valutare i potenziali cambiamenti climatici e nel prevedere eventi estremi (Kidd 2001; Yilmaz et al. 2005). Sebbene i record storici consentano lo studio di vari aspetti, il monitoraggio delle precipitazioni presenta una sfida non banale a causa della sua significativa variabilità sia nelle dimensioni spaziali che temporali (Koutsoyiannis e Papalexioiu 2016). La principale fonte di dati storici sulle precipitazioni è la rete di monitoraggio a terra, infatti, i pluviometri sono il metodo tradizionale più antico per misurare le precipitazioni, e le loro registrazioni sono considerate la vera misura a scala di punto (Tapiador et al. 2012). Nonostante i pluviometri forniscono una misura diretta delle precipitazioni a livello del suolo, le loro misurazioni presentano alcuni limiti (Strangeways 2006). In primo luogo, i pluviometri forniscono informazioni relative ai punti da trasformare in precipitazioni areali per la modellazione a scala di bacino idrografico, in secondo luogo, errori nell'installazione degli strumenti o problemi meccanici possono influenzare le registrazioni delle precipitazioni. Inoltre, le stazioni dei pluviometri non sono distribuite uniformemente in tutto il mondo: le aree altamente popolate dei paesi sviluppati possono avere una copertura più ampia e densa rispetto alle aree oceaniche e scarsamente popolate (Sun et al. 2018; Bertini et al. 2020). Inoltre, a causa dei costi di manutenzione e dello sforzo amministrativo, la tendenza generale è quella di ridurre il numero di stazioni attive. Infatti, ogni paese gestisce la propria rete di monitoraggio gestendo la raccolta, la conservazione, e la disponibilità dei dati secondo la propria regolamentazione specifica. Ciò ostacola una condivisione completa; pertanto, l'accessibilità dei dati sulle precipitazioni non è sempre scontata. Tutte le problematiche sopra menzionate possono risultare in dati incompleti che richiedono tecniche di interpolazione per derivare informazioni sulle precipitazioni in aree senza misurazioni da pluviometro (Bárdossy et al. 2021). Tuttavia, le informazioni derivate sono spesso influenzate da un bias a causa della sensibilità dell'interpolazione alla densità dei

pluviometri, alla distribuzione locale e alla risoluzione temporale dei dati (Hofstra et al. 2008; Kidd et al. 2017).

Negli ultimi decenni le osservazioni basate su satelliti sono state proposte come soluzioni potenziali per superare le limitazioni della rete di pluviometri. I satelliti dedicati che orbitano intorno alla Terra impiegano tecniche di rilevamento remoto passive o attive per stimare indirettamente le precipitazioni attraverso la radiazione delle nuvole nell'atmosfera. Il vantaggio dei dati satellitari è la copertura quasi globale e, nonostante la loro lunghezza di record relativamente breve, questi dati svolgono un ruolo cruciale nelle valutazioni idrologiche poiché possono catturare eventi di pioggia in aree scarsamente monitorate (Gado et al. 2017; Farizdad et al. 2018; Ombadi et al. 2018). A differenza delle stazioni basate a terra, i prodotti satellitari possono favorire un'osservazione uniforme delle precipitazioni in tutto il mondo, con una governance decentralizzata tra diverse entità pubbliche e private. La maggior parte di essi è stata specificamente proposta per fornire dataset completi, affidabili e aggiornati da condividere con la comunità scientifica. Inoltre, mentre i pluviometri forniscono misurazioni su un intervallo di tempo specifico, i satelliti forniscono stime quasi istantanee (World Meteorological Organization 2018). Tuttavia, i dati satellitari sono intrinsecamente limitati spazialmente, poiché integrano segnali su celle di griglia che possono variare da frazioni di grado a diversi gradi. Questa variabilità può influenzare significativamente l'accuratezza, sollevando quindi interrogativi sulla loro affidabilità, un argomento che rimane ampiamente indagato.

Nonostante queste sfide, le osservazioni satellitari offrono preziose intuizioni. Mentre le reti di pluviometri generalmente mostrano prestazioni superiori in termini di accuratezza, i prodotti satellitari possono essere calibrati utilizzando osservazioni basate a terra per migliorarne l'affidabilità (Chen et al. 2020). Inoltre, la natura quasi in tempo reale dei dati satellitari li rende adatti per applicazioni operative in vari campi (ad es. Scheel et al. 2011; Poméon et al. 2017; Eghdami e Barros 2019; Salman et al. 2019; Cavalcante et al. 2020). Le prestazioni del dataset satellitare possono dipendere dall'area del mondo e pertanto dovrebbero essere testate prima di qualsiasi applicazione (Camici et al. 2018). Diversi studi hanno indagato l'affidabilità di diversi dataset a diverse scale (Hua et al. 2019; Prakash 2019) e la loro idoneità per scopi diversi come, ad esempio, il rilevamento di eventi estremi (Marra et al. 2017; Moccia et al. 2021; Wang et al. 2023), la modellazione del deflusso superficiale (Try et al. 2020; Alfieri et al. 2022), la valutazione della siccità (Aghakouchak e Nakhjiri 2012; Kazemzadeh et al. 2022; Moreno et al. 2022) e l'erosività delle precipitazioni (Padulano et al. 2021). L'utilizzo di dataset globali di precipitazioni satellitari offre un'opportunità promettente per mitigare le limitazioni derivanti dalle misurazioni a terra limitate. Ciò richiede una valutazione rigorosa e una convalida di tali prodotti rispetto ai dati osservati disponibili. Infatti, nonostante indagini approfondite, non è emerso un singolo dataset come il più adatto in tutte le regioni del mondo

(Rajulapati et al. 2020). Pertanto, dovrebbe essere eseguita un'ulteriore valutazione completa per ogni area separatamente.

Molti studi hanno confrontato i dati provenienti da satelliti e pluviometri utilizzando sia metodologie punto-pixel (Zhang et al. 2018; Gumindoga et al. 2019) che pixel-pixel (Lo Conti et al. 2014; Duan et al. 2016; Tang et al. 2020). La prima procedura è preferibile quando è disponibile una rete di pluviometri sparuta, poiché tende a sottostimare le prestazioni dei dataset, a causa dei diversi tipi di misurazione delle precipitazioni (ad esempio, precipitazioni puntuali e areali). La seconda consente il confronto di diversi dataset con la stessa griglia, ottenendo generalmente prestazioni migliori. Tuttavia, quando applicati a reti di pluviometri eterogenee e scarsamente distribuite, i metodi di interpolazione possono produrre dati a griglia che sono altamente incerti e non rappresentativi della variabilità effettivamente osservata delle precipitazioni (Saemian et al. 2021). Infatti, le prestazioni dei prodotti basati su satelliti dipendono strettamente dal dataset di riferimento, dalla sua risoluzione temporale e dal clima e dalla topografia dell'area valutata (Tian e Peters-Lidard 2010; Kidd et al. 2012; Stampoulis e Anagnostou 2012). Per migliorare i prodotti finali delle precipitazioni, vengono spesso eseguite rianalisi che combinano osservazioni a terra con dati provenienti da modelli climatici, dove le incertezze possono derivare dal modello scelto (Gehne et al. 2016). Per superare questi problemi, sono stati proposti prodotti di precipitazione a griglia combinati (ad esempio, il Climate Hazards Center Infrared Precipitation with Station Data, CHIRPS), che consentono anche di indagare medie climatiche ed estremi (Alexander et al. 2006; Funk et al. 2015). Un elenco esaustivo di dataset basati su satelliti può essere trovato in Sun et al. (2018).

Valutare l'affidabilità dei prodotti a griglia comporta sfide legate alle loro griglie. Anche se due prodotti hanno la stessa risoluzione spaziale, espressa in gradi, potrebbero non allinearsi perfettamente, potenzialmente causando problemi di spostamento o rotazione a seconda del loro sistema di riferimento. Questo porta al problema del "re-gridding" o "re-mapping". La procedura di re-gridding può essere eseguita in due modi (Diaconescu et al. 2015): (i) procedura di ultima fase, dove le metriche delle prestazioni vengono valutate sulla griglia originale e poi interpolate sulla griglia di destinazione; e (ii) procedura di prima fase, dove i campi vengono prima interpolati sulla griglia di destinazione, seguiti dalla stima delle metriche. Attualmente, non c'è un consenso sulla procedura più appropriata, ma l'approccio di prima fase è comunemente usato negli studi di inter-comparazione. Ad esempio, Rajulapati et al. (2021) hanno indagato l'influenza della procedura di re-gridding su un prodotto globale di precipitazioni, mettendo in guardia contro il suo uso a causa delle differenze sostanziali osservate, specialmente sui valori estremi, e suggerendo l'interpolazione con la procedura di ultima fase.

Lo scopo del nostro studio è fornire una valutazione ampia della affidabilità di sei diversi prodotti basati su satelliti nella stima delle precipitazioni in Italia. A causa della sua complessa orografia e dell'influenza di numerosi fattori geografici, la penisola italiana è soggetta a eventi di precipitazioni estreme (Libertino et al. 2018) che possono avere impatti catastrofici in termini di perdite di vite umane e danni economici (Moccia et al. 2021). Per questi motivi, comprendere la variabilità delle precipitazioni è cruciale per salvaguardare sia la società che l'ambiente. Anche se l'Italia è stata pioniera nello sviluppo delle osservazioni meteorologiche (Brunetti et al. 2006), solo una piccola parte dei dati storici sulle precipitazioni è attualmente disponibile gratuitamente online, soprattutto con risoluzione temporale sub-giornaliera. La sfida nell'accesso alle osservazioni storiche è evidente nella letteratura, dove gli studi a livello locale e regionale sono più diffusi rispetto a quelli condotti su scala nazionale. Per quanto riguarda i dataset basati su satelliti, solo pochi studi sono stati condotti in Italia. Ad esempio, nel nord Italia, Nikolopoulos et al. (2013) hanno valutato tre prodotti (TRMM 3B42, CMORPH e PERSIANN) per un singolo evento di piena nella regione Friuli-Venezia Giulia, Mei et al. (2014) e Duan et al. (2016) hanno investigato rispettivamente il rendimento di quattro e otto prodotti satellitari sul bacino dell'Adige. Nel sud Italia, Lo Conti et al. (2014) hanno valutato l'affidabilità di sei prodotti di precipitazione satellitare (CMORPH, due prodotti di TMPA e tre prodotti di PERSIANN) in Sicilia, mentre Caroletti et al. (2019) hanno validato il prodotto CHIRPS nella stima delle precipitazioni mensili in Calabria. Come già accennato, la letteratura esistente si concentra sugli studi a scala regionale, pertanto, manca ancora uno studio che valuti le prestazioni dei dataset di precipitazioni da satellite a scala nazionale. A questo scopo, valutiamo il potenziale di sei prodotti di precipitazioni satellitari a griglia nella rilevazione delle precipitazioni su scala giornaliera, mensile e annuale sull'intera penisola. Utilizziamo le precipitazioni giornaliere registrate da 5568 pluviometri in un periodo di tempo che va dal 2001 al 2020 come riferimento (SCIA; Desiato et al. 2007). Questo dataset senza precedenti di osservazioni puntuali consente una valutazione efficace dei prodotti a griglia basati su satelliti in Italia. Il numero di prodotti basati su satelliti e l'estensione dell'area investigata rendono questo studio la valutazione più completa dei prodotti di precipitazione basati su satelliti a scala nazionale italiana.

## **2.2 Caso di studio e datasets**

### **2.2.1 Area di studio**

La penisola italiana è situata nella regione meridionale dell'Europa, circondata dal Mar Mediterraneo. L'Italia, con la sua forma a stivale, ha un'orografia complessa con un'altitudine che varia dal livello del mare delle coste ai 4810 m del Monte Bianco (Figura 2.1.(a)). L'esistenza di diverse regioni climatiche è influenzata da diversi fattori geografici, tra cui la distanza dal mare, le caratteristiche morfologiche dei bacini marini, la presenza di correnti costiere e l'esposizione ai venti dominanti (Fратиanni e Acquaotta 2017). Secondo la classificazione di Köppen-Geiger (KG) (Kottek et al. 2006; Peel et al. 2007), il

clima italiano è principalmente temperato (classe C) con aree fredde e polari (rispettivamente classi D ed E) sugli Appennini e sulle Alpi (Figura 2.1b).

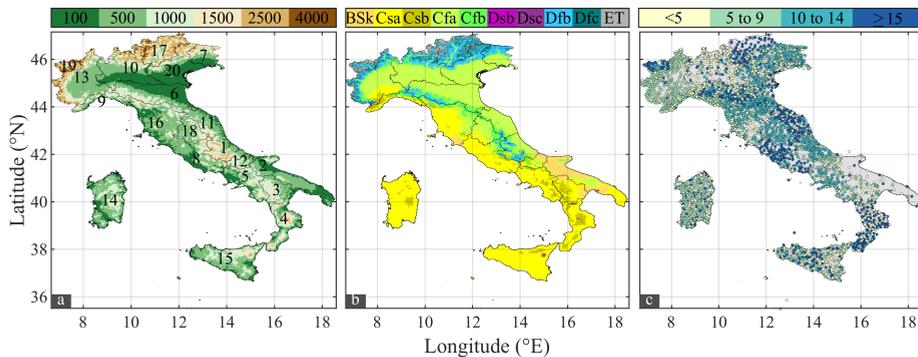


Figura 2.1. (a) Orografia dell'area di studio (la legenda a colori indica l'altitudine massima in metri sul livello del mare per ogni colore) insieme ai riferimenti ID per le 20 regioni italiane amministrative (1. Abruzzo, 2. Puglia, 3. Basilicata, 4. Calabria, 5. Campania, 6. Emilia-Romagna (ER), 7. Friuli Venezia-Giulia (FVG), 8. Lazio, 9. Liguria, 10. Lombardia, 11. Marche, 12. Molise, 13. Piemonte, 14. Sardegna, 15. Sicilia, 16. Toscana, 17. Trentino Alto-Adige (TAA), 18. Umbria, 19. Valle d'Aosta (AV), 20. Veneto); (b) mappa della classificazione climatica di Köppen-Geiger (Beck et al. 2018); (c) posizione dei 5568 pluviometri estratti dal sistema SCIA, il colore dei cerchi associati dipende dalla durata del dataset in anni.

## 2.2.2 Dataset delle precipitazioni

In questo studio, valutiamo le prestazioni di sei dataset satellitari, ossia CERRA-Land, CHIRPS v.02, CMORPH\_V01\_ADJ, ERA5-Land, IMERG.V06-Final e PERSIANN-CCS-CDR, rispetto alle osservazioni interpolate dei pluviometri fornite dal sistema SCIA. Le osservazioni SCIA sono interpolate sulla stessa griglia del prodotto satellitare per un confronto pixel-pixel. Per semplicità, specifichiamo che d'ora in poi ci riferiremo a ciascun prodotto satellitare utilizzando solo il suo nome senza specificare la versione. Secondo Saemian et al. (2021), i prodotti analizzati possono essere classificati in tre categorie principali: Prodotti sulle Precipitazioni Basati sui Pluviometri (GPPs), Prodotti sulle Precipitazioni Basati sui Satelliti (SPPs) e Prodotti sulle Precipitazioni delle Rianalisi (RPPs). In questo lavoro, utilizziamo un dataset GPP come benchmark per il confronto, ossia SCIA, tre SPPs (CMORPH, IMERG, PERSIANN-CCS-CDR) e tre RPPs (ERA5-Land, CHIRPS e CERRA-Land). In particolare, tutte le versioni di SPPs utilizzate in questo lavoro sono combinate e corrette con osservazioni dei pluviometri. Nella Tabella 2.1 elenchiamo tutti i dataset utilizzati in questo studio con le loro principali caratteristiche, mentre nelle sezioni seguenti forniamo le principali caratteristiche di ciascun prodotto.

Tabella 2.1. Riepilogo dei dataset utilizzati in questo studio.

Product	Available period	Spatial resolution	Spatial coverage	Temporal resolution	Category	Reference
SCIA	1860-2022	point	Italy	daily	GPP	Desiato et al. (2007)
CMORPH_V01_ADJ	1998-present	0.08°	60°S–60°N	30 min	SPP	Joyce et al. (2004)
PERSIANN CCS-CDR	1983-02/2021	0.04°	Global	3 hours	SPP	Sadeghi et al. (2021)
IMERG.V06-Final	2001-09/2021	0.1°	Global	30 min	SPP	Huffman et al. (2020)
ERA5-Land	1951-present	0.1°	Global	30 min	RPP	Hersbach et al. (2020)
CHIRPS v.02	1981-present	0.05°	50°S–50°N	daily	RPP	Funk et al. (2015)
CERRA-Land	1985-04/2021	0.055°	Europe	daily	RPP	Verrelle et al. (2022)

### 2.2.3 Rete di pluviometri: il sistema SCIA

SCIA è un sistema nazionale ad accesso aperto, ovvero il Sistema Nazionale per la Raccolta, l'Elaborazione e la Diffusione dei Dati Climatologici che ottimizza l'uso dei dati climatici italiani (Desiato et al., 2007) e è fornito dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Il sistema SCIA raccoglie, elabora e controlla la qualità di diverse variabili meteorologiche a differenti scale temporali (Desiato et al., 2011). In questo studio, utilizziamo serie temporali giornaliere di precipitazioni puntuali raccolte da 5568 pluviometri nel periodo che va dal 2001 al 2020 (Figura 2.1c). Il periodo è determinato dall'intersezione di tutti i dataset esaminati. Nonostante l'omogeneità della rete in diverse regioni, le stazioni sono particolarmente sparse e hanno registrazioni brevi nel sud-est (ad esempio, in Puglia e Basilicata) e in alcune aree del nord (ad esempio, Piemonte e Lombardia). Il numero di sensori attivi può variare negli anni, ad esempio, i 5568 pluviometri raffigurati nella Figura 2.1c sono quelli che registrano almeno 1 anno nel periodo 2001-2020. In diverse regioni, la diminuzione del numero di stazioni negli ultimi anni è principalmente dovuta alla scarsa disponibilità di dati, mentre la ragione delle serie temporali frammentate e brevi sull'intera penisola può essere attribuita al riposizionamento dei pluviometri per motivi di gestione. Riteniamo che testare le prestazioni di dataset alternativi sulle precipitazioni (ad esempio, prodotti basati su satelliti) sia quindi cruciale per superare i principali problemi di una rete di pluviometri sparsa.

### 2.2.4 CMORPH

Il metodo denominato Climate Prediction Center morphing method (CMORPH), sviluppato dal Climate Prediction Center (CPC) dell'agenzia statunitense National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), fornisce stime di precipitazioni globali (Joyce et al., 2004). CMORPH utilizza una tecnica di morfing spaziotemporale che combina dati di precipitazioni provenienti da varie fonti, come satelliti geostazionari e polari, e stazioni meteorologiche terrestri. Questa tecnica combina i punti di forza di ciascuna fonte di dati per fornire una stima migliorata delle precipitazioni globali. In questo studio utilizziamo la versione CMORPH\_V01\_ADJ (Xie et al., 2017) che fornisce

precipitazioni su scala globale (60°S-60°N), coprendo sia continenti che oceani. Le stime di precipitazioni sono fornite su una griglia regolare di 0.09 gradi (approssimativamente 8 km), con risoluzione temporale di 30 minuti dal gennaio 1998 ad aprile 2023 (ultimo download settembre 2023).

### **2.2.5 PERSIANN-CCS-CDR**

Il prodotto Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks - Climate Change Scenario - Climate Data Record (PERSIANN-CCS-CDR) fornisce stime globali delle precipitazioni ad alta risoluzione e a lungo termine (Sadeghi et al., 2021). Utilizza osservazioni satellitari e dati meteorologici per stimare la distribuzione spaziale e temporale delle precipitazioni in tutto il mondo, validate utilizzando osservazioni terrestri. PERSIANN-CCS-CDR offre stime delle precipitazioni con una risoluzione spaziale di 0.04° ( $\approx 4$  km) e una risoluzione temporale di 3 ore. Copre il dominio globale (60°S-60°N) da gennaio 1983 a febbraio 2021 (ultimo download maggio 2023).

### **2.2.6 IMERG**

Il prodotto Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) è uno strumento avanzato per ottenere stime dettagliate delle precipitazioni globali (Huffman et al., 2020). Sviluppato attraverso una collaborazione tra la NASA e l'Agenzia spaziale giapponese (JAXA), questo prodotto utilizza dati provenienti da vari satelliti, inclusi radar e sensori a microonde, per misurare sia le piogge che le nevicate sulla superficie terrestre. Questa fusione di dati multi-sensore consente una migliore comprensione delle caratteristiche delle precipitazioni come intensità, distribuzione spaziale e durata. In questo studio utilizziamo IMERG.V06-Final, che offre una risoluzione spaziale di 0.1° (approssimativamente 10 km), con stime di precipitazioni disponibili ogni 30 minuti da gennaio 2000 a ottobre 2021 (ultimo download maggio 2023).

### **2.2.7 ERA5-Land**

ERA5-Land (Muñoz Sabater, 2019; Hersbach et al., 2020) è un prodotto di rianalisi sviluppato dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF). Si basa su modelli atmosferici che assimilano osservazioni provenienti da varie fonti, tra cui dati satellitari, stazioni meteorologiche e sensori terrestri. ERA5-Land fornisce stime delle precipitazioni su una griglia spaziale di 0.1°, con una risoluzione temporale di 1 ora dal 1950 ai giorni nostri (ultimo download maggio 2023).

### **2.2.8 CHIRPS**

Il prodotto Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) è sviluppato dal Climate Hazards Group presso l'Università della California, Santa Barbara (Funk et al., 2015). Combina immagini satellitari, osservazioni delle stazioni terrestri e altri

dataset climatologici per produrre le sue stime delle precipitazioni. In questo lavoro utilizziamo la versione CHIRPS v.02 che copre quasi l'intero globo (50°S-50°N e tutti i Longitudini) con una risoluzione spaziale di circa 5 km (0.05°). Fornisce dati sulle precipitazioni su scala giornaliera nel periodo che va dal 1981 ai giorni nostri (ultimo download maggio 2023).

### **2.2.9 CERRA-Land**

Copernicus Regional Reanalysis for Europe (CERRA) è un prodotto parte del Copernicus Climate Change Service (C3S) che è una componente del programma Copernicus dell'Unione Europea. CERRA incorpora dati provenienti da una vasta gamma di fonti, tra cui osservazioni di superficie, rilievi di suoni dell'aria superiore, dati satellitari e altre misurazioni meteorologiche. Questi dati vengono assimilati nei modelli di previsione meteorologica numerica per produrre un dataset grigliato che copre un lungo periodo storico. CERRA-Land (Verrelle et al., 2022) è progettato per coprire l'intero continente europeo fornendo precipitazioni giornaliere con risoluzione della griglia di 5.5 km, dal gennaio 1984 ad aprile 2021 (ultimo download maggio 2023).

## **2.3 Metodologia**

In questo lavoro miriamo a testare l'affidabilità di sei prodotti grigliati basati su satelliti nella stima delle precipitazioni su un'area complessa che rimane in gran parte inesplorata in questo senso, ovvero l'Italia. Infatti, a causa delle sfide nel reperire i dati sulle precipitazioni da tutte le agenzie regionali, la maggior parte degli studiosi si è concentrata sull'analisi a livello regionale (Lo Conti et al. 2014; Duan et al. 2016; Caroletti et al. 2019). Con il dataset SCIA, che raccoglie dati sulle precipitazioni da tutte le autorità italiane, miriamo a colmare la mancanza di una valutazione nazionale completa per i prodotti grigliati basati su satelliti comunemente impiegati. In questa sezione delineiamo la procedura impiegata per confrontare le misurazioni delle precipitazioni da SCIA e da ciascun prodotto satellitare, insieme alle metriche utilizzate per la valutazione.

### **2.3.1 Procedura di interpolazione**

Miriamo a effettuare un confronto pixel-per-pixel tra i dati puntuali sulle precipitazioni forniti dalla rete SCIA, considerati come verità, e ciascuno dei sei prodotti grigliati basati su satelliti. Utilizziamo tecniche di interpolazione sulle misurazioni puntuali delle precipitazioni ottenute dai pluviometri per generare sei distinti dataset grigliati sulle precipitazioni (Rajulapati et al. 2021). Ciascuno di questi dataset è adattato per corrispondere alla risoluzione spaziale del prodotto satellitare in fase di valutazione.

In letteratura sono presentate diverse procedure di interpolazione, la selezione della più adatta dipende da fattori come il numero di pluviometri disponibili, la loro risoluzione spazio-temporale e le caratteristiche spaziali dell'evento di pioggia (Bárdossy et al. 2021).

Per questo motivo, l'identificazione di una procedura di interpolazione unica e universalmente accettata da utilizzare in diversi scenari è impegnativa. In questo studio, interpoliamo le precipitazioni giornaliere utilizzando un metodo di interpolazione lineare basato sulla triangolazione di Delaunay bidimensionale, tramite la funzione "griddata" di MATLAB (Watson e Philip 1984; Ringard et al. 2015; Wulf et al. 2016; Huang et al. 2017; Ruan et al. 2017).

Poiché il confronto viene effettuato a risoluzione giornaliera, mensile e annuale, aggregiamo tutti i prodotti grigliati alla stessa risoluzione temporale. Per garantire un confronto equo tra i prodotti satellitari e le serie temporali SCIA, nel processo di aggregazione, se viene identificato un dato giornaliero mancante in una serie temporale, viene corrispondentemente rimosso dall'altra serie. Questo approccio mira a prevenire eventuali distorsioni che potrebbero derivare da dati incompleti in uno qualsiasi dei due dataset. L'analisi comparativa viene condotta su un periodo di osservazione comune di 20 anni (2001-2020).

### 2.3.2 Indicatori di prestazione

Testiamo l'affidabilità dei prodotti satellitari utilizzando diverse metriche di performance il cui equazioni e valori ottimali sono riportati nella Tabella 2.2. Stimiamo le metriche confrontando i valori dei pixel da ciascun dataset satellitare (P) con quelli di SCIA (G) grigliati a una risoluzione spaziale identica. Il coefficiente di correlazione di Pearson  $\rho$  viene utilizzato per misurare la correlazione lineare tra G e P. La BIAS  $\beta$  quantifica la differenza tra G e P in termini dei loro valori medi. Per  $\beta > 1$ , i prodotti satellitari tendono a produrre valori più alti rispetto a quelli osservati dalle stazioni di misurazione, mentre il contrario si applica per  $\beta < 1$ . Il rapporto di variabilità  $\gamma$  è il rapporto tra i due coefficienti di variazione di P e G, rispettivamente, e fornisce una misura della variabilità di un dataset rispetto a un altro.  $\gamma > 1$  indica che il dataset satellitare presenta una maggiore variabilità rispetto al dataset SCIA. Ciò implica che i valori satellitari mostrano deviazioni più grandi rispetto alla media rispetto al dataset delle stazioni di misurazione delle precipitazioni, mentre il contrario è valido per  $\gamma < 1$ . Queste tre metriche precedenti sono esemplificate nell'indice Kling-Gupta Efficiency (KGE), che utilizza il contributo della correlazione, della dispersione e della varianza per valutare l'accordo tra i valori di precipitazione P e G. Per calcolare la magnitudine media dell'errore, utilizziamo la Root Mean Squared Error (RMSE). Infine, valutiamo tre metriche di tabella di contingenza: la probabilità di rilevamento (POD), il rapporto di falsi allarmi (FAR) e l'indice di successo critico (CSI). POD descrive la proporzione di eventi di precipitazione osservati con precisione dal prodotto satellitare; FAR descrive la proporzione di eventi identificati dal satellite che non si sono verificati effettivamente; CSI descrive l'abilità complessiva del prodotto nell'osservare la precipitazione.

Tabella 2.2. Elenco delle metriche statistiche utilizzate per valutare l'affidabilità dei prodotti di precipitazione grigliati. N indica il numero di campioni,  $G_i$  è la precipitazione osservata grigliata dalle stazioni pluviometriche SCIA,  $P_i$  sono le stime di precipitazione dai prodotti satellitari, H è il numero di valori di precipitazioni osservati correttamente rilevati dal satellite, M è il numero di precipitazioni osservate dalle stazioni pluviometriche ma non rilevate dal satellite, F è il numero di valori di precipitazione rilevati dal satellite ma non osservati effettivamente dalle stazioni pluviometriche.

Statistical Metric	Equation	Optimal value
Pearson Correlation Coefficient	$\rho = \frac{\text{cov}(P, G)}{\sigma_P \sigma_G}$	1
BIAS	$\beta = \frac{\mu_P}{\mu_G}$	1
Variability Ratio	$\gamma = \frac{\sigma_P / \mu_P}{\sigma_G / \mu_G}$	1
Kling-Gupta Efficiency	$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$	1
Root Mean Square Error	$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - G_i)^2}{N}}$	0
Probability of Detection	$\text{POD} = \frac{H}{H + M}$	1
False Alarm Ratio	$\text{FAR} = \frac{F}{H + F}$	0
Critical Success Index	$\text{CSI} = \frac{H}{H + M + F}$	1

## 2.4 Risultati

In questa sezione esploriamo le prestazioni dei prodotti satellitari testati a diverse scale di aggregazione temporale, ovvero annuale, mensile (sezione 2.4.1) e giornaliera (sezione 2.4.2). Nella sezione 2.4.3 identifichiamo il miglior prodotto satellitare per i principali e i secondari bacini idrografici così come per tutte le province amministrative italiane.

### 2.4.1 Variabilità delle precipitazioni annuali e mensili

In questa prima sezione caratterizziamo la variabilità delle precipitazioni in Italia a livello annuale e mensile. Nella Figura 2.2 rappresentiamo la media delle precipitazioni annuali (MAR) registrate dalle stazioni pluviometriche SCIA durante il periodo di 20 anni selezionato per il confronto (cioè, 2001-2020). I valori di MAR sono stimati dopo l'interpolazione dei dati puntuali delle precipitazioni su una griglia identica a quella di CHIRPS, caratterizzata quindi da una alta risoluzione spaziale ( $\approx 5$  km). La variabilità spaziale di MAR mostra che i valori più alti (compresi tra 1500 e 3000 mm/anno) si trovano a Nord sulle Alpi e Prealpi, sulle Apuane Liguri e Tosco-Emiliane e in Calabria. Al contrario, le quantità più basse di MAR (inferiori a 700 mm/anno) si trovano lungo la Pianura Padana, la costa adriatica della Puglia, le due isole principali e alcune piccole aree sulla costa tirrenica. In generale, in Italia, la variabilità di MAR è influenzata dall'altitudine (Figura 2.1a) poiché le regioni montuose tendono tipicamente ad accumulare maggiori precipitazioni rispetto alle pianure e alle aree costiere, specialmente quando esposte a masse d'aria umida provenienti dal mare (Fratianni e Acquotta 2017; Moccia et al. 2021). Come menzionato nella sezione 2.2.1, a causa della coesistenza di climi differenti, la variabilità delle precipitazioni nei diversi mesi dipende dall'area specifica. A questo scopo,

nella Figura 2.2, mostriamo anche la precipitazione mensile media per le 8 principali classi KG riconosciute in Italia. Sulle aree aride e temperate (ad esempio, BSk, Csa, Csb, Cfa, Cfb), principalmente situate lungo le coste e le pianure (Figura 2.1b), osserviamo un valore minimo durante l'estate (da giugno ad agosto) e un massimo in autunno e inverno (da settembre a marzo). Alle alte altitudini, la pluviometria ha un comportamento opposto, con un massimo in estate e un minimo in inverno. Nonostante in Italia ci siano altre classi KG, nella Figura 2.2 rappresentiamo solo quelle che rappresentano più del 99% del territorio.

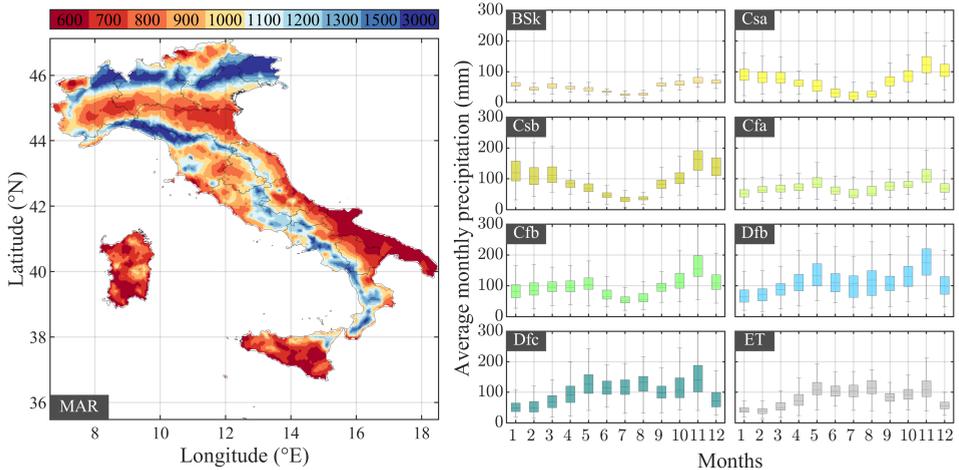


Figura 2.2. Variabilità della media delle precipitazioni annuali (MAR) in Italia e regimi di precipitazione stimati per le classi KG più diffuse (i colori di ciascun boxplot sono coerenti con la classificazione KG rappresentata nella Figura 1b). MAR e precipitazioni medie mensili sono stimati sul dataset SCIA interpolato su una griglia identica a quella di CHIRPS utilizzando le precipitazioni puntuali osservate dal 2001 al 2020.

Successivamente stimiamo la MAR per tutti e sei i prodotti basati su satellite (Figura 2.3). Come previsto, i RPP riproducono bene i modelli di precipitazione sulla penisola italiana, con un coefficiente di correlazione di Pearson ( $\rho$ ) di 0.65, 0.7 e 0.78 per CERRA-Land, CHIRPS e ERA5-Land, rispettivamente. Al contrario,  $\rho$  è costantemente più basso per gli SPP, essendo 0.38 e 0.57, per CMORPH e PERSIANN-CCS-CDR, rispettivamente. L'unica eccezione della categoria SPP è rappresentata da IMERG, con  $\rho=0.69$ . Infatti, i modelli spaziali MAR di IMERG rappresentati nella Figura 3 sono coerenti con quelli osservati per SCIA (Figura 2.2).

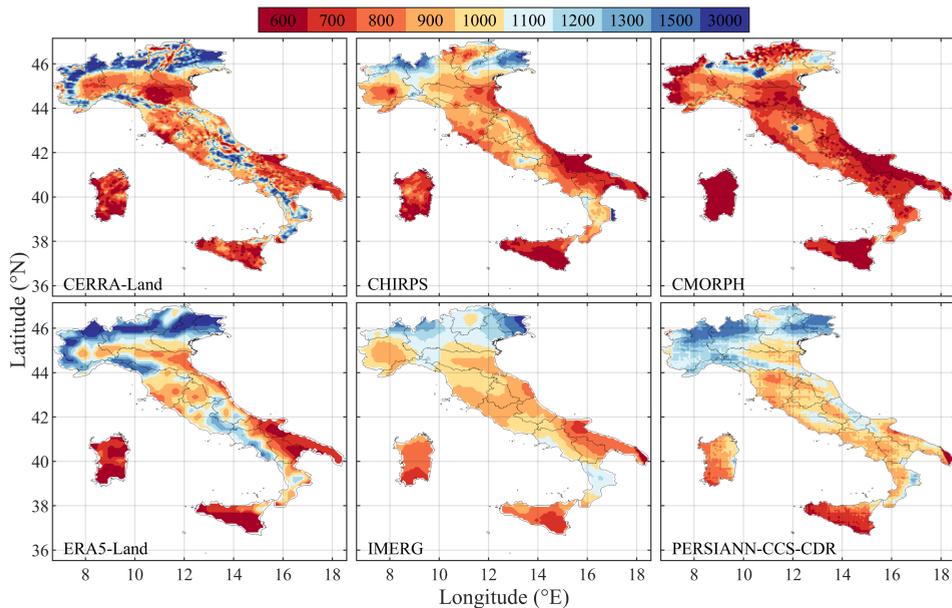


Figura 2.3. Valori MAR valutati per tutti i 6 prodotti basati su satellite.

Per una discussione approfondita, il lettore può fare riferimento alla Figura 2.4, dove mappiamo le differenze in termini di MAR tra ciascun prodotto satellitare e lo SCIA grigliato. In particolare, mostriamo che i prodotti satellitari generalmente sottovalutano il MAR ad alta quota, soprattutto a nord-ovest sugli Appennini Liguri e a nord-est sulle Alpi Carniche e Prealpi, ma anche sulla penisola Sorrentina nel sud (Campania). Tale sottovalutazione può essere dovuta a difficoltà nel rilevare l'evoluzione delle precipitazioni convettive e nel distinguere tra pioggia e neve nelle regioni ad alta quota. Come previsto, il dataset CMORPH mostra una significativa sovrastima delle precipitazioni vicino ai principali laghi italiani (ad esempio, Garda, Maggiore, Como e Trasimeno), principalmente attribuita al fatto che i satelliti a microonde passive (PMW) sono fortemente influenzati dalla topografia, dalla climatologia e dalla vicinanza ai corpi idrici (Tuan e Peters-Lidard 2007; Guo et al. 2017). Il CHIRPS presenta due aree significativamente sovrastimate nel sud in Puglia e Calabria. Il PERSIANN-CCS-CDR tende a sovrastimare i valori MAR su quasi tutto il paese. Queste differenze complessive possono essere ulteriormente investigate osservando i regimi pluviometrici. Nella Figura 2.5 rappresentiamo la precipitazione mensile media stimata da ciascun prodotto basato su satellite e raggruppati nelle 8 classi KG. La sovrastima complessiva del PERSIANN-CCS-CDR si riflette in quantità mensili di precipitazione più elevate in quasi tutte le classi KG, soprattutto nelle aree aride e temperate. Al contrario, il CMORPH presenta sempre valori di precipitazione inferiori soprattutto durante l'inverno e sulle aree più fredde del paese (cioè, classi KG fredde e polari). Questo perché le stime PMW soffrono di contaminazioni da neve e ghiaccio (Tuan e Peters-Lidard 2007; Stampoulis e Anagnostou 2012). CERRA-

Land e ERA5-Land mostrano una maggiore variabilità nei quantitativi di precipitazione estiva lungo le aree fredde e polari. Sulle aree Csb (rappresentate in giallo nel Figura 2.1b), dove quasi tutti i prodotti satellitari sottovalutano il MAR (Figura 2.3), osserviamo un valore mediano inferiore di tutti i prodotti rispetto a quelli ottenuti da SCIA, soprattutto durante i primi 6 mesi dell'anno solare (Figura 2.2).

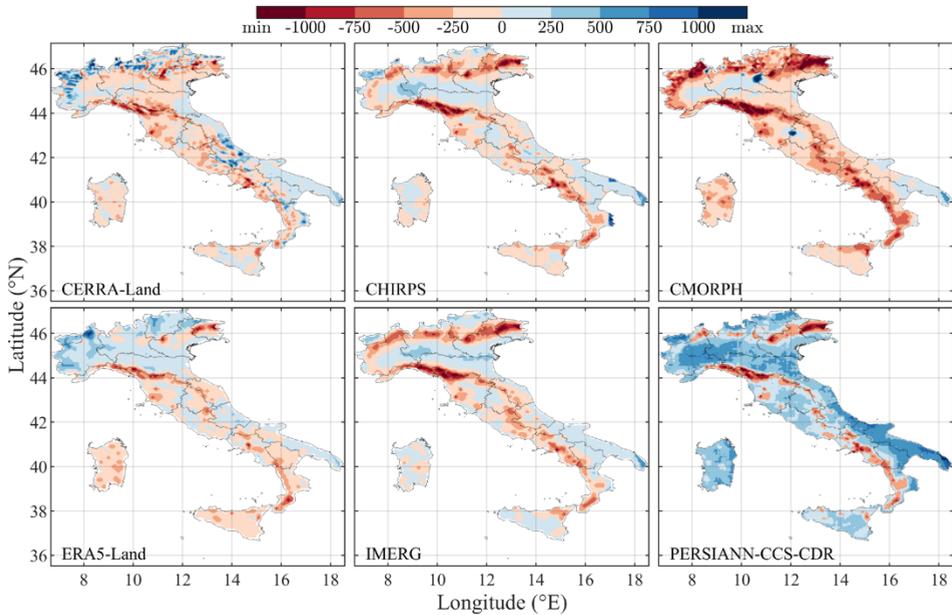


Figura 2.4. Differences between the MAR estimated with each satellite-based product and the relative interpolated SCIA. Positive (negative) values indicate an overestimation (underestimation) of the MAR calculated with the satellite-based products.

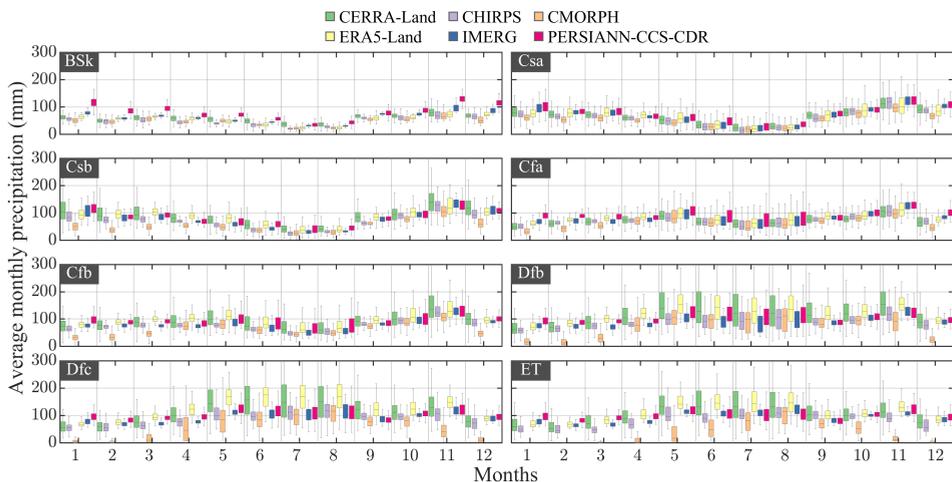


Figura 2.5. Precipitazione media mensile stimata da tutti i prodotti basati su satellite raggruppati nelle 8 principali classi KG.

### 2.4.2 Confronto giornaliero

In questa sezione presentiamo le prestazioni dei sei diversi prodotti basati su satellite confrontati con le osservazioni dei pluviometri fornite da SCIA a livello giornaliero. In particolare, valutiamo le metriche statistiche descritte nella Tabella 2.2 per ciascun dataset. Per scopi di confronto, le osservazioni di SCIA vengono interpolati spazialmente sulla griglia identica al prodotto testato, come discusso nella Sezione 2.3.1. La Tabella 2.3 mostra i valori mediani delle metriche statistiche stimati sull'intero territorio. Su scala nazionale, ERA5-Land supera gli altri prodotti basati su satellite, seguito da CERRA-Land e IMERG, mentre PERSIANN-CCS-CDR e CMORPH presentano i peggiori risultati delle metriche. Le stime giornaliere della precipitazione di ERA5-Land, CERRA-Land e IMERG sono moderatamente correlate con i dati osservati. CERRA-Land ha un bias ottimale, mentre ERA5-Land, IMERG e PERSIANN-CCS-CDR tendono a sovrastimare leggermente la precipitazione giornaliera. Al contrario, CHIRPS e CMORPH riproducono valori inferiori rispetto a SCIA. In termini di  $\gamma$ , CERRA-Land e ERA5-Land presentano una variabilità inferiore rispetto a SCIA, suggerendo che le osservazioni dei pluviometri abbiano una deviazione maggiore rispetto ai valori satellitari. Queste tre metriche statistiche contribuiscono alla stima del KGE, i cui valori riflettono chiaramente le caratteristiche sopra citate. In base alle altre metriche, PERSIANN-CCS-CDR, CHIRPS e CMORPH presentano i valori più alti in termini di RMSE. Questi prodotti basati su satellite hanno anche i valori peggiori delle metriche di contingenza. È interessante notare che, sebbene ERA5-Land superi gli altri prodotti satellitari per la maggior parte delle metriche, osserviamo un valore mediano di FAR più alto rispetto agli altri. Un alto POD e FAR indicano che ERA5-Land identifica efficacemente gli eventi di pioggia, ma genera anche numerosi falsi allarmi classificando erroneamente istanze senza precipitazioni come eventi di pioggia. Ciò si riflette chiaramente nel valore di CSI, dove IMERG ha una migliore performance rispetto a ERA5-Land a causa di un FAR inferiore.

Tabella 2.3. Valori mediani delle metriche statistiche valutate confrontando ciascun prodotto basato su satellite con il corrispondente dataset grigliato di SCIA a scala temporale giornaliera.

Dataset	$\rho$	$\beta$	$\gamma$	KGE	RMSE	POD	FAR	CSI
CMORPH	0.45	0.79	1.32	0.30	7.27	0.36	0.23	0.33
PERSIANN-CCS-CDR	0.29	1.16	1.04	0.23	8.95	0.48	0.31	0.40
IMERG	0.55	1.05	1.01	0.47	6.67	0.77	0.37	0.53
ERA5-Land	0.63	1.06	0.82	0.53	5.52	0.98	0.49	0.51
CHIRPS	0.41	0.92	1.05	0.37	7.31	0.29	0.27	0.26
CERRA-Land	0.55	1.00	0.95	0.48	6.24	0.72	0.43	0.47

La variabilità spaziale dei valori delle metriche mostrate nella Tabella 2.3 è rappresentata nella Figura 2.6 e nella Figura 2.7. Per una visualizzazione completa e un confronto equo, dividiamo le metriche statistiche rappresentate nella Figura 2.6 e nella Figura 2.7 in classi percentile (ad esempio 5°, 25°, 50°, 75° e 95°) stimati considerando tutti i prodotti di precipitazione.

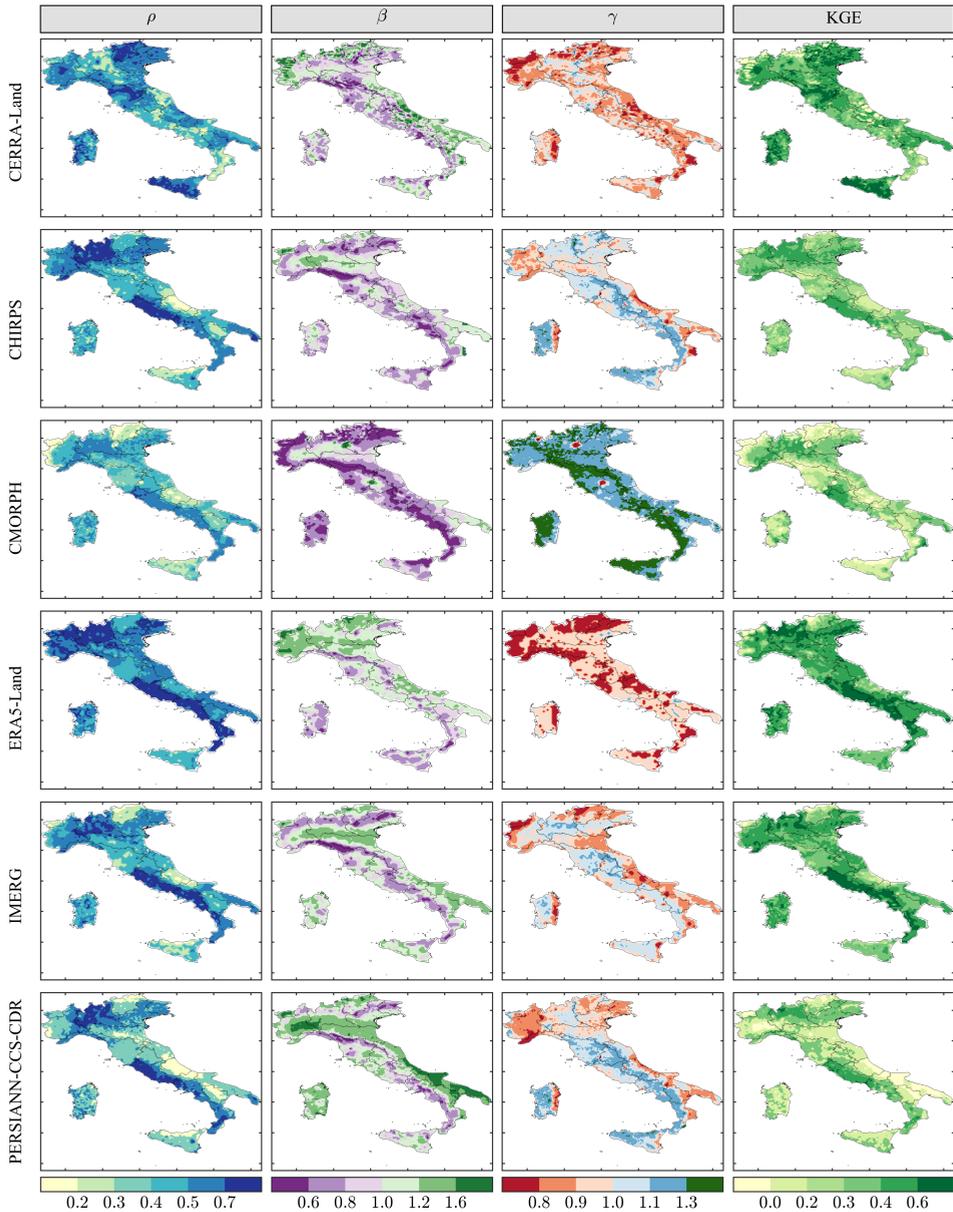


Figura 2.6. Rappresentazione spaziale di  $\rho$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e KGE per tutti i dataset di precipitazione a scala giornaliera. Le metriche statistiche sono calcolate su ciascun pixel. La classificazione dei colori si basa sui percentili 5°, 25°, 50°, 75° e 95° valutati considerando tutti i dataset.

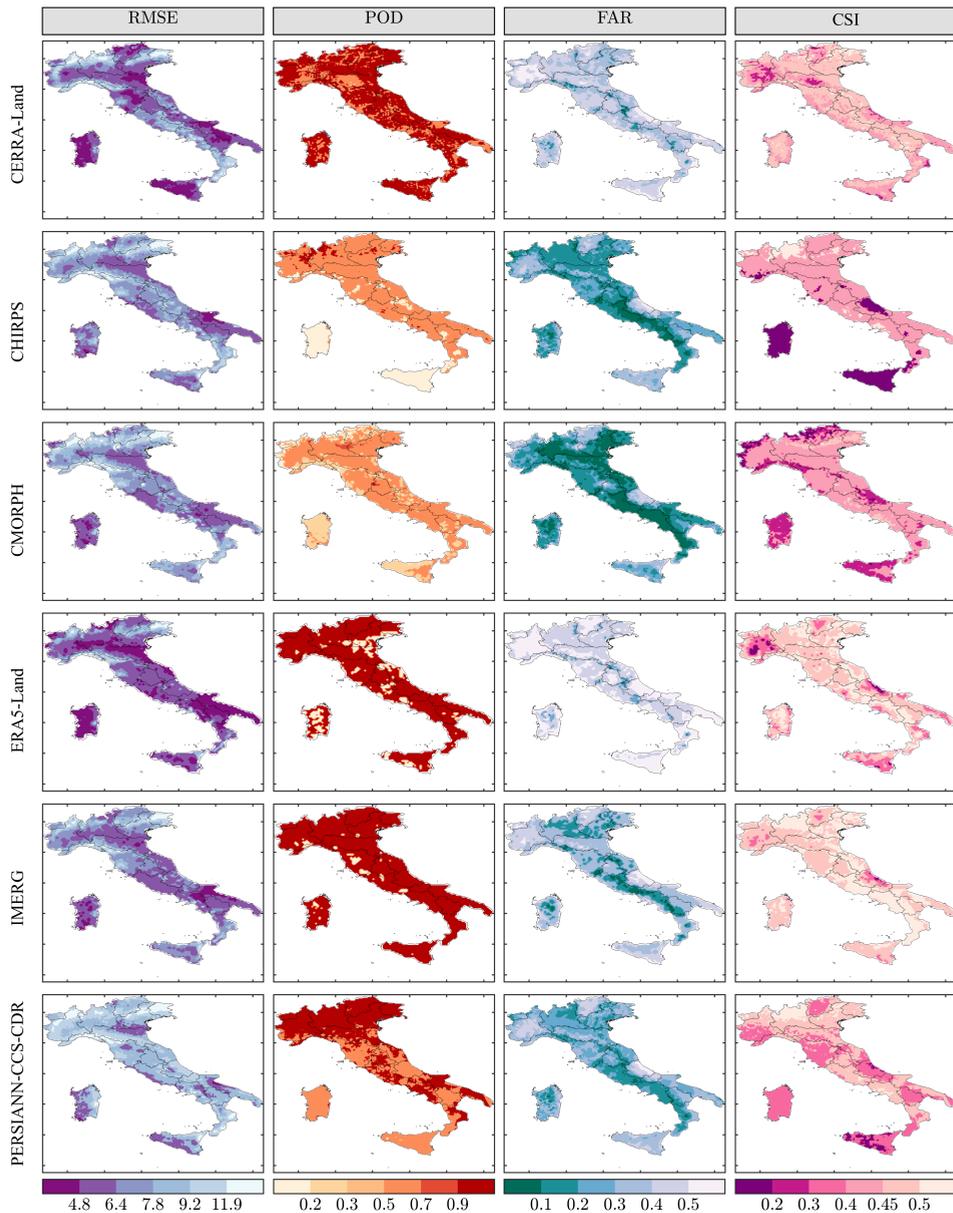


Figura 2.7. Distribuzione spaziale di RMSE, POD, FAR e CSI a scala giornaliera. Le metriche statistiche sono calcolate su ciascun pixel. La classificazione dei colori si basa sui percentili 5°, 25°, 50°, 75° e 95° valutati considerando tutti i dataset, con colori più scuri che indicano prestazioni migliori.

Come discusso in precedenza, i prodotti RPP si comportano meglio dei SPP a risoluzione giornaliera. ERA5-Land e CERRA-Land sono i migliori in considerazione dell'intera scala nazionale, con diverse regioni che presentano  $KGE > 0.7$ . Il peggior risultato a risoluzione giornaliera è del PERSIANN-CCS-CDS, particolarmente lungo la costa sud adriatica e

nella valle del Po. Le prestazioni di tutti e sei i prodotti basati su satellite aumentano quando si analizza la precipitazione mensile. Sono notevoli le buone performance di IMERG.

Poiché il KGE è rappresentativo delle tre caratteristiche rilevanti per valutare le prestazioni dei prodotti basati su satellite, ovvero il coefficiente di correlazione di Pearson, il BIAS e il rapporto di variabilità, nelle Figure 2.8 e 2.9 mostriamo la variabilità del KGE calcolato per ciascun prodotto di precipitazione a scala regionale e per ciascuna regione climatica, rispettivamente.

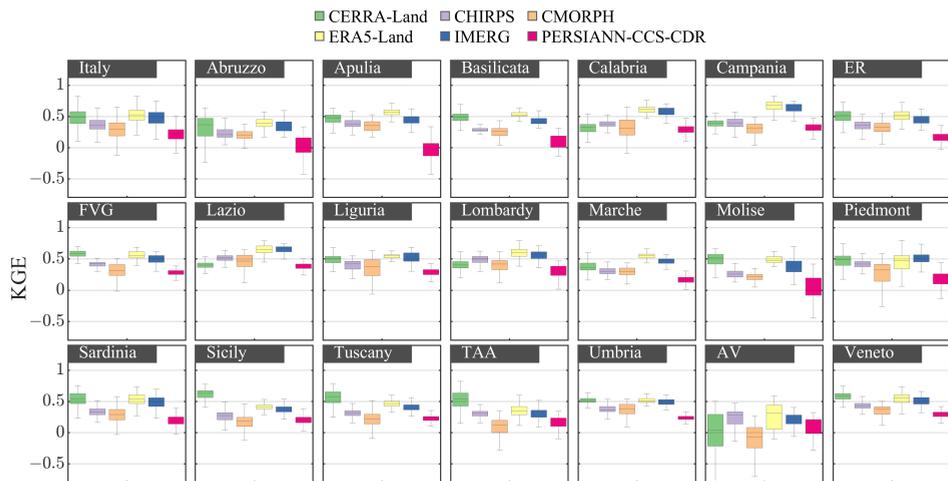


Figura 2.8. Boxplot che mostra il KGE valutato a livello nazionale (pannello Italia) e a scala regionale.

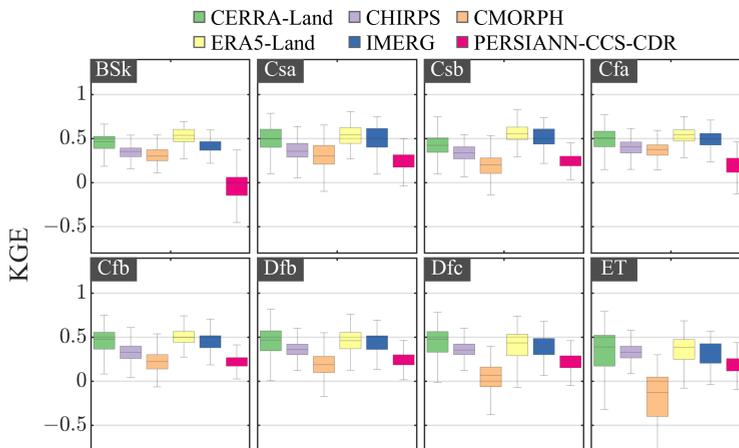


Figura 2.9. Boxplot che mostra il KGE valutato per ciascuna classe Koppen-Geiger.

### 2.4.3 Miglior prodotto satellitare a scala di bacini idrografici e province amministrative

Infine, nella Figura 2.10 rappresentiamo il miglior prodotto satellitare in base al valore di KGE per i bacini principali e secondari e le province amministrative d'Italia. In particolare, abbiamo selezionato il dataset satellitare con il valore di KGE mediano più alto nell'area investigata nel periodo di riferimento. Inoltre, il nostro processo di selezione ha anche considerato la distinzione tra scale mensili e giornaliere. Questo approccio garantisce che ricercatori e ingegneri possano scegliere il prodotto satellitare più adatto in base alla natura specifica del loro studio, che si tratti di analisi degli eventi estremi, valutazione del bilancio idrologico o monitoraggio della siccità. Considerando la variabilità temporale sia a livello mensile che giornaliero, la nostra metodologia consente la pianificazione su misura e facilita l'utilizzo del dataset derivato dai satelliti più appropriato per diverse applicazioni di ricerca idrologica.

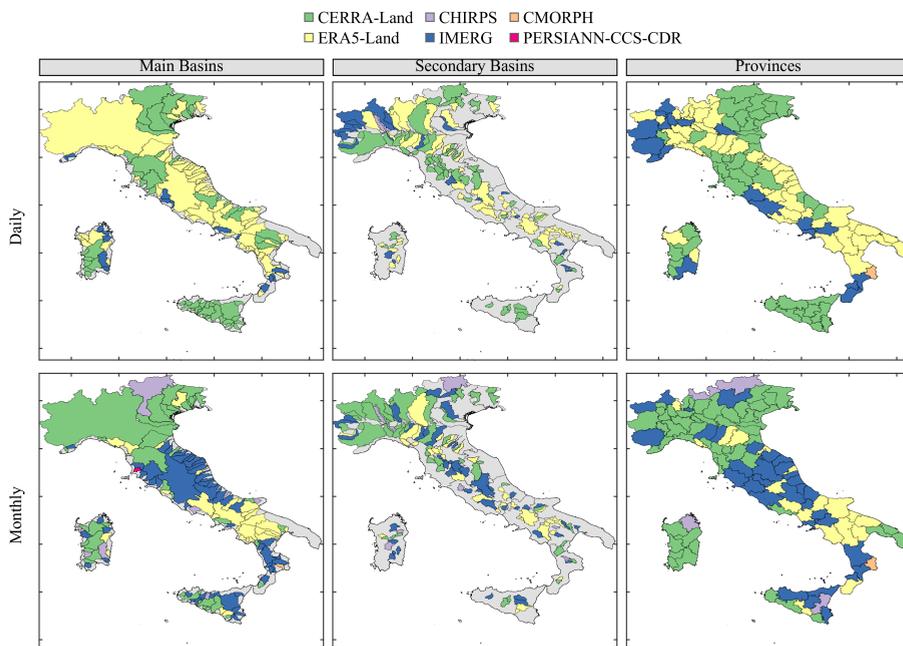


Figura 2.10. Miglior prodotto satellitare per ciascun bacino principale e secondario e province amministrative d'Italia a scala giornaliera e mensile basato sui valori di KGE.

## 2.5 Discussione e conclusioni

Nell'affrontare le limitazioni e i potenziali sviluppi futuri di questo studio meritano considerazione diversi punti chiave. In primo luogo, è importante riconoscere che i dataset giornalieri potrebbero non rappresentare uniformemente tutte le 24 ore del giorno. L'aggregazione dei dati su intervalli temporali più ampi può mitigare questa limitazione in qualche misura, riducendo quindi gli errori associati alla risoluzione temporale. In secondo luogo, il metodo di interpolazione impiegato in questo studio pone sfide, poiché la sua efficacia dipende fortemente dalla densità della rete di pluviometri. È evidente che nelle regioni con densità di pluviometri più bassa, gli errori di interpolazione tendono ad aumentare. Per mitigare questo problema, suggeriamo di considerare l'adozione di dataset grigliati, specialmente in aree dove le informazioni sulle precipitazioni basate a terra sono scarse. I dataset grigliati hanno mostrato risultati promettenti in condizioni territoriali simili e potrebbero servire come alternative valide per mitigare le limitazioni imposte dalle sparse reti di pluviometri. Inoltre, è cruciale considerare la lunghezza dei dati sulle precipitazioni disponibili quando si valuta la performance del prodotto satellitare. Sebbene la nostra analisi si sia concentrata su un periodo comune condiviso da tutti i dataset satellitari, un altro aspetto significativo che influenza la scelta del dataset ottimale riguarda la lunghezza della serie di dati. In particolare, per studi che coinvolgono analisi probabilistiche, come la determinazione degli eventi di pioggia di progettazione, è essenziale riconoscere che serie di dati più lunghe producono stime più robuste. Pertanto, i ricercatori dovrebbero considerare la lunghezza dei record sulle precipitazioni quando selezionano il prodotto satellitare più adatto, garantendo l'affidabilità e l'accuratezza delle valutazioni idrologiche, specialmente in applicazioni che richiedono modellazione probabilistica e analisi di tendenze a lungo termine.

In conclusione, sebbene questo studio abbia fornito preziose intuizioni sulla rilevazione e caratterizzazione degli eventi di pioggia, è essenziale riconoscere le sue limitazioni intrinseche e le aree per miglioramenti futuri. Affrontando questioni legate alla rappresentazione temporale e raffinando i metodi di interpolazione, i ricercatori possono migliorare l'affidabilità e l'accuratezza dei dataset sulle precipitazioni, facilitando quindi analisi e applicazioni più robuste in vari campi, tra cui idrologia, climatologia e scienze ambientali. Inoltre, sostenere l'utilizzo di dataset grigliati in regioni con limitate informazioni sulle precipitazioni basate a terra può contribuire a valutazioni più complete e affidabili dei modelli e delle tendenze delle precipitazioni, migliorando ulteriormente la nostra comprensione del ciclo idrologico terrestre e le sue implicazioni per la società e l'ambiente.

## Disponibilità dei dati

Tutti i dataset utilizzati in questo lavoro sono liberamente disponibili online.

SCIA: [http://www.scia.isprambiente.it/wwwrootscia/Home\\_new.html](http://www.scia.isprambiente.it/wwwrootscia/Home_new.html)

CERRA-Land: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-cerra-land?tab=overview>

CHIRPS: [https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global\\_daily/netcdf/p05/](https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/)

CMORPH: <https://www.ncei.noaa.gov/data/cmorph-high-resolution-global-precipitation-estimates/access/30min/8km/>

ERA5-Land: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

IMERG: [https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM\\_3IMERGDF\\_06/summary?keywords=IMERG%20V06](https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary?keywords=IMERG%20V06)

PERSIANN-CCS-CDR: <https://persiann.eng.uci.edu/CHRSdata/PCCSCDR/daily/>

## Bibliografia

1. Kidd C (2001) Satellite rainfall climatology: A review. *Int J Climatol* 21:1041–1066. <https://doi.org/10.1002/joc.635>
2. Yilmaz KK, Hogue TS, Hsu KL, et al (2005) Intercomparison of rain gauge, radar, and satellite-based precipitation estimates with emphasis on hydrologic forecasting. *J Hydrometeorol* 6:497–517. <https://doi.org/10.1175/JHM431.1>
3. Koutsoyiannis D, Papalexiou SM (2016) Extreme rainfall: Global perspective. In: *Chow's handbook of applied hydrology*. McGraw Hill
4. Tapiador FJ, Turk FJ, Petersen W, et al (2012) Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmos Res* 104–105:70–97. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>
5. Strangeways I (2006) *Precipitation: Theory, measurement and distribution*
6. Sun Q, Miao C, Duan Q, et al (2018) A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Rev Geophys* 56:79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
7. Bertini C, Buonora L, Ridolfi E, et al (2020) On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site. *Water* 12:1–20. <https://doi.org/10.3390/w12113028>
8. Bárdossy A, Modiri E, Anwar F, Pegram G (2021) Gridded daily precipitation data for Iran: A comparison of different methods. *J Hydrol Reg Stud* 38:100958. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100958>
9. Hofstra N, Haylock M, New M, et al (2008) Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. *J Geophys Res Atmos* 113:. <https://doi.org/10.1029/2008JD010100>
10. Kidd C, Becker A, Huffman GJ, et al (2017) So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bull Am Meteorol Soc* 98:69–78. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>
11. Gado TA, Hsu K, Sorooshian S (2017) Rainfall frequency analysis for ungauged sites using satellite precipitation products. *J Hydrol* 554:646–655. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.043>
12. Farizad M, Yang T, Hsu K, et al (2018) Rainfall frequency analysis for ungauged regions using remotely sensed precipitation information. *J Hydrol* 563:123–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.071>
13. Ombadi M, Nguyen P, Sorooshian S, Hsu K-L (2018) Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves From Satellite-Based Precipitation: Methodology and Evaluation. *Water Resour Res* 54:7752–7766. <https://doi.org/10.1029/2018WR022929>
14. World Meteorological Organization (2018) *Guide to Instruments and Methods of Observation. Volume IV: Space-based Observations*
15. Chen J, Li Z, Li L, et al (2020) Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a monsoon-prone region. *Remote Sens* 12:1–33. <https://doi.org/10.3390/rs12213550>
16. Scheel MLM, Rohrer M, Huggel C, et al (2011) Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrol Earth Syst Sci* 15:2649–2663. <https://doi.org/10.5194/hess-15-2649-2011>

17. Poméon T, Jackisch D, Diekkrüger B (2017) Evaluating the performance of remotely sensed and reanalysed precipitation data over West Africa using HBV light. *J Hydrol* 547:222–235. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.055>
18. Eghdami M, Barros AP (2019) Extreme orographic rainfall in the eastern Andes tied to cold air intrusions. *Front Environ Sci* 7:1–18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00101>
19. Salman SA, Shahid S, Ismail T, et al (2019) Selection of gridded precipitation data for Iraq using compromise programming. *Meas J Int Meas Confed* 132:87–98. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.047>
20. Cavalcante RBL, Ferreira DB da S, Pontes PRM, et al (2020) Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. *Atmos Res* 238:104879. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>
21. Camici S, Ciabatta L, Massari C, Brocca L (2018) How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area. *J Hydrol* 563:950–961. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.067>
22. Hua W, Zhou L, Nicholson SE, et al (2019) Assessing reanalysis data for understanding rainfall climatology and variability over Central Equatorial Africa. *Clim Dyn* 53:651–669. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-04604-0>
23. Prakash S (2019) Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India. *J Hydrol* 571:50–59. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.036>
24. Marra F, Morin E, Peleg N, et al (2017) Intensity-duration-frequency curves from remote sensing rainfall estimates: Comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:2389–2404. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2389-2017>
25. Moccia B, Papalexioiu SM, Russo F, Napolitano F (2021) Spatial variability of precipitation extremes over Italy using a fine-resolution gridded product. *J Hydrol Reg Stud* 37:100906. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100906>
26. Wang T, Li Z, Ma Z, et al (2023) Diverging identifications of extreme precipitation events from satellite observations and reanalysis products: A global perspective based on an object-tracking method. *Remote Sens Environ* 288:113490. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113490>
27. Try S, Tanaka S, Tanaka K, et al (2020) Comparison of gridded precipitation datasets for rainfall-runoff and inundation modeling in the Mekong River Basin. *PLoS One* 15:1–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226814>
28. Alfieri L, Avanzi F, Delogu F, et al (2022) High-resolution satellite products improve hydrological modeling in northern Italy. *Hydrol Earth Syst Sci* 26:3921–3939. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3921-2022>
29. Aghakouchak A, Nakhjiri N (2012) A near real-time satellite-based global drought climate data record. *Environ Res Lett* 7:. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044037>
30. Kazemzadeh M, Noori Z, Alipour H, et al (2022) Detecting drought events over Iran during 1983-2017 using satellite and ground-based precipitation observations. *Atmos Res* 269:106052. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106052>

31. Moreno M, Bertolín C, Ortiz P, Ortiz R (2022) Satellite product to map drought and extreme precipitation trend in Andalusia, Spain: A novel method to assess heritage landscapes at risk. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 110:102810. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102810>
32. Padulano R, Rianna G, Santini M (2021) Datasets and approaches for the estimation of rainfall erosivity over Italy: A comprehensive comparison study and a new method. *J Hydrol Reg Stud* 34:100788. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100788>
33. Rajulapati CR, Papalexiou SM, Clark MP, et al (2020) Assessment of extremes in global precipitation products: How reliable are they? *J Hydrometeorol* 21:2855–2873. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0040.1>
34. Zhang C, Chen X, Shao H, et al (2018) Evaluation and intercomparison of high-resolution satellite precipitation estimates-GPM, TRMM, and CMORPH in the Tianshan Mountain Area. *Remote Sens* 10:. <https://doi.org/10.3390/rs10101543>
35. Gumindoga W, Rientjes THM, Haile AT, et al (2019) Performance evaluation of CMORPH satellite precipitation product in the Zambezi Basin. *Int J Remote Sens* 40:7730–7749. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1602791>
36. Lo Conti F, Hsu KL, Noto LV, Sorooshian S (2014) Evaluation and comparison of satellite precipitation estimates with reference to a local area in the Mediterranean Sea. *Atmos Res* 138:189–204. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.11.011>
37. Duan Z, Liu J, Tuo Y, et al (2016) Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Sci Total Environ* 573:1536–1553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.213>
38. Tang G, Clark M, Papalexiou SM, et al (2020) Have satellite precipitation products improved over last two decades? A comprehensive comparison of GPM IMERG with nine satellite and reanalysis datasets. *Remote Sens Environ* 240:111697. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111697>
39. Saemian P, Hosseini-Moghari SM, Fatehi I, et al (2021) Comprehensive evaluation of precipitation datasets over Iran. *J Hydrol* 603:. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127054>
40. Tian Y, Peters-Lidard CD (2010) A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. *Geophys Res Lett* 37
41. Kidd C, Bauer P, Turk J, et al (2012) Intercomparison of high-resolution precipitation products over Northwest Europe. *J Hydrometeorol* 13:67–83. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-042.1>
42. Stampoulis D, Anagnostou EN (2012) Evaluation of global satellite rainfall products over Continental Europe. *J Hydrometeorol* 13:588–603. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-11-086.1>
43. Gehne M, Hamill TM, Kiladis GN, Trenberth KE (2016) Comparison of global precipitation estimates across a range of temporal and spatial scales. *J Clim* 29:7773–7795. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0618.1>
44. Alexander L V., Zhang X, Peterson TC, et al (2006) Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res Atmos* 111:1–22. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>

45. Funk C, Peterson P, Landsfeld M, et al (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2:. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
46. Diaconescu EP, Gachon P, Laprise R (2015) On the remapping procedure of daily precipitation statistics and indices used in regional climate model evaluation. *J Hydrometeorol* 16:2301–2310. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0025.1>
47. Rajulapati CR, Papalexiou SM, Clark MP, Pomeroy JW (2021) The Perils of Regridding: Examples using a Global Precipitation Dataset. *J Appl Meteorol Climatol* 1561–1574. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-20-0259.1>
48. Libertino A, Ganora D, Claps P (2018) Technical note: Space-time analysis of rainfall extremes in Italy: clues from a reconciled dataset. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:2705–2715. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2705-2018>
49. Brunetti M, Maugeri M, Monti F, Nanni T (2006) Temperature and precipitation variability in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *Int J Climatol* 26:345–381. <https://doi.org/10.1002/joc.1251>
50. Nikolopoulos EI, Anagnostou EN, Borga M (2013) Using high-resolution satellite rainfall products to simulate a major flash flood event in northern Italy. *J Hydrometeorol* 14:171–185. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-09.1>
51. Mei Y, Anagnostou EN, Nikolopoulos EI, Borga M (2014) Error analysis of satellite precipitation products in mountainous basins. *J Hydrometeorol* 15:1778–1793. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0194.1>
52. Caroletti GN, Coscarelli R, Caloiero T (2019) Validation of satellite, reanalysis and RCM data of monthly rainfall in Calabria (Southern Italy). *Remote Sens* 11:. <https://doi.org/10.3390/rs11131625>
53. Desiato F, Lena F, Toreti A (2007) SCIA: a system for a better knowledge of the Italian climate. *Boll di Geofis Teor ed Appl* 48:351–358
54. Fratianni S, Acquaforte F (2017) The Climate of Italy. In: *World Geomorphological Landscapes*. pp 29–38
55. Kottke M, Grieser J, Beck C, et al (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 15:259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
56. Peel MC, Finlayson BL, McMahon TA (2007) Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol Earth Syst Sci* 11:1633–1644. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>, 2007
57. Beck HE, Zimmermann NE, McVicar TR, et al (2018) Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci Data* 5:1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
58. Desiato F, Fioravanti G, Frascchetti P, et al (2011) Climate indicators for Italy: calculation and dissemination. *Adv Sci Res* 6:147–150. <https://doi.org/10.5194/asr-6-147-2011>
59. Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA, Xie P (2004) CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeorol* 5:487–503. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004))
60. Xie P, Joyce R, Wu S, et al (2017) Reprocessed, bias-corrected CMORPH global high-resolution precipitation estimates from 1998. *J Hydrometeorol* 18:1617–

1641. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>
61. Huffman G, Bolvin D, Braithwaite D, et al (2020) NASA GPM Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06. Algorithm Theor Basis Doc Version 06 29
  62. Sadeghi M, Nguyen P, Naeini MR, et al (2021) PERSIANN-CCS-CDR, a 3-hourly 0.04° global precipitation climate data record for heavy precipitation studies. *Sci Data* 8:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00940-9>
  63. Muñoz Sabater J (2019) First ERA5-Land dataset to be released this spring. *ECMWF Newsletter* 159, 8–9.
  64. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
  65. Verrelle A, Glinton M, Bazile E, et al (2022) CERRA-Land sub-daily regional reanalysis data for Europe from 1984 to present.
  66. Watson DF, Philip GM (1984) Triangle based interpolation. *J Int Assoc Math Geol* 16:779–795. <https://doi.org/10.1007/BF01036704>
  67. Ringard J, Becker M, Seyler F, Linguet L (2015) Temporal and spatial assessment of four satellite rainfall estimates over French Guiana and north Brazil. *Remote Sens* 7:16441–16459. <https://doi.org/10.3390/rs71215831>
  68. Wulf H, Bookhagen B, Scherler D (2016) Differentiating between rain, snow, and glacier contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling. *Adv Water Resour* 88:152–169. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.004>
  69. Huang H, Winter JM, Osterberg EC, et al (2017) Total and extreme precipitation changes over the Northeastern United States. *J Hydrometeorol* 18:1783–1798. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0195.1>
  70. Ruan W, Milstein AB, Blackwell W, Miller EL (2017) A Probabilistic Analysis of Positional Errors on Satellite Remote Sensing Data Using Scattered Interpolation. *IEEE Geosci Remote Sens Lett* 14:861–865. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2684088>
  71. Tuan Y, Peters-Lidard CD (2007) Systematic anomalies over inland water bodies in satellite-based precipitation. *Geophys Res Lett* 34:. <https://doi.org/10.1029/2007GL030787>
  72. Guo H, Bao A, Ndayisaba F, et al (2017) Systematical Evaluation of Satellite Precipitation Estimates Over Central Asia Using an Improved Error-Component Procedure. *J Geophys Res Atmos* 122:10,906–10,927. <https://doi.org/10.1002/2017JD026877>



### 3 Utilizzo delle stime di precipitazione dei dati satellitari al fine di progettare uno scarico superficiale di una diga in un sito non strumentato

#### 3.1 Introduzione

Questo capitolo segue quanto svolto ed effettuato in un lavoro precedente già pubblicato nell'anno 2020. A partire dai risultati ottenuti nel lavoro dal titolo "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site (Claudia Bertini, Luca Buonora, Elena Ridolfi, Fabio Russo and Francesco Napolitano) è stata effettuata una ulteriore applicazione progettuale con il dataset con le prestazioni migliori determinate nella valutazione dei dataset satellitari presenti nel capitolo 2.

Le osservazioni satellitari sono impiegate per derivare curve IDF/IDAF e calcolare i valori massimi di portata di progetto per un piccolo bacino idrografico in Sicilia, nel sud Italia. Per valutare l'affidabilità della stima, le curve IDAF risultanti e i valori massimi di portata di progetto sono confrontati con quelli ottenuti applicando uno studio di regionalizzazione, cioè il progetto VAPI - Valutazione delle Piene in Italia, di solito utilizzato in Italia nelle aree non misurate o scarsamente monitorate (Cannarozzo et al. 1995).

#### 3.2 Area di studio e dataset

L'area analizzata è il bacino idrografico di Pietrarossa. Quest'ultimo si trova nella parte centro-orientale della Sicilia, la più grande isola d'Italia (Figura 3.1). È situato alla confluenza dei fiumi Acquabianca e Pietrarossa, che si uniscono dopo la diga nel fiume Margherito.

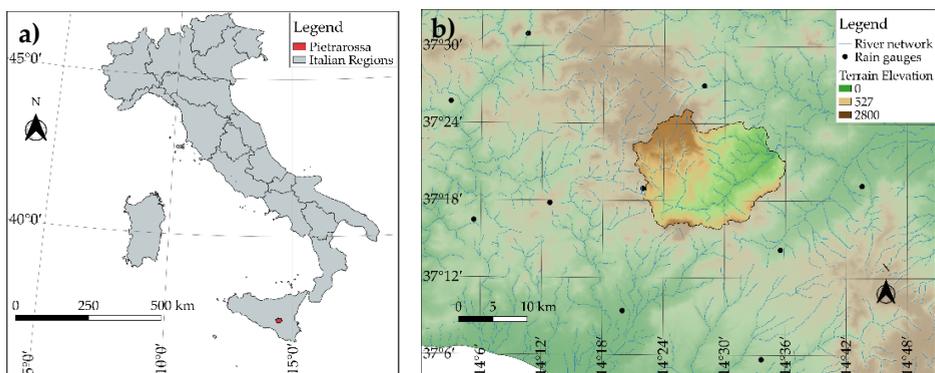


Figure 3.1 – a) Posizione del bacino di Pietrarossa (in rosso) all'interno dell'Italia; b) Mappa dell'altitudine del bacino di Pietrarossa con rete di pluviometri (punti neri). [Fonte figure a) e b) Bertini et al. 2020]

Per l'area di interesse, a partire dai risultati ottenuti al capitolo 2, il dataset con le osservazioni satellitari migliori è risultato il CERRA Land (Figura 2.9. Miglior prodotto satellitare per ciascun bacino principale e secondario e province amministrative d'Italia a scala giornaliera e mensile basato sui valori di KGE).

Nonostante ciò, non è stato possibile testarlo per il presente studio in quanto i dati di precipitazione vengono forniti soltanto a scala giornaliera. Questa condizione non permette di sviluppare le curve IDF necessarie per la definizione delle portate di progetto. Pertanto, il dataset migliore che fornisce dati di precipitazione satellitare a scala sub-oraria è l'ERA5-Land (Munoz Sabater et al., 2019; Hersbach et al., 2020). È un prodotto di rianalisi sviluppato dal Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio Termine (ECMWF) basato su modelli atmosferici che assimilano osservazioni provenienti da varie fonti, tra cui dati satellitari, stazioni meteorologiche e sensori terrestri. ERA5-Land fornisce stime delle precipitazioni su una griglia spaziale di 0.1°. Inoltre, il dataset utilizzato nelle seguenti analisi è caratterizzato da stime di precipitazione fornite a 30 min come già riportato nella Tabella 2.1 al capitolo 2.2.2.

Tab. 3.1 – Dataset utilizzato per il seguente lavoro.

Product	Available period	Spatial resolution	Spatial coverage	Temporal resolution	Category	Reference
ERA5-Land	1951-present	0.1°	Global	30 min	RPP	Hersbach et al. (2020)

La valutazione può essere estremamente utile quando applicata ad aree non monitorate, dove le stime satellitari rappresentano l'unica opportunità per progettare una struttura idraulica, che sia essa una diga o un tombino. Fino ad oggi le stime di precipitazione satellitare sono state impiegate per molte applicazioni idrologiche, come modellare il deflusso superficiale (ad esempio (Mazzoleni et al. 2019), catturare la precipitazione (ad esempio (Lo Conti et al., 2014; Duan et al., 2016) ed eventi di precipitazione intensa (ad esempio (Stampoulis et al., 2013), creare curve IDF (ad esempio (Marra et al., 2017; Ombadi et al., 2018)). Nonostante ciò, ad oggi, non sono mai state impiegate a fini della progettazione di opere idrauliche.

Lo scopo principale di questa ricerca è quantificare le differenze tra le fonti di dati, al fine di verificare se l'uso delle precipitazioni satellitari impiegate per valutare la pioggia di progetto, e quindi la portata di progetto, possa essere un'alternativa valida in aree non monitorate, dove non sono disponibili studi di regionalizzazione. Per quantificare l'effetto dell'uso di diversi set di dati sulle precipitazioni anche da un punto di vista più pratico, i valori di progetto ottenuti in entrambi gli approcci sono impiegati per calcolare le dimensioni dello scarico di superficie della diga situata nell'area di studio.

### 3.3 Metodologia

Nel campo della progettazione idrologica delle dighe, è cruciale determinare le dimensioni dello scarico superficiale in base al picco di piena associato a un periodo di ritorno fisso, spesso fissato a 200 anni, attraverso un'analisi di frequenza delle osservazioni storiche. Tradizionalmente, esistono due approcci principali per stimare questa analisi di frequenza: uno si basa sull'osservazione delle portate dei fiumi e l'altro sugli annali idrologici (Blazkova et al., 2004). Tuttavia, poiché spesso le osservazioni dei flussi dei fiumi non sono disponibili, in questo studio ci siamo concentrati sul secondo approccio, noto come metodo razionale, che prevede due fasi principali. La prima fase consiste nella determinazione della tempesta di progetto per il bacino, utilizzando le curve Intensità-Durata-Area-Frequenza (IDAF) per diverse durate e periodi di ritorno. La seconda fase consiste nella determinazione della portata di picco di progetto associata all'intensità delle piogge critiche utilizzando la formula razionale.

La metodologia adottata può essere riassunta in tre passaggi principali:

- viene valutata l'affidabilità delle osservazioni satellitari confrontandole con quelle ottenute da stazioni di terra mediante diversi indicatori di valutazione sia continui che categorici;
- viene valutata la tempesta di progetto per diversi periodi di ritorno utilizzando le curve Intensità-Durata-Area-Frequenza (IDAF) costruite sia con le osservazioni satellitari che con i parametri forniti da uno studio di regionalizzazione precedentemente condotto, noto come progetto VAPI-Valutazione delle Piene in Italia (Ferrari et al., 1994).
- viene calcolata la portata di progetto per il bacino e vengono determinate le dimensioni dello scarico superficiale.

In questo lavoro, non vengono riportati tutti i passaggi della metodologia, in quanto sono riscontrabili nel paper pubblicato *"On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site"* (Bertini et al., 2020).

Inoltre, la condizione per la quale i dati SIAS a disposizione sono forniti soltanto come massimi annuali a 1h, 3h, 6h, 12h e 24h non permette di calcolare gli indici statistici per i quali è necessario avere i dati alla medesima risoluzione dei dati satellitari.

### 3.4 IDAF (Intensità-Durata-Area-Frequenza) derivati dalla regionalizzazione basata su dati pluviometrici

Le precipitazioni estreme giornaliere e sub-giornaliere sono state studiate in Italia nel progetto VAPI - VALutazione delle Piene in Italia, che applica l'approccio dell'Analisi Regionale della Frequenza (RFA) per produrre un'analisi statistica robusta delle precipitazioni nel paese. Secondo i risultati ottenuti per la Sicilia (Cannarozzo et al., 1995), le precipitazioni estreme nella regione possono essere descritte dalla distribuzione Two

Components Extreme Value (TCEV), per tenere conto sia dei valori usuali che di quelli estremi delle precipitazioni. La procedura di regionalizzazione è gerarchica e si compone di tre diversi livelli per valutare i parametri della distribuzione TCEV. Alla fine di essa, vengono identificate tre aree omogenee nella regione. Il valore della profondità delle precipitazioni  $h(d, T_R)$ , riferito a una durata fissa  $d$  e a un periodo di ritorno  $T_R$ , può essere valutato utilizzando la relazione proposta da Cannarozzo et al. (1) nel progetto VAPI e comunemente utilizzata in Italia (ad esempio [Alfonso et al., 2013; Ferrari et al., 1994; Ferro et al., 1999; Forestieri et al., 2018]):

$$h(d, T_R) = h'(d, T_R) \cdot \mu_R(d) \quad (3.1)$$

Il termine  $h'(d, T_R)$  rappresenta la precipitazione adimensionale della durata  $d$  e del periodo di ritorno  $T_R$ , anche conosciuto come "fattore di crescita", mentre il termine  $\mu_R(d)$  indica la profondità media delle precipitazioni per una durata fissa. È stato dimostrato da Cannarozzo et al. (1) che il fattore di crescita può essere calcolato utilizzando una relazione matematica che varia con la sottoregione omogenea. Gli stessi autori forniscono anche tre relazioni empiriche trovate per ciascuna sottoregione omogenea della Sicilia. Nel nostro caso, l'area di studio appartiene alla sottoregione C e il fattore di crescita è calcolato nel seguente modo:

$$h'(d, T_R) = 0.5015 - 0.003516 d + (0.0003720 d^2 + 0.00102 d + 1.1014) \log T_R \quad (3.2)$$

Ferrari et al. (11) e Cannarozzo et al. (1) hanno mostrato che il fattore  $\mu_R(d)$  dipende solo dalla durata dell'evento di pioggia e propongono la seguente legge di potenza per la sua valutazione:

$$\mu_R(d) = a d^n \quad (3.3)$$

dove i parametri  $a$  e  $n$  sono costanti per ciascuna serie temporale. Il progetto VAPI fornisce i valori di  $a$  e  $n$  per tutte le stazioni impiegate nello studio, insieme a mappe di iso- $a$  e iso- $n$  per derivare i parametri nelle posizioni non monitorate. Per lo studio di caso, i parametri  $a$  e  $n$  sono i valori medi dei parametri  $a$  e  $n$  disponibili per le stazioni circostanti il bacino (Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, 2014).

Dividendo entrambi i termini dell'Eq. 3.1 per la durata dell'evento di pioggia, otteniamo l'espressione delle curve IDF fornita dall'approccio di regionalizzazione:

$$i(d, T_R) = i'(d, T_R) \cdot \mu_R(d) \quad (3.4)$$

I valori dell'intensità delle precipitazioni ottenuti seguendo questa procedura sono un'intensità puntuale; tuttavia, per la progettazione delle strutture idrauliche è necessaria l'intensità della pioggia sul bacino idrografico, fornita dalle curve IDAF. A causa dell'alta variabilità delle caratteristiche delle precipitazioni nello spazio e nel tempo, l'approssimazione della precipitazione su un bacino utilizzando solo una stazione meteorologica, ossia osservazioni puntuali, può comportare limitazioni (Langousis et al., 2013; Mineo et al., 2018; Mineo et al., 2019). L'intensità effettiva della pioggia (o profondità) sul bacino idrografico è solitamente calcolata moltiplicando l'intensità puntuale, fornita dalle curve IDF, per il Fattore di Riduzione Areali (ARF - Areal Reduction Factor). L'ARF è un coefficiente correttivo, compreso tra 0 e 1, definito come il rapporto tra la pioggia media areale e la pioggia puntuale. Molti metodi per calcolare l'ARF sono stati proposti in letteratura, tra cui formulazioni empiriche e approcci basati su osservazioni delle precipitazioni (Svensson et al., 2010). Poiché non sono disponibili studi precedenti sull'ARF per l'area di studio, viene adottata la formulazione empirica proposta da Koutsoyiannis e Xanthopoulos (20). Secondo gli autori, l'ARF dipende solo dalla durata  $d$  dell'evento di tempesta e dall'area  $A$  del bacino, seguendo la regola:

$$ARF(A, d) = 1 - \frac{0.048 \cdot A^{0.36 - 0.01 \ln(A)}}{d^{0.35}} \quad (3.5)$$

dove l'area  $A$  è espressa in  $\text{km}^2$  e la durata  $d$  in ore.

Una volta calcolato l'ARF per l'area del bacino, cioè  $257 \text{ km}^2$ , e per le durate fisse di 1, 3, 6, 12 e 24 ore, le curve IDAF sono costruite moltiplicando le curve IDF ottenute con l'approccio di regionalizzazione (Eq. 3.4) e il fattore ARF, come segue:

$$i(A, d, T_R) = i(d, T_R) \cdot ARF(A, d) \quad (3.6)$$

### 3.5 Osservazioni sul dataset ERA-5 LAND

Le stime delle precipitazioni ERA-5 LAND rappresentano la precipitazione media osservata in ciascuna cella del dominio di  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ . Per questo motivo, le curve IDAF sono sviluppate attraverso l'analisi di frequenza delle profondità di precipitazione medie areali su diverse durate, senza necessità di ulteriori correzioni come nel caso delle osservazioni di precipitazione puntuali. Le serie temporali di precipitazione areale richieste sono valutate con una media ponderata delle stime di precipitazione di tutte le

celle della griglia satellitare che ricadono entro i confini del bacino idrografico. I pesi della media sono i coefficienti di Thiessen (21), espressi come segue:

$$h_A = \sum_{i=1}^N h_i \cdot \lambda_i = \sum_{i=1}^N h_i \cdot \frac{A_i}{A} \quad (3.7)$$

Nell'Eq. 3.7,  $h_A$  è la profondità media di precipitazione areale sul bacino idrografico,  $h_i$  è la profondità di precipitazione per la cella  $i$ -esima nel bacino idrografico,  $A_i$  è l'area di influenza per la cella  $i$ -esima,  $\lambda_i$  è il coefficiente di Thiessen per la cella  $i$ -esima,  $N$  è il numero totale di celle per il bacino idrografico,  $A$  è l'area totale del bacino idrografico, cioè 257 km<sup>2</sup>.

Una volta ottenute le serie temporali di precipitazione areale, viene eseguita l'analisi di frequenza per derivare le curve IDAF. Prima, viene costruita la serie dei massimi annuali (AMS): per ogni anno di osservazioni selezioniamo il valore massimo di profondità di precipitazione ottenuto per le durate fisse di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Successivamente, viene adottato il metodo dei momenti proposto da Pearson (Chow et al., 1988) per adattare il modello statistico al campione. Le precipitazioni estreme in Sicilia sono state precedentemente descritte dalla distribuzione di probabilità a due componenti per i valori estremi (TCEV) (Cannarozzo et al., 1995; Forestieri et al., 2018), tuttavia è ben noto che, poiché la distribuzione TCEV è definita da quattro parametri, sono necessari campioni di dati lunghi per avere una stima robusta (De Luca et al. 2018). Poiché nel caso di studio i campioni hanno 22 osservazioni, abbiamo selezionato come possibili modelli statistici i tipi di distribuzione del valore estremo (EV) I e II, noti anche come distribuzioni Gumbel e Fréchet rispettivamente, come ampiamente suggerito nella letteratura per questo tipo di analisi (ad es., Koutsoyiannis et al., 1998; Shrestha et al., 2017). Per individuare la distribuzione migliore, viene quindi eseguito il test N1 norm. (Papalexiou et al., 2013).

Infine, le curve IDAF vengono derivate per i periodi di ritorno di 20, 50, 100, 500, 1000, 2000 e 3000 anni. Siamo consapevoli che la lunghezza delle osservazioni non è sufficiente per produrre stime statistiche robuste della precipitazione per periodi di ritorno elevati. Tuttavia, l'obiettivo dello studio è riprodurre la situazione delle aree completamente non monitorate, dove studi di regionalizzazione affidabili non sono disponibili o non possono essere sviluppati a causa della mancanza di osservazioni sulla precipitazione (Marra et al., 2017; Marra et al., 2019), e valutare le potenzialità e il valore dei prodotti satellitari, con tutti i loro limiti, in quelle aree.

Le curve IDAF sono costruite utilizzando una versione semplificata della legge di potenza proposta da Bernard e ampiamente utilizzata in idrologia (ad es., Koutsoyiannis et al., 1998; Pagliara et al., 1993):

$$i = b t^{m-1} \quad (3.8)$$

dove  $i$  è l'intensità della precipitazione,  $t$  è la durata dell'evento di pioggia,  $b$  e  $m$  sono i parametri delle curve, che vengono calibrati in base ai dati del campione. Il parametro  $b$  dipende dal periodo di ritorno e dalla distribuzione di probabilità selezionata, mentre  $m$  è lo stesso per tutte le curve e può assumere valori nell'intervallo  $(0,1)$ . Nella costruzione delle curve, ogni campione di massimi annuali viene prima classificato in ordine decrescente, rimuovendo la dipendenza di ciascun dato dall'anno di osservazione. I massimi annuali che, per ciascuna durata, ottengono la stessa classifica condividono la stessa frequenza empirica di non superamento e possono essere modellati dall'Equazione 3.8, fornendo le curve osservate di intensità-durata. Come già accennato, le informazioni relative a ciascuna curva di intensità-durata sono fornite dal parametro  $b$  e, quindi, il processo di inferenza statistica viene eseguito sul campione di parametri  $b$ , seguendo la procedura appena descritta.

Gli intervalli di confidenza vengono derivati per le curve IDAF per considerare l'incertezza legata ai parametri della distribuzione di probabilità utilizzata per adattare il campione, sia Gumbel che Fréchet, a seconda di quale sia il migliore adattamento per il campione. Poiché il processo di inferenza viene eseguito sul campione di coefficienti  $b$ ,  $b$  è considerato come una variabile casuale. La procedura adottata per calcolare i limiti di confidenza può essere riassunta nei seguenti passaggi:

- i parametri della distribuzione di probabilità selezionati sono prima derivati dal campione dei coefficienti  $b$  dell'Equazione 3.8 utilizzando il metodo dei momenti proposto da Pearson (Chow et al., 1988);
- vengono generati complessivamente 1000 campioni di valori di probabilità nell'intervallo  $(0,1)$ . Ciascun campione ha la stessa lunghezza  $n$  del campione originale dei coefficienti  $b$ , cioè uguale al numero di anni di osservazioni disponibili;
- i parametri stimati della distribuzione di probabilità vengono utilizzati per calcolare i quantili, cioè i valori del coefficiente  $b$ , dato i valori di probabilità generati nei 1000 campioni. Al termine di questa fase, si ottengono complessivamente 1000 campioni sintetici di  $b$ ;
- per ciascun campione sintetico, i parametri della distribuzione vengono nuovamente calcolati e utilizzati per calcolare nuovamente i quantili per valori di probabilità dati, che vanno da 0 a 1 con discretizzazione di 0,01. Si ottengono complessivamente 1000 campioni di  $b$ , ognuno con 100 valori (uno per ciascun livello di probabilità selezionato). In questa fase, viene calcolato anche un campione della variabile  $b$  utilizzando i parametri di probabilità calcolati alla fase a) dal campione originale. Per differenziare tra i due set di campioni, i valori

generati sinteticamente dai 1000 campioni di probabilità sono indicati come  $b_{syn}$ , mentre il campione della variabile  $b$  ottenuto utilizzando i parametri di Gumbel calcolati alla fase a) è indicato come  $b_{est}$ ;

- per ciascun percentile, vengono calcolati i limiti di confidenza inferiore ( $b_{low}$ ) e superiore ( $b_{up}$ ) al 95% associati alla stima della variabile casuale  $b$  con quanto segue:

$$\begin{cases} b_{low} = b_{est} - T_{n-1} \cdot \frac{\sigma(b_{syn})}{\sqrt{n}} \\ b_{up} = b_{est} + T_{n-1} \cdot \frac{\sigma(b_{syn})}{\sqrt{n}} \end{cases} \quad (3.9)$$

dove  $T(n-1)$  è il valore t-student di una distribuzione di Student a due code con livello di confidenza del 95% e  $n-1$  gradi di libertà, con  $n$  che rappresenta la lunghezza del campione originale di  $b$ , cioè il numero di anni di osservazioni, e  $\sigma(b_{syn})$  è la deviazione standard dei campioni  $b_{syn}$ . Il limite di confidenza è calcolato per ciascun percentile, quindi, ad esempio, per il 10° percentile,  $b_{low}$  è calcolato considerando il 10° percentile di  $b_{est}$  e la deviazione standard dei 1000 valori di  $b_{syn}$ , ognuno corrispondente al 10° percentile del campione a cui appartiene.

La valutazione delle portate di picco e le dimensioni dello scarico superficiale vengono effettuate utilizzando il modello razionale, un modello idrologico ampiamente utilizzato in piccoli bacini idrografici e non monitorati, grazie alla sua semplicità (Efstratiadis et al., 2014; Asare-Kyei et al., 2015). Secondo il metodo, la portata di progetto dell'inondazione  $Q_p$  può essere valutata utilizzando l'equazione della formula razionale. L'intensità della pioggia viene calcolata applicando le equazioni 3.6 e 3.8 per  $t = t_c$ , ovvero considerando una durata dell'evento pari al tempo di concentrazione del bacino, al fine di massimizzare il valore della portata di picco  $Q_p$ . Il tempo di concentrazione di un bacino può essere definito come il tempo necessario affinché una goccia arrivi dal punto più idraulicamente distante del bacino alla sezione di deflusso (McCuen et al., 2009; Giandotti, 1934). Molti autori nella letteratura hanno proposto formulazioni empiriche per valutare il tempo di concentrazione di un bacino (ad esempio (Giandotti, 1934; Kirpich, 1940; NRCS, 2017)). A causa delle caratteristiche dello studio di caso, viene adottata la formulazione proposta da Giandotti, sviluppata utilizzando bacini italiani con estensione compresa tra 170 e 70000 km<sup>2</sup> (NRCS, 2017) e quindi adatta al caso.

Il calcolo viene ripetuto variando i valori di intensità della pioggia, secondo i periodi di ritorno considerati. Il coefficiente di deflusso rappresenta la percentuale di pioggia che viene convertita in deflusso nel bacino, ovvero la pioggia in eccesso. È influenzato da molti fattori (ad esempio, uso del suolo, copertura del suolo, condizioni di umidità antecedenti, periodo di ritorno, ecc.) ed è il principale limite del metodo (Asare-Kyei et al., 2015; Young

et al., 2009; Grimaldi et al., 2015), a causa della sua difficile stima. Poiché lo scopo principale di questo studio è mostrare le incertezze nella valutazione della portata di progetto e delle dimensioni delle scariche superficiali dovute alla pioggia considerata in ingresso, e poiché lo stesso coefficiente di deflusso viene applicato a tutti i dati di precipitazione, l'influenza del coefficiente di deflusso sul valore di picco della portata può essere considerata trascurabile. Per questo motivo, abbiamo adottato il valore  $C=0.7$  come suggerito in uno studio precedente condotto nel bacino (De Benedetti, 1985). I valori di portata sono calcolati, utilizzando sia l'intensità della pioggia derivata da ERA-5 LAND che dalle curve IDAF del progetto VAPI. Per quantificare le differenze tra i due casi, viene calcolato l'Errore Medio di Bias tra i picchi derivati da satellite e quelli derivati da VAPI. Per distinguerlo da quello valutato per la pioggia, l'errore medio di bias associato al picco di portata sarà ora indicato come  $MBE_Q$ . Viene calcolato nel seguente modo:

$$MBE_Q = \frac{Q_P^C(d, T_R) - Q_P^V(d, T_R)}{Q_P^C(d, T_R)} \cdot 100 \quad (3.10)$$

dove  $Q_P^C(d, T_R)$  è il picco di portata calcolato per una specifica durata  $d$  e periodo di ritorno  $T_R$  utilizzando l'intensità della pioggia basata su ERA-5 LAND e  $Q_P^V(d, T_R)$  è la stessa quantità valutata utilizzando l'approccio di regionalizzazione.

Una scarica superficiale a canale aperto, posizionata lateralmente e con profilo Creager-Scimemi, rilascia acqua per evitare l'esondazione della diga. La progettazione della scarica consiste nella determinazione della lunghezza  $L$  della stessa, che viene ottenuta utilizzando l'equazione fondamentale delle paratoie, risolta in termini della dimensione sconosciuta  $L$  nel modo seguente:

$$L = \frac{Q_{out}}{\mu H^{3/2} \sqrt{2g}} \quad (3.11)$$

Nell'equazione 3.10,  $Q_{out}$  è la portata rilasciata dalla scarica superficiale,  $\mu$  è il coefficiente di flusso per la struttura e  $H$  è la testata totale sulla cresta della paratoia. La lunghezza  $L$  è determinata considerando la portata di uscita pari alla portata massima per un periodo di ritorno di 3000 anni (Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, 2014) e  $H$  uguale alla testata massima sulla cresta della paratoia. In altre parole, la scarico superficiale è progettata per essere in grado di rilasciare il valore massimo della portata in ingresso, cioè il picco di piena progettato, quando la diga è già completamente piena d'acqua.

## 3.6 Risultati

### 3.6.1 La valutazione delle portate e delle dimensioni della paratoia

Le portate di progetto sono calcolate mediante la formula razionale per durate fisse e periodi di ritorno. L'intensità delle precipitazioni è derivata dalle curve IDAF, costruite sia con le osservazioni ERA-5 LAND che con la procedura di regionalizzazione VAPI. Il picco di progetto viene trovato impostando la durata dell'evento di pioggia uguale al tempo di concentrazione del bacino, che risulta essere  $t_c = 9$  ore, e per un periodo di ritorno di 3000 anni (Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, 2014). Tuttavia, poiché sono solitamente necessari periodi di ritorno inferiori per la progettazione di altri componenti della diga e per altri tipi di dighe (ad es. dighe in cemento) (Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, 2014), le portate di picco vengono calcolate anche per i periodi di ritorno di 20, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni. I risultati sono presentati rispettivamente nella Tabella 3.2 e nella Tabella 3.3. I valori dei picchi di portata ottenuti confermano che, come già identificato precedentemente, che l'utilizzo delle curve IDAF basate sui satelliti porta a una sottostima rispetto all'approccio di regionalizzazione. L'unica eccezione è rappresentata dal periodo di ritorno di 20 anni e dall'evento di durata di 1 ora, per il quale l'intensità delle precipitazioni satellitari sovrastima il picco di portata.

**Tabella 3.2:** Portata calcolata dalle curve IDAF basate su ERA-5 LAND

d (hrs)	Q (m <sup>3</sup> /s)						
	Tr = 20 (years)	Tr = 50 (years)	Tr = 100 (years)	Tr = 200 (years)	Tr = 500 (years)	Tr = 1000 (years)	Tr = 3000 (years)
1	1884,86	2188,28	2406,69	2691,00	2990,74	3217,30	3576,24
3	954,80	1105,21	1218,01	1330,30	1478,47	1590,46	1780,01
6	612,77	711,43	782,41	855,44	947,85	1026,77	1148,01
9	480,38	556,04	612,70	669,27	743,80	800,16	889,39
12	396,73	460,61	506,61	553,87	613,67	664,77	743,30
24	266,25	308,24	339,65	370,95	412,31	443,51	493,03

**Tabella 3.3:** Portata calcolata dalle curve IDAF basate sul VAPI

d (hrs)	Q (m <sup>3</sup> /s)						
	Tr = 20 (years)	Tr = 50 (years)	Tr = 100 (years)	Tr = 200 (years)	Tr = 500 (years)	Tr = 1000 (years)	Tr = 3000 (years)
1	1862,9	2276,3	2589	2901,7	3315,1	3627,8	3940,5
3	986,8	1206,9	1373,4	1540	1760,1	1926,6	2093,1
6	649,1	795,2	905,7	1016,2	1162,4	1272,9	1383,4
9	508,4	624,1	711,6	799,1	914,8	1002,3	1089,9
12	429,7	528,7	603,5	678,4	777,4	852,2	927,1
24	303,4	377,2	433,1	489	562,8	618,7	674,5

Questi risultati sono più evidenti osservando la Tabella 3.4, dove l'Errore Medio di Bias ( $MBE_Q$ ) è calcolato per ciascuna portata massima riferita a una durata e un periodo di ritorno specifici. Il  $MBE$  è calcolato considerando le portate derivate dall'approccio di regionalizzazione quale riferimento. Guardando la Tabella 3.4, si può notare che, per un  $Tr$  fisso, il  $MBE_Q$  associato alla portata di picco aumenta (in termini assoluti) all'aumentare della durata delle precipitazioni. D'altra parte, per la stessa durata  $d$ , l'errore aumenta per periodi di ritorno più alti. Il più basso (assoluto) errore è ottenuto per un periodo di ritorno di 20 anni e un evento di pioggia della durata di un'ora ( $MBE_Q = 0,18$ ). Come ci si potrebbe aspettare, il bias più alto si trova per un periodo di ritorno di 3000 anni e un evento di pioggia della durata di 24 ore.

Tabella 3.4: Errore Medio di Bias tra le portate di picco stimate con i dati ERA-5 LAND e il progetto VAPI.

d (hrs)	$MBE_Q$ (%)						
	Tr = 20 (years)	Tr = 50 (years)	Tr = 100 (years)	Tr = 200 (years)	Tr = 500 (years)	Tr = 1000 (years)	Tr = 3000 (years)
1	1,2%	-4,0%	-7,6%	-7,8%	-10,8%	-12,8%	-10,2%
3	-3,4%	-9,2%	-12,8%	-15,8%	-19,0%	-21,1%	-17,6%
6	-5,9%	-11,8%	-15,8%	-18,8%	-22,6%	-24,0%	-20,5%
9	-5,8%	-12,2%	-16,1%	-19,4%	-23,0%	-25,3%	-22,5%
12	-8,3%	-14,8%	-19,1%	-22,5%	-26,7%	-28,2%	-24,7%
24	-14,0%	-22,4%	-27,5%	-31,8%	-36,5%	-39,5%	-36,8%

La lunghezza del canale di scarico viene calcolata utilizzando l'Eq. 3.11 e adottando quale portata di picco quella riferita ad un tempo di ritorno di 3000 anni come portata di progetto. Viene quindi valutata impiegando sia le portate di picco derivate da ERA-5 LAND che dal VAPI.

L'altezza massima sopra la cresta del paramento  $H$  è fissata a 2,65 m e il coefficiente di flusso  $\mu$  per l'altezza massima è 0,485. La lunghezza risultante del canale di scarico, come previsto, è maggiore quando si utilizza la portata di progetto fornita dall'approccio di regionalizzazione, poiché la portata di progetto è maggiore per VAPI che per le IDAF basate su satellite. Le lunghezze corrispondenti del canale di scarico sono  $L_E = 102$  m per la portata di progetto basata sui dati satellitari e  $L_V = 124$  m per il picco di progetto basato su VAPI, con una differenza di 22 m tra i due approcci.

### 3.7 Discussione e limitazioni

I valori di intensità delle precipitazioni forniti dalle curve Intensità-Durata-Area-Frequenza basate su satellite differiscono dai valori corrispondenti forniti dal progetto VAPI. Le differenze tra le due curve, per la stessa durata, aumentano con l'aumentare del periodo di ritorno e, per lo stesso periodo di ritorno, aumentano con l'aumentare della

durata dell'evento di pioggia. Uno dei fattori responsabili delle differenze con l'aumentare del periodo di ritorno è la diversa lunghezza delle serie temporali impiegate per costruire le curve IDAF, come già riscontrato anche da Marra et al. (27). L'analisi statistica del progetto VAPI è stata condotta con la procedura di regionalizzazione, che garantisce una stima robusta per periodi di ritorno elevati. Anche ERA-5 LAND fornisce serie temporali con molti anni di dati in quanto questo prodotto di pioggia è disponibile a partire dal 1951. Maggiore è il periodo di ritorno della stima, maggiore è l'incidenza delle incertezze e i risultati dovrebbero essere interpretati con cautela. Anche se la lunghezza delle serie temporali limita chiaramente l'affidabilità dell'uso delle osservazioni satellitari per periodi di ritorno elevati, nel tempo i dati satellitari aumenteranno la loro lunghezza. Nel frattempo, l'introduzione di un coefficiente correttivo potrebbe contribuire ad aggiustare le portate di picco stimate con ERA-5 LAND per periodi di ritorno elevati. In questo senso, sono da incoraggiare ulteriori ricerche e studi simili con l'obiettivo di stabilire una relazione o un intervallo di variazione per il coefficiente, che collega il coefficiente stesso con le caratteristiche climatiche e topografiche dei casi di studio. Infatti, essere in grado di prevedere, da un punto di vista quantitativo, le prestazioni di un determinato set di dati satellitari su un'area consentirebbe di utilizzare tali dati anche in aree non monitorate, dove non è possibile confrontarli con dati basati a terra.

### **3.8 Conclusioni**

In questo capitolo è stata testata la affidabilità delle stime delle precipitazioni di ERA-5 LAND per derivare i flussi di picco di progetto per differenti periodi di ritorno. A questo scopo, i flussi di picco di progetto derivati dai satelliti sono confrontati con le corrispondenti quantità calcolate dal progetto di regionalizzazione VAPI, utilizzato nelle aree non monitorate in Italia. I flussi di picco di progetto sono calcolati attraverso il metodo razionale: la tempesta di progetto è identificata attraverso le curve Intensità-Durata-Area-Frequenza (IDAF), costruite sia per le osservazioni satellitari sia applicando il metodo VAPI. Per valutare debolezze e potenzialità dei prodotti satellitari, il flusso di progetto è stimato dalla tempesta di progetto. Successivamente, per quantificare gli effetti dell'uso dei dati satellitari per scopi progettuali, viene fornito un esempio applicativo per il calcolo della lunghezza di progetto di uno sfioratore di una diga. Lo studio è applicato al bacino di Pietrarossa, nel sud Italia, dove è situata una diga in riempimento di roccia e dove è disponibile uno studio di regionalizzazione, ovvero VAPI. È stata inoltre condotta una valutazione preliminare delle prestazioni delle stime di ERA-5 LAND rispetto alle osservazioni delle piogge dei pluviometri per lo studio di caso, utilizzando sia metriche statistiche categoriche sia continue.

I risultati hanno mostrato che il dataset satellitare ha prestazioni soddisfacenti per la scala giornaliera. Tuttavia, alla scala temporale di 30 minuti, le serie temporali satellitari correlano in maniera meno forte con i dati dei pluviometri. I risultati hanno anche rivelato che ERA-5 LAND si comporta bene nella riproduzione dell'intensità delle precipitazioni

a bassi periodi di ritorno e durate, mentre maggiori incertezze sono riscontrate per periodi di ritorno più elevati. Le osservazioni satellitari tendono a sottostimare l'intensità delle precipitazioni per ogni durata e ogni periodo di ritorno, tranne che per un evento di pioggia con durata di 1 ora e periodo di ritorno di 20 anni, per il quale l'uso dei dati satellitari leggermente sovrastima l'intensità delle precipitazioni. La sottostima della tempesta di progetto comporta a sua volta la sottostima delle portate di picco, che aumentano con l'aumentare del periodo di ritorno e della durata dell'evento. I principali fattori responsabili di queste differenze sono da ricercare nella diversa lunghezza delle serie temporali idrologiche impiegate e nella diversa distribuzione di probabilità adottata per descrivere le intensità delle precipitazioni. Si suggerisce quindi di utilizzare con cautela le precipitazioni satellitari per la progettazione di strutture idrauliche, poiché l'incertezza è elevata soprattutto per periodi di ritorno elevati, mentre ERA-5 LAND potrebbe essere adottato con successo per strutture idrauliche caratterizzate da periodi di ritorno bassi.

Studi futuri potrebbero essere mirati a migliorare la conoscenza delle prestazioni satellitari in diversi bacini monitorati, con differenti climi e morfologie. Infatti, conoscere la relazione tra le prestazioni di un certo set di dati satellitari su un'area e le caratteristiche morfologiche e climatiche dell'area stessa aiuterebbe nella definizione di un coefficiente correttivo per regolare l'intensità delle precipitazioni di progettazione e, quindi, i flussi di picco di progettazione, superando uno dei principali limiti del metodo. Infine, nel tempo, la lunghezza delle osservazioni satellitari aumenterà, contribuendo a fornire stime più robuste per periodi di ritorno elevati, consentendo di sfruttare appieno il potenziale dei set di dati satellitari.

## Bibliografia

1. Cannarozzo, M.; D'Asaro, F.; Ferro, V. Regional rainfall and flood frequency analysis for Sicily using the two component extreme value distribution. *Hydrol. Sci. J.* 1995, 40, doi:10.1080/02626669509491388.
2. Muñoz Sabater J (2019) First ERA5-Land dataset to be released this spring. ECMWF Newsletter 159, 8–9.
3. Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146:1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
4. Mazzoleni, M.; Brandimarte, L.; Amaranto, A. Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. *J. Hydrol.* 2019, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124076.
5. Lo Conti, F.; Hsu, K.L.; Noto, L.V.; Sorooshian, S. Evaluation and comparison of satellite precipitation estimates with reference to a local area in the Mediterranean Sea. *Atmos. Res.* 2014, doi:10.1016/j.atmosres.2013.11.011.
6. Duan, Z.; Liu, J.; Tuo, Y.; Chiogna, G.; Disse, M. Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Sci. Total Environ.* 2016, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.08.213.
7. Stampoulis, D.; Anagnostou, E.N.; Nikolopoulos, E.I. Assessment of high-resolution satellite-based rainfall estimates over the mediterranean during heavy precipitation events. *J. Hydrometeorol.* 2013, 14, doi:10.1175/JHM-D-12-0167.1.
8. Marra, F.; Morin, E.; Peleg, N.; Mei, Y.; Anagnostou, E.N. Intensity-duration-frequency curves from remote sensing rainfall estimates: Comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017, 21, doi:10.5194/hess-21-2389-2017.
9. Ombadi, M.; Nguyen, P.; Sorooshian, S.; Hsu, K.L. Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves From Satellite-Based Precipitation: Methodology and Evaluation. *Water Resour. Res.* 2018, 54, doi:10.1029/2018WR022929.
10. Blazkova, S.; Beven, K. Flood frequency estimation by continuous simulation of subcatchment rainfalls and discharges with the aim of improving dam safety assessment in a large basin in the Czech Republic. *J. Hydrol.* 2004, 292, doi:10.1016/j.jhydrol.2003.12.025.
11. Ferrari, E.; Versace, P. *La valutazione delle piene in Italia*; Consiglio Nazionale delle Ricerche, Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche., 1994;
12. Alfonso, L.; He, L.; Lobbrecht, A.; Price, R. Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River. *J. Hydroinformatics* 2013, 15, 211–228, doi:10.2166/hydro.2012.066.
13. Ferro, V.; Porto, P. Regional analysis of rainfall-depth-duration equation for South Italy. *J. Hydrol. Eng.* 1999, doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:4(326).
14. Forestieri, A.; Lo Conti, F.; Blenkinsop, S.; Cannarozzo, M.; Fowler, H.J.; Noto, L. V. Regional frequency analysis of extreme rainfall in Sicily (Italy). *Int. J. Climatol.* 2018, 38, doi:10.1002/joc.5400.
15. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Norme tecniche per la

- progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse) 2014.
16. Langousis, A.; Kaleris, V. Theoretical framework to estimate spatial rainfall averages conditional on river discharges and point rainfall measurements from a single location: An application to western Greece. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013, 17, doi:10.5194/hess-17-1241-2013.
  17. Mineo, C.; Ridolfi, E.; Napolitano, F.; Russo, F. The areal reduction factor: A new analytical expression for the Lazio Region in central Italy. *J. Hydrol.* 2018, 560, doi:10.1016/j.jhydrol.2018.03.033.
  18. Mineo, C.; Ridolfi, E.; Neri, A.; Russo, F. Areal reduction factor: The effect of the return period. In Proceedings of the AIP Conference Proceedings; 2019; Vol. 2116.
  19. Svensson, C.; Jones, D.A. Review of methods for deriving areal reduction factors. *J. Flood Risk Manag.* 2010, 3, doi:10.1111/j.1753-318X.2010.01075.x.
  20. Koutsoyiannis, D.; Xanthopoulos, T. *Hydrology Engineering*; 3rd ed.; Technical University of Athens: Athens, Greece, 1999;
  21. Thiessen, A.H. Precipitation averages for large areas. *Mon. Weather Rev.* 1911, 7, 1082–1089.
  22. Chow, V. Te; Maidment, D.R.; Mays, L.W. *Applied Hydrology*; McGraw-Hill Book Company, Ed.; McGraw-Hill Book Company: New York, NY, USA, 1988;
  23. Forestieri, A.; Lo Conti, F.; Blenkinsop, S.; Cannarozzo, M.; Fowler, H.J.; Noto, L. V. Regional frequency analysis of extreme rainfall in Sicily (Italy). *Int. J. Climatol.* 2018, 38, doi:10.1002/joc.5400.
  24. De Luca, D.L.; Galasso, L. Stationary and non-stationary frameworks for extreme rainfall time series in southern Italy. *Water (Switzerland)* 2018, 10, doi:10.3390/w10101477.
  25. Koutsoyiannis, D.; Kozonis, D.; Manetas, A. A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *J. Hydrol.* 1998, 206, doi:10.1016/S0022-1694(98)00097-3.
  26. Shrestha, A.; Babel, M.S.; Weesakul, S.; Vojinovic, Z. Developing Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves under climate change uncertainty: The case of Bangkok, Thailand. *Water (Switzerland)* 2017, 9, doi:10.3390/w9020145.
  27. Marra, F.; Morin, E.; Peleg, N.; Mei, Y.; Anagnostou, E.N. Intensity-duration-frequency curves from remote sensing rainfall estimates: Comparing satellite and weather radar over the eastern Mediterranean. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2017, 21, doi:10.5194/hess-21-2389-2017.
  28. Marra, F.; Nikolopoulos, E.I.; Anagnostou, E.N.; Bárdossy, A.; Morin, E. Precipitation frequency analysis from remotely sensed datasets: A focused review. *J. Hydrol.* 2019, 574, doi:10.1016/j.jhydrol.2019.04.081.
  29. Pagliara, S.; Viti, C. Discussion of “ Rainfall Intensity-Duration-Frequency Formula for India ” by Umesh C. Kothyari and Ramachandra J. Garde (February, 1992, Vol. 118, No. 2) . *J. Hydraul. Eng.* 1993, 119, doi:10.1061/(asce)0733-9429(1993)119:8(962).
  30. Efstratiadis, A.; Koussis, A.D.; Koutsoyiannis, D.; Mamassis, N. Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2014, 14, doi:10.5194/nhess-14-1417-2014.
  31. Asare-Kyei, D.; Forkuor, G.; Venus, V. Modeling flood hazard zones at the sub-

- district level with the rational model integrated with GIS and remote sensing approaches. *Water (Switzerland)* 2015, 7, doi:10.3390/w7073531.
32. McCuen, R.H. Uncertainty analyses of watershed time parameters. *J. Hydrol. Eng.* 2009, 14, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000011.
  33. Giandotti, M. Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua. *Ist. Poligr. dello Stato* 1934, 8, 107–117.
  34. Kirpich, Z.P. Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civ. Eng.* 1940, 10, 362.
  35. NRCS (National Research Conservation Service) *Ponds — Planning , Design , Construction*; 1997;
  36. Asare-Kyei, D.; Forkuor, G.; Venus, V. Modeling flood hazard zones at the sub-district level with the rational model integrated with GIS and remote sensing approaches. *Water (Switzerland)* 2015, 7, doi:10.3390/w7073531.
  37. Young, C.B.; McEnroe, B.M.; Rome, A.C. Empirical Determination of Rational Method Runoff Coefficients. *J. Hydrol. Eng.* 2009, 14, doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000114.
  38. Grimaldi, S.; Petroselli, A. Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrol. Sci. J.* 2015, 60, doi:10.1080/02626667.2014.880546.
  39. De Benedetti, S. Diga in materiali sciolti sul fiume Margherito, MSc Thesis, La Sapienza Università di Roma, Roma, 1985.
  40. Papalexiou, S. M., Koutsoyiannis, D., & Makropoulos, C. (2013). How extreme is extreme? An assessment of daily rainfall distribution tails. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 851-862.

## 4 Discussione delle analisi svolte e risultati

### 4.1 Conclusioni e raccomandazioni

Questo capitolo presenta le principali conclusioni di questa tesi di dottorato, insieme a alcune raccomandazioni per l'uso delle stime satellitari in aree non monitorate per le applicazioni idrologiche considerate, le limitazioni dei metodi qui impiegati e ciò che è necessario investigare in futura ricerca per migliorare lo studio e rispondere pienamente alle domande di ricerca poste all'inizio di questa tesi di dottorato.

### 4.2 Discussione

Dagli esiti di questo studio emerge un'analisi dettagliata delle prestazioni dei prodotti satellitari nell'ambito idrologico, focalizzando l'attenzione su varie scale temporali. I dati mostrano una variazione significativa delle precipitazioni in Italia, con una maggiore concentrazione di piogge nelle regioni montuose rispetto alle pianure e alle aree costiere. I dataset satellitari sono stati valutati in termini di capacità di riprodurre la variabilità spazio-temporale delle precipitazioni in Italia, evidenziando una migliore performance dei prodotti basati su correzioni con misuratori a terra rispetto a quelli basati su satellite.

Tuttavia, sono emerse anche alcune limitazioni, come la tendenza dei prodotti satellitari a sottostimare le precipitazioni ad alta quota e a sovrastimare quelle vicino ai corpi idrici. L'analisi a scala giornaliera ha confermato queste tendenze, con alcuni prodotti che presentano una migliore correlazione con i dati osservati rispetto ad altri.

Nella valutazione dei massimi valori di portata e delle dimensioni dello sfioratore, è stato osservato che i dati satellitari tendono a sottostimare i valori rispetto all'approccio di regionalizzazione VAPI. Tuttavia, sono emersi anche punti di forza, come la disponibilità di serie temporali più lunghe per i dati satellitari, che potrebbero migliorare nel tempo la loro affidabilità.

Sebbene i prodotti satellitari offrano un importante strumento per la valutazione delle precipitazioni e dei flussi idrici, è necessario considerare attentamente le loro limitazioni e lavorare per migliorarne l'affidabilità, specialmente nei casi di studio che richiedono valutazioni precise dei valori di portata e delle dimensioni delle opere idrauliche.

Nella prima parte, il confronto delle prestazioni dei prodotti satellitari a diverse scale temporali ha evidenziato vantaggi e limitazioni significativi. A differenti scale temporali, i prodotti RPP hanno dimostrato una maggiore precisione rispetto agli SPP, con una buona correlazione riscontrata nei dati di precipitazione rispetto alle osservazioni a terra. Tuttavia, a livello giornaliero, le differenze tra i vari prodotti sono state più evidenti, con alcuni SPP che mostrano una tendenza alla sovrastima o sottostima delle precipitazioni rispetto ai dati osservati. Questo suggerisce che l'affidabilità dei dati satellitari possa variare a seconda della scala temporale considerata.

I vantaggi principali dei prodotti satellitari includono la capacità di coprire vaste aree geografiche, comprese quelle scarsamente monitorate da stazioni meteorologiche a terra, fornendo una visione globale delle precipitazioni. Tuttavia, le limitazioni derivano principalmente dalla risoluzione spaziale e temporale dei dati satellitari, che possono influenzare l'accuratezza delle stime, specialmente in regioni montuose o durante eventi meteorologici estremi.

Il potenziale di sviluppo futuro risiede nell'ulteriore miglioramento della precisione dei dati satellitari attraverso l'integrazione di nuove tecnologie e metodologie, nonché nell'espansione delle serie temporali disponibili per consentire analisi più approfondite e affidabili delle tendenze climatiche e degli eventi meteorologici estremi.

Le interrogazioni iniziali presentate all'avvio di questo lavoro di dottorato rimangono ancora lontane dall'essere completamente risolte, in quanto richiedono ulteriori approfondimenti attraverso studi aggiuntivi che coinvolgano differenti configurazioni e insiemi di dati satellitari per conseguire una comprensione più completa dell'argomento e per condurre una valutazione complessiva. Nonostante ciò, le indagini condotte hanno contribuito a chiarire ulteriormente le performance delle osservazioni satellitari in specifiche applicazioni idrologiche, mettendo in luce che, pur vantando notevoli potenzialità, queste non sono ancora in grado di sostituire integralmente le misurazioni dei pluviometri.

Il confronto tra le stime delle portate massime di progetto derivate dai dati satellitari e quelle ottenute tramite il metodo di regionalizzazione ha rivelato differenze significative, soprattutto con l'aumentare del tempo di ritorno e della durata dell'evento di pioggia. Mentre i dati satellitari offrono vantaggi in termini di copertura spaziale e accesso a regioni scarsamente monitorate, le differenze di precisione riscontrate indicano limitazioni nell'utilizzo diretto di tali dati per la progettazione idrologica, specialmente per periodi di ritorno elevati.

Le principali limitazioni derivano dalla lunghezza limitata delle serie temporali dei dati satellitari e dalla risoluzione spaziale dei prodotti, che possono influenzare la precisione delle stime delle portate massime di progetto. Tuttavia, il potenziale di sviluppo futuro risiede nella correzione dei dati satellitari attraverso l'implementazione di coefficienti correttivi e nell'ulteriore ricerca per stabilire relazioni quantitative tra le caratteristiche dei dati satellitari e le condizioni climatiche e topografiche.

Sebbene i dati satellitari offrano vantaggi significativi in termini di copertura e accessibilità, è necessario affrontare le limitazioni esistenti per garantire la loro affidabilità e accuratezza nell'applicazione pratica, specialmente per la progettazione idrologica e la gestione delle risorse idriche. Questo richiede ulteriori ricerche e sviluppi metodologici

per migliorare la precisione dei dati satellitari e per stabilire protocolli standardizzati per la loro integrazione nei processi decisionali.

### **4.3 Contesto e Importanza dello Studio**

In un mondo sempre più soggetto ai cambiamenti climatici, la comprensione accurata dei modelli di precipitazione e dei flussi idrici riveste un'importanza cruciale per la gestione sostenibile delle risorse idriche e la mitigazione dei rischi legati alle inondazioni e alla siccità. In questo contesto, i dati satellitari rappresentano una risorsa preziosa, offrendo una copertura spaziale e temporale ampia e consentendo di monitorare le condizioni idrologiche anche in aree remote e poco accessibili.

### **4.4 Analisi Approfondita delle Prestazioni dei Prodotti Satellitari, limitazioni e punti di forza**

Lo studio condotto ha esplorato in dettaglio le prestazioni dei prodotti satellitari, analizzando varie scale temporali e considerando una serie di variabili idrologiche chiave. Uno degli aspetti centrali è stata la valutazione della capacità dei prodotti satellitari di riprodurre in modo accurato le serie di precipitazione osservate. I risultati hanno evidenziato una buona concordanza tra i dati satellitari e le osservazioni di riferimento, con una particolare attenzione alla distribuzione spaziale delle precipitazioni.

Tuttavia, è emerso che i prodotti satellitari mostrano alcune limitazioni, come la tendenza a sottostimare le precipitazioni nelle regioni montuose e a sovrastimarle in quelle costiere e vicine ai corpi idrici. Queste discrepanze possono essere attribuite a diversi fattori, tra cui la complessità topografica del territorio e l'effetto di ombreggiatura dei rilievi, che influenzano la capacità dei sensori satellitari di rilevare con precisione le precipitazioni.

Oltre alle discrepanze nella riproduzione delle precipitazioni, lo studio ha identificato altre limitazioni dei dati satellitari nell'ambito idrologico. Ad esempio, è emerso che i prodotti satellitari tendono a sottostimare i massimi valori di portata rispetto ai valori osservati.

Tuttavia, nonostante queste limitazioni, i dati satellitari offrono diversi vantaggi rispetto agli approcci tradizionali basati su stazioni meteorologiche e misurazioni sul campo. Tra i principali punti di forza dei dati satellitari vi è la capacità di fornire una copertura spaziale e temporale estesa, consentendo di monitorare le condizioni idrologiche anche in aree remote e poco accessibili. Inoltre, i dati satellitari possono essere integrati con altre fonti di informazione, come i modelli idrologici e i dati in-situ, per migliorare la precisione delle valutazioni idrologiche.

La correzione del bias rappresenta un'opportunità per migliorare le stime delle precipitazioni satellitari. Tuttavia, per essere eseguita correttamente, richiede l'utilizzo di dati provenienti da pluviometri. Di conseguenza, tale procedura non risulta adatta per le

aree non monitorate, a meno che non venga prima implementata in una zona adeguatamente misurata e successivamente estesa ad altre regioni idrologicamente simili, come spesso avviene nei processi di regionalizzazione.

#### **4.5 Raccomandazioni**

Le prestazioni delle osservazioni delle precipitazioni effettuate tramite satelliti sono strettamente influenzate da fattori climatici, topografici e dalla vicinanza ai corpi idrici del contesto di studio considerato, in relazione alle specifiche modalità di misurazione satellitare e agli algoritmi impiegati per ottenere tali osservazioni. Ad esempio, i prodotti basati su microonde passive sono noti per essere soggetti a distorsioni nelle stagioni fredde a causa della contaminazione da neve e ghiaccio. La selezione di un prodotto non adatto al contesto di studio può compromettere l'affidabilità dei risultati ottenuti. La revisione accurata della letteratura rappresenta il più efficace strumento a disposizione della comunità scientifica per prevenire tali inconvenienti. Pertanto, la lezione principale che emerge da questa tesi è l'importanza di adottare un prodotto satellitare già validato per l'area di studio o per contesti climatici, topografici e idrologici simili.

Infine, è fondamentale considerare attentamente la lunghezza dei campioni di dati utilizzati nelle stime statistiche, limitando tali stime al tempo di ritorno consentito dalla dimensione del campione disponibile.

#### **4.6 Implicazioni per la Gestione delle Risorse Idriche, Prospettive Future e Sviluppi Tecnologici**

Le conclusioni dello studio hanno importanti implicazioni per la gestione delle risorse idriche e la pianificazione territoriale. Ad esempio, una migliore comprensione delle discrepanze tra i prodotti satellitari e le osservazioni di riferimento può contribuire a migliorare la calibrazione dei modelli idrologici e la previsione dei fenomeni idrologici estremi, come le inondazioni e le siccità.

Inoltre, l'identificazione delle aree e delle condizioni in cui i modelli satellitari mostrano una maggiore o minore accuratezza può aiutare i gestori delle risorse idriche a focalizzare le loro risorse e le loro azioni di monitoraggio e intervento. Ad esempio, nelle aree dove i modelli satellitari tendono a sottostimare le precipitazioni, potrebbero essere implementati sistemi di monitoraggio più intensivi basati su stazioni meteorologiche e sensori in-situ per migliorare la precisione delle previsioni idrologiche.

Infine, lo studio suggerisce alcune direzioni per futuri sviluppi tecnologici e ricerche nell'ambito del monitoraggio idrologico basato sui dati satellitari. Ad esempio, potrebbero essere sviluppati algoritmi avanzati per migliorare la correzione dei dati satellitari e ridurre le discrepanze con le osservazioni di riferimento. Inoltre, potrebbero essere esplorate nuove tecniche di integrazione e fusione dei dati provenienti da diverse

piattaforme satellitari e fonti di informazione, al fine di migliorare la precisione e l'affidabilità delle valutazioni idrologiche.

In conclusione, lo studio fornisce una panoramica dettagliata delle prestazioni dei prodotti satellitari nell'ambito idrologico, evidenziando le loro potenzialità e le loro limitazioni sull'intera Italia. Le informazioni e le conclusioni emerse possono essere utilizzate per orientare le decisioni e le azioni dei decisori politici, dei gestori delle risorse idriche e dei ricercatori nell'ambito della gestione sostenibile delle risorse idriche e della mitigazione dei rischi idrologici.



APPENDICE 1 – Articolo in attesa di pubblicazione

## 5 Affidabilità dei prodotti di precipitazione basati su satellite per la modellazione idrologica in aree non strumentate

*Titolo: "Performance of Satellite-based Rainfall Observations for Hydrological Modelling in Ungauged Areas"*

*Autori: Claudia Bertini, Luca Buonora and Benedetta Moccia*

**Abstract.** La comunità idrologica si affida a modelli pioggia-deflusso per molteplici applicazioni fondamentali, come la previsione delle inondazioni, la stima delle risorse idriche e le previsioni di deflusso. Le prestazioni dei modelli idrologici sono fortemente influenzate dalla qualità delle osservazioni delle precipitazioni utilizzate, indipendentemente dal modello adottato. Le osservazioni accurate e precise delle precipitazioni sono quindi fondamentali. Le voci di input sulle precipitazioni sono comunemente derivate dalle osservazioni dei pluviometri, che spesso non forniscono informazioni spaziali adeguate. Infatti, poiché forniscono misurazioni puntuali, è spesso necessaria un'interpolazione delle serie temporali dei pluviometri. Tuttavia, i campi di precipitazione interpolati sono influenzati dalla posizione e dalla densità delle reti esistenti, compromettendo spesso le prestazioni del modello. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati molte stime delle precipitazioni basate su satelliti, che forniscono informazioni grigliate con una copertura quasi globale. Pertanto, l'utilizzo di recupero tramite satelliti ha il potenziale per essere utilizzato come input per la modellazione idrologica nelle aree non monitorate, dove non è possibile interpolare informazioni da una rete di monitoraggio. In questo studio, il set di dati Estimazione delle precipitazioni dalle informazioni rilevate da satelliti tramite reti neurali artificiali - Sistema di classificazione delle nuvole (PERSIANN-CCS) viene impiegato come input per un modello idrologico e le sue prestazioni vengono confrontate con quelle del pluviometro. Le simulazioni vengono eseguite nell'ipotesi di mancanza di dati di deflusso per la calibrazione, per simulare le condizioni non monitorate. I risultati mostrano che entrambe le fonti di dati hanno prestazioni scadenti in condizioni non monitorate, con il pluviometro leggermente che supera gli input satellitari. Inoltre, si osserva che PERSIANN-CCS sottostima le precipitazioni, in accordo con studi precedenti.

### 5.1 Introduzione

Le stime delle precipitazioni costituiscono il principale input dei modelli idrologici, sui quali la comunità scientifica si affida per simulare le portate, ad esempio, per prevedere inondazioni e valutare il bilancio idrico a scala di bacino. Le informazioni accurate sulle

precipitazioni sono, quindi, di importanza cruciale, non solo per i modelli distribuiti ma anche per i modelli raggruppati che utilizzano precipitazioni medie areali (Ancil et al., 2006). L'eterogeneità delle precipitazioni è riconosciuta per influenzare la forma della risposta idrologica dei bacini idrografici (Giulianelli et al., 2006) e l'errore nelle conoscenze sulle precipitazioni è riconosciuto come una delle principali cause di errori nella modellazione idrologica (Moulin et al., 2009; Ridolfi et al., 2011). Inoltre, è stato dimostrato che i modelli idrologici basati su input di precipitazioni areali, invece di piogge distribuite, tendono a sottostimare le portate simulate (Tramblay et al., 2011). Tuttavia, le prestazioni nella riproduzione dei campi di precipitazioni distribuiti spazialmente da misurazioni puntuali dipendono dal numero e dalla posizione delle stazioni di monitoraggio (Russo et al., 2005; Lopez et al., 2005), indipendentemente dalla tecnica di interpolazione adottata. Un'alternativa valida per migliorare la conoscenza delle precipitazioni potrebbe derivare dalle stime delle precipitazioni satellitari, che sono ora disponibili con una copertura quasi globale. Sebbene i prodotti satellitari abbiano dimostrato di riprodurre correttamente la variabilità spaziale per alcune aree del mondo (Huang et al., 2020) e siano stati impiegati in studi precedenti per derivare le portate di progetto (Bertini et al., 2020), l'ottimizzazione delle reti (Huang et al., 2020; Bertini et al., 2021) e a scopo di modellazione (Mazzoleni et al. 2019), si è constatato che non sono sempre adatti per la modellazione idrologica (Nguyen et al., 2015) e le loro prestazioni sono strettamente legate alla topografia e al clima del caso di studio analizzato (Kidd et al., 2012). Lo scopo di questo studio è quello di indagare le capacità delle osservazioni basate su satelliti di essere impiegate come input per i modelli idrologici al fine di riprodurre la risposta del bacino, per eventi sub-giornalieri. Infatti, i prodotti satellitari hanno il potenziale per essere utilizzati in aree non monitorate per prevedere il deflusso, se accoppiati con modelli parsimoniosi in cui i parametri possono essere stimati attraverso studi di regionalizzazione.

## 5.2 Dataset e Caso di Studio

Lo studio è applicato nel bacino del fiume Mignone, situato nel Centro Italia. Il bacino idrografico ha un'area di 500 km<sup>2</sup>, un'altitudine media di 233 m s.l.m. e un tempo di concentrazione di circa 12 ore.

Per condurre l'analisi, le osservazioni delle precipitazioni basate su satelliti dal set di dati Estimazione delle precipitazioni dalle informazioni rilevate da satelliti tramite reti neurali artificiali - Sistema di classificazione delle nuvole (PERSIANN-CCS) vengono confrontate con i dati estratti dalla rete di monitoraggio in situ, composta da 14 pluviometri che forniscono stime orarie. Il set di dati spaziali fornisce stime dell'intensità delle precipitazioni orarie su una griglia regolare di 0.04° di latitudine e longitudine (~4 km all'Equatore), con una copertura quasi globale, in quanto è disponibile da 60° N a 60° S (Hong et al., 2004). PERSIANN-CCS è sviluppato combinando informazioni provenienti da immagini a infrarossi (IR) di satelliti geostazionari e osservazioni delle precipitazioni da un insieme di dati sulle precipitazioni orarie corretto da pluviometro radar, utilizzando

una rete neurale artificiale. Le osservazioni di deflusso presso la sezione di uscita del bacino idrografico sono disponibili per il periodo di studio 2005-2015, per il quale sono disponibili anche serie temporali delle precipitazioni da entrambi i set di dati.

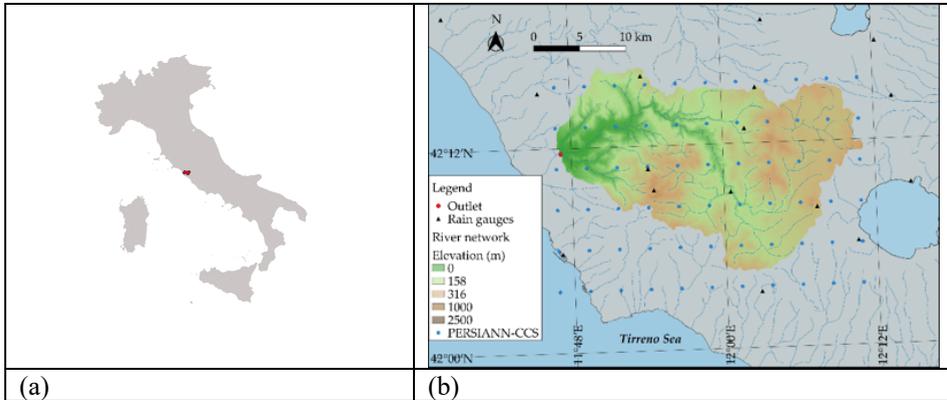


FIGURA 5.1. a) Posizione del bacino del fiume Mignone all'interno dell'Italia; b) Mappa del bacino del fiume Mignone con i pluviometri disponibili e i baricentri delle celle di PERSIANN-CCS considerati per lo studio.

### 5.3 Metodologia

Per simulare le portate utilizzando osservazioni sia terrestri che satellitari, viene impiegato un modello idrologico basato sull'Idrogramma Unitario Istantaneo con Funzione di Larghezza (WFIUH). Si tratta di un modello geomorfologico concettuale e semi-distribuito, proposto da Grimaldi et al. (15). Come descritto dagli autori, il modello è costruito in due macro-step: prima, la rete di drenaggio è definita a partire dal Modello Digitale del Terreno (DTM) del caso di studio; secondo, il WFIUH viene calcolato e impiegato per generare le portate. Il modello valuta la velocità media del percorso basandosi sulla formulazione di Maidment et al. (1996) e l'eccesso di precipitazioni utilizzando la teoria del Numero di Curva (CN). I valori di CN sono calcolati per ogni cella del bacino idrografico, basandosi sui dati della Copertura del Suolo Corine e del tipo di suolo, utilizzando le tabelle fornite dal NCRS. Per determinare se il suolo, all'inizio di un evento specifico, si trova in condizioni standard, asciutte o umide, vengono calcolate le Condizioni di Umidità Antecedente (AMC) basate sull'Indice di Precipitazioni Antecedenti (API). Secondo l'approccio API, la condizione di AMC viene valutata in base alla quantità di precipitazioni cadute nell'area di studio in un numero specifico di giorni precedenti all'evento. In questo studio, l'AMC viene calcolata misurando la profondità cumulativa delle precipitazioni sul bacino idrografico nei 5 giorni antecedenti (API 5) all'evento di tempesta considerato, come catturato sia dalla rete locale di pluviometri che da PERSIANN-CCS.

Il modello idrologico impiegato ha principalmente cinque parametri: il coefficiente di dispersione  $D$  del bacino idrografico, necessario per la definizione della funzione di larghezza; un coefficiente correttivo per il Numero di Curva, che tiene conto delle

incertezze nella stima del CN; un coefficiente moltiplicativo per l'astrazione iniziale, che tiene conto delle incertezze nella stima dell'astrazione iniziale; il coefficiente esponenziale per la pendenza locale e l'area di drenaggio, rispettivamente  $b$  e  $f$ , necessari per la formulazione della velocità di Maidment. Poiché lo scopo dello studio è confrontare le prestazioni delle osservazioni satellitari e dei pluviometri quando utilizzate come input per modelli idrologici in aree non monitorate, i parametri del modello non vengono calibrati ma vengono assunti uguali ai valori suggeriti negli studi della letteratura. I valori assunti per i parametri del modello sono presentati nella Tabella 5.1.

Le prestazioni del modello vengono valutate confrontando le portate simulate, sia dal modello basato su satelliti che su pluviometri, rispetto alle portate osservate e calcolando il Normalized Standard Error (NSE):

$$NSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - R_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i}$$

dove  $S_i$  è l'osservazione satellitare,  $R_i$  è l'osservazione basata sul pluviometro e  $N$  è il numero totale di osservazioni considerate.

Tabella. 5.1 Valori della letteratura assunti per i parametri del modello

Parameter	Symbol	Value	Unit
Dispersion coefficient of the catchment	$D$	500	$m^2/s$
Corrective coefficient for Curve Number	$\alpha$	1	-
Multiplicative coefficient for Initial Abstraction	$\lambda$	0.2	-
Exponential coefficient for local slope	$b$	0.5	-
Exponential coefficient for drainage area	$f$	0.5	-

## 5.4 Risultati

Nell'utilizzo di osservazioni PERSIANN-CCS e pluviometriche per eseguire la modellazione pioggia-deflusso, il primo risultato ottenuto è che le due fonti di dati sulle precipitazioni non sempre individuano la stessa Condizione di Umidità Antecedente (AMC) del suolo. Infatti, in più del 40% dei casi, le osservazioni PERSIANN-CCS e del pluviometro hanno fornito condizioni di AMC diverse, il che è previsto possa influenzare le prestazioni del modello stesso, poiché l'AMC influenza il calcolo delle precipitazioni in eccesso e, di conseguenza, della portata simulata. Nella maggior parte dei casi, il set di dati basato sui satelliti ha sottostimato la quantità di pioggia caduta nei giorni precedenti all'evento, portando a una sottovalutazione dell'AMC. Un risultato simile riguardante la sottostima delle precipitazioni da parte delle stime satellitari è stato trovato anche in Bertini et al. (2021) utilizzando le stime delle precipitazioni satellitari CMORPH per catturare la profondità cumulativa durante gli eventi piovosi nello stesso caso di studio.

In termini di portate simulate, entrambi gli input sulle precipitazioni hanno avuto prestazioni scadenti, con il modello basato sul pluviometro che fornisce prestazioni leggermente migliori. I risultati sono mostrati nella Tabella 5.2. Una differenza maggiore nelle prestazioni si riscontra solo per la classe umida di AMC, cioè AMC III, per la quale la rete in situ ha fornito un NSE complessivo di 0,45, mentre il modello basato sui satelliti ha fornito un NSE complessivo di -0,7. La grande differenza nelle prestazioni di questa classe AMC è probabilmente dovuta a quanto emerso inizialmente riguardo alla sottostima da parte di PERSIANN-CCS delle condizioni di umidità del suolo.

Tabella 5.2. Valori di NSE per l'esecuzione del modello in condizioni non monitorate, utilizzando serie temporali del pluviometro e satellitari.

	AMC I (dry)	AMC II (standard)	AMC III (wet)
PERSIANN-CCS	-0.4	-0.6	-0.7
Rain gauges	-0.3	-0.2	0.45

In conclusione, PERSIANN-CCS ha mostrato una sottostima delle precipitazioni, il che ha implicazioni sia nell'identificazione delle condizioni di umidità del suolo che nelle prestazioni dei modelli idrologici in condizioni non monitorate. Nella stessa situazione, tuttavia, anche il modello basato sul pluviometro ha avuto prestazioni scadenti, evidenziando la necessità di osservazioni di flusso per calibrare i parametri del modello o, in alternativa, per approcci diversi per derivare i parametri del modello in aree non monitorate.

## Bibliografia

1. Antcil, F., Lauzon, N., Andréassian, V., Oudin, L., Perrin, C., "Improvement of rainfall-runoff forecasts through mean areal rainfall optimization", *J. Hydrol.* 328, (2006).
2. Giulianelli, M., Miserochi, F., Napolitano, F., Russo, F., "Influence of space-time rainfall variability on urban runoff", *MS'06 Proc. 17th IASTED Int. Conf. Model. Simul.*, ACTA Press, Anaheim, CA, USA, 2006: pp. 546–551.
3. Moulin, L., Gaume, E., Obléd, C., "Uncertainties on mean areal precipitation: Assessment and impact on streamflow simulations", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, (2009).
4. Ridolfi, E., Montesarchio, V., Russo, F., Napolitano, F., "An entropy approach for evaluating the maximum information content achievable by an urban rainfall network", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2075–2083 (2011).
5. Trambly, Y., Bouvier, C., Ayrat, P.A., Marchandise, A., "Impact of rainfall spatial distribution on rainfall-runoff modelling efficiency and initial soil moisture conditions estimation", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, (2011).
6. Russo, F., Napolitano, F., Gorgucci, E., "Rainfall monitoring systems over an urban area: The city of Rome", *Hydrol. Process.* 19, 1007–1019 (2005).
7. Lopez, V., Napolitano, F., Russo, F., "Calibration of a rainfall-runoff model using radar and raingauge data", *Adv. Geosci.* 2, (2005).
8. Huang, Y., Zhao, H., Jiang, Y., Lu, X., "A method for the optimized design of a rain gauge network combined with satellite remote sensing data", *Remote Sens.* (2020).
9. Bertini, C., Buonora, L., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F., "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site", *Water.* 12, 3028 (2020).
10. Bertini, C., Ridolfi, E., de Padua, L.H.R., Russo, F., Napolitano, F., Alfonso, L., "An entropy-based approach for the optimization of rain gauge network using satellite and ground-based data", *Hydrol. Res.* 52, (2021).
11. Mazzoleni, M., Brandimarte, L., Amaranto, A., "Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling", *J. Hydrol.* (2019).
12. Nguyen, P., Thorstensen, A., Sorooshian, S., Hsu, K., Aghakouchak, A., "Flood forecasting and inundation mapping using HiResFlood-UCI and near-real-time satellite precipitation data: The 2008 Iowa flood", *J. Hydrometeorol.* 16, (2015).
13. Kidd, C., Bauer, P., Turk, J., Huffman, G.J., Joyce, R., Hsu, K.L., Braithwaite, D., "Intercomparison of high-resolution precipitation products over Northwest Europe", *J. Hydrometeorol.* 13, (2012).
14. Hong, Y., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Gao, X., "Precipitation estimation from remotely sensed imagery using an artificial neural network cloud classification system", *J. Appl. Meteorol.* 43, 1834–1852 (2004).
15. Grimaldi, S., Petroselli, A., Nardi, F., "A parsimonious geomorphological unit hydrograph for rainfall-runoff modelling in small ungauged basins", *Hydrol. Sci. J.* 57, (2012).
16. Maidment, D.R., Olivera, F., Calver, A., Eatherall, A., Fraczek, W., "Unit hydrograph derived from a spatially distributed velocity field", *Hydrol. Process.* (1996).
17. Bertini, C., Russo, F., "Evaluation of CMORPH skills in capturing rainfall extreme events: a case study in Mignone river catchment", *AIP Conf. Proc.*, AIP Conference Proceedings, 2021.

## APPENDICE 2 – Articolo pubblicato

## 6 Curve IDF corrette (variazioni climatiche): un caso di studio a Roma, Italia.

**Titolo:** *“Climate Corrected Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves: A Case Study in Rome, Italy”.*

**Autori:** *Mara Lucantonio, Benedetta Moccia, Claudia Bertini, Luca Buonora and Francesco Napolitano*

**Titolo del volume:** *Proceedings of the International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2021 (ICNAAM-2021)*

**Codice DOI:** <https://dx.doi.org/10.1063/5.0163789>

**Abstract.** Le curve Intensità-Durata-Frequenza (IDF) sono comunemente utilizzate nell'ingegneria idraulica per stimare le tempeste di progetto, che a loro volta sono impiegate per progettare molte infrastrutture idrauliche. Le IDF sono generalmente sviluppate utilizzando i massimi annuali (AM) per durate fisse, che vengono estratti dalle serie temporali dei pluviometri, con il principale presupposto che i valori osservati siano rappresentativi anche per le condizioni future. Tuttavia, negli ultimi decenni, l'aumento delle emissioni di gas serra ha causato un'alterazione del ciclo idrologico, inducendo un aumento delle precipitazioni sub-daily in molte regioni del mondo, come l'area mediterranea. La conseguenza diretta di questo fenomeno è il sempre più frequente cedimento delle strutture idrauliche, specialmente nelle aree urbane, causando spesso alluvioni urbane. In questo contesto, appare evidente la necessità di una metodologia finalizzata alla correzione e all'aggiornamento delle curve IDF basate sui possibili scenari futuri delle emissioni di gas serra. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati molti modelli di circolazione globale e regionale (GCM e RCM), in grado di simulare le variabili climatiche sia nelle condizioni attuali che future, basandosi sullo scenario di emissione di gas serra. In questo studio, proponiamo un metodo per correggere le IDF storiche per la città di Roma utilizzando l'output delle precipitazioni di un modello regionale, fornito dal progetto EURO-CORDEX. I massimi annuali delle precipitazioni per durate fisse, registrati dai pluviometri nel periodo storico, vengono utilizzati per calibrare una relazione che collega i massimi annuali insieme ai massimi annuali giornalieri estratti dalla RCM. Una volta calibrata e convalidata la relazione, questa viene utilizzata per derivare i massimi annuali per le durate fisse per le condizioni future, adottando come input l'output della RCM negli scenari futuri. Infine, i massimi annuali per durate fisse vengono impiegati per derivare le curve IDF con un approccio statistico. I risultati mostrano che l'intensità delle precipitazioni aumenta negli scenari futuri e che questo aumento cresce con l'aumentare dei periodi di ritorno.

## 6.1 Introduzione

Le curve Intensità-Durata-Frequenza (IDF) sono relazioni matematiche che collegano l'intensità delle precipitazioni degli eventi piovosi con durata fissa  $d$  alla loro frequenza, espressa in termini di periodo di ritorno  $Tr$ . Le curve IDF sono impiegate per derivare le tempeste di progetto, che a loro volta vengono utilizzate per progettare reti di drenaggio urbano, opere di protezione idraulica e infrastrutture idrauliche (Bertini et al., 2020; Montesarchio et al., 2015; Russo et al., 2006). Le curve IDF vengono comunemente sviluppate utilizzando osservazioni dei massimi annuali dei pluviometri riferiti alle durate fisse di 1, 3, 6, 12 e 24 ore (Mineo et al., 2018; Montesarchio et al., 2013). Le equazioni delle curve vengono determinate attraverso inferenze statistiche, identificando la distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione. Questo metodo si basa sull'assunzione che le osservazioni storiche siano rappresentative anche per le condizioni future. Negli ultimi decenni, tuttavia, l'aumento delle emissioni di gas serra ha causato un aumento della temperatura globale (Cheng et al., 2014), il che si prevede possa alterare il ciclo idrologico, rendendolo più attivo (Treberth et al., 1999). Nonostante attualmente non vi sia un consenso sugli effetti dell'aumento della temperatura globale sui regimi locali di precipitazione, molti studiosi hanno dimostrato l'esistenza di tendenze positive nelle precipitazioni mensili (Latini et al., 2020), nelle precipitazioni estreme giornaliere e sub-giornaliere (Bonaccorso et al., 2016). L'aumento dell'intensità delle precipitazioni potrebbe causare il fallimento di molte opere idrauliche che sono state progettate solo basandosi sulle osservazioni storiche, specialmente in ambienti urbani, causando gravi alluvioni urbane. In questo contesto, è quindi necessario correggere le IDF storiche basate sui possibili scenari di cambiamento climatico, per consentire ai gestori idrici di progettare nuove strutture resilienti e di pianificare interventi su quelle esistenti, se necessario. La stessa necessità è stata espressa anche dall'Unione Europea attraverso la Direttiva UE 2007/60/CE. Infatti, secondo la direttiva, i gestori idrici dovrebbero aggiornare periodicamente i criteri di progettazione considerando i potenziali effetti del cambiamento climatico.

Aggiornare le curve IDF sulle proiezioni climatiche future non è un compito semplice, poiché sono necessari i massimi annuali per le condizioni future. Poiché queste informazioni non possono essere fornite dalle reti di monitoraggio in situ, è comune utilizzare l'output del Modello Climatico Globale (GCM) o del Modello Climatico Regionale (RCM). Questi modelli sono impiegati per simulare la risposta climatica basata sugli input delle emissioni di gas serra, che possono riferirsi sia alle condizioni storiche che future. Il Panel Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) ha prodotto quattro diversi scenari futuri, chiamati Percorsi di Concentrazione Rappresentativa (RCP), che variano in base al livello di concentrazione dei gas serra nell'atmosfera nel periodo 2006-2100. GCM e RCM forniscono flussi di precipitazioni su una griglia regolare con risoluzione spaziale e temporale che varia in base al modello stesso. In questo studio abbiamo impiegato gli output del modello regionale RCA4 con risoluzione giornaliera,

forniti nel progetto Coordinated Downscaling Experiment - European Domain (EURO-CORDEX). Abbiamo sviluppato una relazione matematica tra i massimi annuali giornalieri forniti dal modello RCM e i campioni di massimi annuali per le durate fisse forniti dalla stazione di pluviometria di Roma Macao, utilizzando dati relativi al periodo 1970-2005. Successivamente abbiamo utilizzato la stessa relazione per derivare i massimi annuali per le durate fisse per il periodo 2006-2100, utilizzando due scenari RCP, vale a dire RCP 4.5 e RCP 8.5, con il RCP 8.5 che è il più critico. Infine, le curve IDF sono costruite utilizzando l'intero campione di massimi annuali per il periodo 1970-2100.

## 6.2 Dataset e Caso di Studio

Lo studio qui presentato è applicato nella città di Roma, Italia. Il campione dei massimi annuali per le durate fisse di 1, 3, 6, 12 e 24 ore è estratto dalla stazione di Roma Macao, che è quella con la serie temporale più lunga per la città di Roma. È infatti ben noto che per avere stime statistiche robuste sono necessarie serie temporali lunghe. Inoltre, le precipitazioni giornaliere per il periodo 1970-2100 sono estratte dalla griglia del modello RCA4, nella cella in cui si trova la stazione di Roma Macao, per RCP 4.5 e RCP 8.5. Il modello RCA4 è un modello regionale che è forzato con modelli globali. In questo studio, abbiamo considerato l'esperimento forzato con il modello globale CNRM, sviluppato dal Centro Nazionale per la Ricerca Meteorologica.

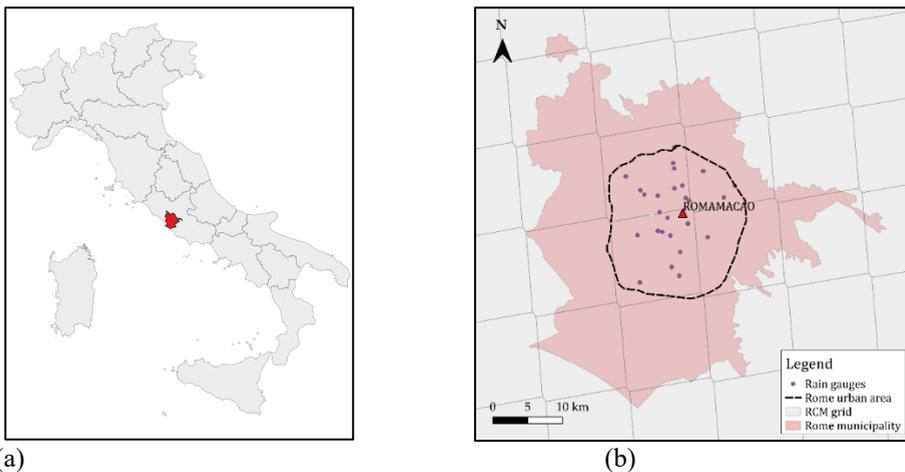


FIGURA 6.1. a) Posizione di Roma (confini del comune) all'interno dell'Italia; b) Mappa della città di Roma, con i pluviometri disponibili, la stazione selezionata e la griglia del RCA4.

## 6.3 Metodologia

Il metodo che presentiamo può essere riassunto in due macro-fasi: innanzitutto, sviluppiamo una relazione che collega ciascun campione di massimi annuali delle durate fisse (1, 3, 6, 12 e 24 ore, per un totale di cinque campioni) ai massimi annuali giornalieri derivati dal modello RCA4; in secondo luogo, utilizziamo i campioni di massimi annuali

derivati per il periodo 2006-2100 insieme ai massimi annuali registrati nel periodo 1970-2005, per costruire le curve IDF attraverso inferenza statistica.

Per costruire la relazione tra dati del pluviometro e del modello RCM, utilizziamo le osservazioni del periodo storico (1970-2005) per costruire campioni sintetici più lunghi. Prima, adattiamo la distribuzione Generalized Extreme Value (GEV) a ciascun campione dei pluviometri e del RCM, utilizzando il metodo dei momenti-L per stimare i parametri di distribuzione. Abbiamo scelto la distribuzione GEV in quanto è una delle distribuzioni più comuni per descrivere eventi estremi (Moccia et al., 2020). Una volta stimati i parametri di ciascun campione, generiamo 1000 valori casuali di probabilità e troviamo, per ciascun campione, il quantile associato a quei valori di probabilità invertendo la distribuzione GEV. Successivamente, per ciascun campione, selezioniamo 100 valori con la stessa probabilità e li utilizziamo per calibrare la relazione matematica tra i massimi annuali del pluviometro e i massimi annuali giornalieri dal RCM. Alla fine di questa fase, otteniamo quindi cinque diverse relazioni, ciascuna delle quali collega un campione di massimi annuali a durata fissa con il massimo giornaliero estratto dal modello RCA4. I restanti 900 valori dei campioni e i reali massimi annuali osservati vengono quindi utilizzati per convalidare le relazioni trovate. Infine, utilizziamo le relazioni trovate per ottenere i massimi annuali delle precipitazioni a durate fisse per il periodo 2006-2100, utilizzando i massimi annuali giornalieri dal RCM nello stesso periodo come input. La procedura viene ripetuta per entrambi gli scenari RCP.

Una volta ottenuti i massimi annuali per le durate fisse anche per gli scenari futuri, l'intero campione di massimi annuali dal 1970 al 2100 viene utilizzato per stimare i parametri delle curve IDF, che è data dalla formulazione:

$$i(d, T_R) = \frac{a(T_R)}{(b + d)^m}$$

dove  $i$  è l'intensità delle precipitazioni per una data durata  $d$  e periodo di ritorno  $T_R$ ,  $a$  è un parametro che dipende dal periodo di ritorno,  $b$  e  $m$  sono due parametri che dipendono dal rapporto tra massimi annuali orari e sottorari per la località di interesse. Poiché il rapporto tra precipitazioni orarie e sottorarie è conosciuto solo per il periodo storico, assumiamo che rimanga costante anche nelle proiezioni future. I parametri sono stimati seguendo Montesarchio et al. (2013), sia per le condizioni storiche che per le proiezioni future. Una volta ottenute le curve IDF per entrambi gli scenari futuri, vengono confrontate con quelle storiche.

## 6.4 Risultati e Conclusioni

Per tutti i campioni, la relazione che si è dimostrata più appropriata per descrivere il legame tra i massimi annuali del pluviometro e i massimi annuali giornalieri basati sul modello è un'equazione cubica, con parametri differenti in base al campione specifico

considerato. L'equazione risultante e i valori di convalida per la durata di 1 ora sono presentati nella Figura 6.2.

Le curve IDF ottenute considerando gli scenari di proiezione futura hanno mostrato un'intensità delle precipitazioni più elevata, per tutte le durate e tutti i periodi di ritorno analizzati, rispetto a quelle storiche. Nella Figura 6.3 presentiamo le differenze tra i valori di intensità delle precipitazioni calcolati considerando gli scenari futuri e quelli ottenuti solo con osservazioni storiche. Abbiamo scelto di presentare solo i periodi di ritorno fino a 100 anni, poiché la lunghezza del campione storico è ridotta e, quindi, fornisce stime incerte per periodi di ritorno più elevati. Come possiamo osservare, l'aumento dell'intensità delle precipitazioni cresce con il periodo di ritorno e passando da RCP 4.5 a RCP 8.5, come previsto poiché RCP 8.5 è lo scenario più critico. Inoltre, l'incremento dell'intensità delle precipitazioni è generalmente maggiore alle basse durate rispetto alle scale giornaliere, in accordo con studi precedenti.

In conclusione, secondo gli scenari futuri di cambiamento climatico, ci si aspetta un aumento dell'intensità delle precipitazioni, soprattutto per eventi con brevi durate. La conseguenza diretta dell'aumento dell'intensità delle precipitazioni potrebbe essere il fallimento delle opere idrauliche, soprattutto per quelle progettate per eventi a breve durata. Un esempio è dato dalle reti di drenaggio urbano, che di solito hanno tempi di risposta brevi e sono già oggi sfidate da eventi piovosi brevi e intensi. L'uso delle curve IDF corrette climaticamente per la progettazione di nuove opere potrebbe quindi contribuire a progettare nuove strutture resilienti e ad adattare quelle esistenti.

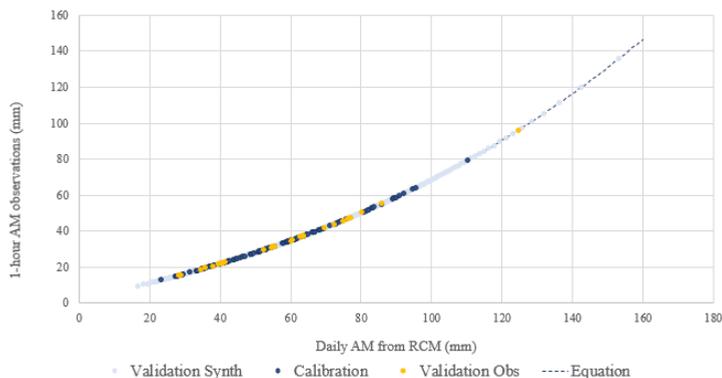


FIGURA 6.2. Esempio della relazione che collega i massimi annuali giornalieri del RCM e i massimi annuali di un'ora di durata osservati.

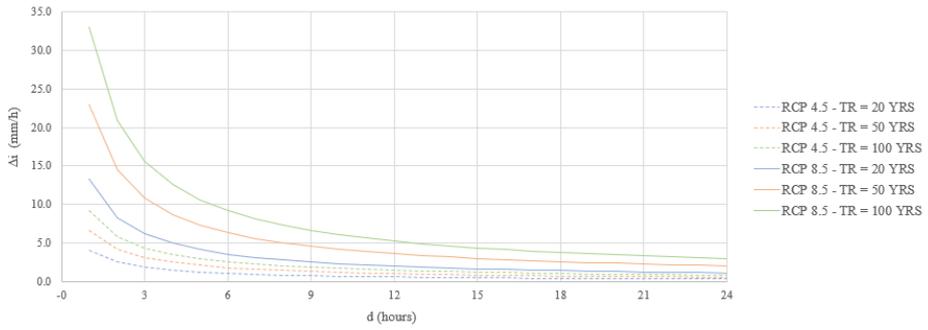


FIGURA 6.3. Differenze di intensità delle precipitazioni tra le curve IDF corrette climaticamente, per i periodi di ritorno di 20 anni (blu), 50 anni (arancione) e 100 anni (verde).

## Bibliografia

1. Bertini, C., Buonora, L., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F., "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site", *Water*. 12, 3028 (2020).
  2. Montesarchio, V., Napolitano, F., Rianna, M., Ridolfi, E., Russo, F., Sebastianelli, S., "Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation", *Nat. Hazards*. 75, (2015).
  3. Russo, F., Lombardo, F., Napolitano, F., Gorgucci, E., "Rainfall stochastic modeling for runoff forecasting", *Phys. Chem. Earth*. (2006).
  4. Mineo, C., Napolitano, F., "A technical note on short-duration rainfall in central Italy", *AIP Conf. Proc.*, 2018.
  5. Montesarchio, V., Napolitano, F., Russo, F., Spina, S., "IDF relationships for short duration rainfall", *AIP Conf. Proc.*, 2013.
  6. Cheng, L., Aghakouchak, A., "Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate", *Sci. Rep.* 4, (2014).
  7. Trenberth, K.E., "Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change", *Clim. Change*. 42, (1999).
  8. Latini, M., Neri, A., Moccia, B., Bertini, C., Russo, F., "On the predictability of monthly precipitation across the U.S. Midwest", *AIP Conf. Proc.*, 2020.
  9. Bonaccorso, B., Aronica, G.T., "Estimating Temporal Changes in Extreme Rainfall in Sicily Region (Italy)", *Water Resour. Manag.* 30, (2016).
- Moccia, B., Mineo, C., "A technical note on the influence of time-series length on the intensity-duration-frequency curves for Lazio region", *AIP Conf. Proc.*, 2020



APPENDICE 3 – Articolo in attesa di pubblicazione

## 7 Test di Diverse Relazioni KE-I per la Valutazione del Rischio di Erosione del Suolo ad Amato (Italia)

*Titolo: "Testing Different KE-I Relationships For The Assessment Of Soil Erosion Risk In Amato (Italy)"*

*Autori: Luca Buonora, Claudia Bertini, Mara Lucantonio, Sabrina Lanciotti, Fabio Russo*

**Abstract.** È ampiamente riconosciuto che l'energia cinetica (KE) sia uno dei principali descrittori dell'erosione del suolo. Tuttavia, è difficile trovare misurazioni dirette di KE. Per ovviare a questo problema, la KE viene solitamente stimata in modo indiretto utilizzando altre grandezze idrologiche (ad esempio, l'intensità delle precipitazioni). Le relazioni tra intensità delle precipitazioni e energia cinetica (KE-I) sono infatti disponibili per molti paesi in tutto il mondo. In questo studio miriamo a stimare la relazione KE-I più adatta per il bacino di Amato (sud-est dell'Italia) dati i rilevamenti dell'energia cinetica delle precipitazioni da un disdrometro ottico.

### 7.1 Introduzione:

Il fenomeno dell'erosione del suolo dovuta all'acqua comprende due agenti principali che causano il distacco e il trasporto delle particelle: il deflusso superficiale e l'impatto delle gocce di pioggia (Mineo et al., 2019). Nel primo processo, l'impatto delle gocce di pioggia sulla superficie provoca una dispersione di energia; per questo motivo, l'energia cinetica della pioggia è riconosciuta come un utile indicatore della capacità potenziale della pioggia di distaccare il suolo (Wischmeier et al., 1978; Salles et al., 2002). Inoltre, l'energia cinetica è necessaria per il calcolo del modello standard per la maggior parte delle valutazioni e pianificazioni dell'erosione a livello mondiale, che è il fattore erosivo delle precipitazioni R dell'Equazione Universale di Perdita del Suolo (R)USLE rivista (Renard et al., 1995; Mineo et al., 2020). Tuttavia, le misurazioni dirette di KE non sono comuni e una stima indiretta è l'approccio più comune per affrontare questa problematica (Mineo et al., 2020 (6)). La variabile idrologica più utilizzata per stimare indirettamente la KE è l'intensità delle precipitazioni.

Nella letteratura, sono disponibili diverse relazioni empiriche che collegano l'energia cinetica (KE) e l'intensità delle precipitazioni (cioè, KE-I), ognuna proposta per riflettere un particolare regime pluviometrico (Mineo et al., 2019). Le relazioni KE-I seguono generalmente due modelli principali: (i) un modello logaritmico senza limite superiore per la KE (Wischmeier et al., 1978; Zanchi & Torri 1980), e (ii) un modello esponenziale. Per lo Stato del Mississippi (Stati Uniti), Wishmeier e Smith (2) hanno proposto un

modello logaritmico con un'espressione condizionale, poiché hanno riscontrato che la KE non aumenta indefinitamente con l'intensità delle precipitazioni. Successivamente, McGregor e Mutchler (1976) hanno proposto per la stessa area un'equazione basata sul modello esponenziale (introdotto per la prima volta da Kinnel nel 1981). Zanchi e Torri (8) hanno proposto la prima relazione per l'Italia (calibrata con dati registrati a Firenze). Mineo et al. (7) hanno calibrato una nuova equazione basata sui dati di precipitazione e KE registrati a Roma. In questo lavoro ci proponiamo di identificare la migliore relazione KE-I per il bacino di Amato, dove è stato installato un disdrometro ottico e sono stati registrati sia l'intensità delle precipitazioni che i valori dell'energia cinetica.

## 7.2 Dataset e Caso di Studio

In questa analisi utilizziamo i dati sull'intensità delle precipitazioni e sull'energia cinetica registrati da un disdrometro ottico installato in Calabria (sud Italia, Figura 7.1(a)), specificamente nella città di Amato. Il regime pluviometrico dell'area di studio, che è mediterraneo, è fortemente influenzato dalla presenza del mare, il Tirreno sulla costa occidentale e lo Ionio sulla costa orientale (Greco et al., 2020). I dati registrati dall'strumento consistono in 138.010 minuti di osservazioni dal 16/04/2021 al 21/07/2021. Per ridurre gli errori e il bias delle variabili registrate, in accordo con (Mineo et al., 2019; Adirosi et al., 2013; Adirosi et al., 2018), consideriamo come valori di pioggia solo i minuti con almeno 10 gocce di pioggia e un'intensità minima delle precipitazioni di 0,5 mm/h. Dopo l'applicazione di questo filtro, durante il periodo di osservazione, si sono verificati 2.346 minuti di precipitazioni, con un'intensità che va da 0,5 a 194,2 mm/h. La Figura 7.1(b) mostra le precipitazioni a scala mensile e giornaliera.

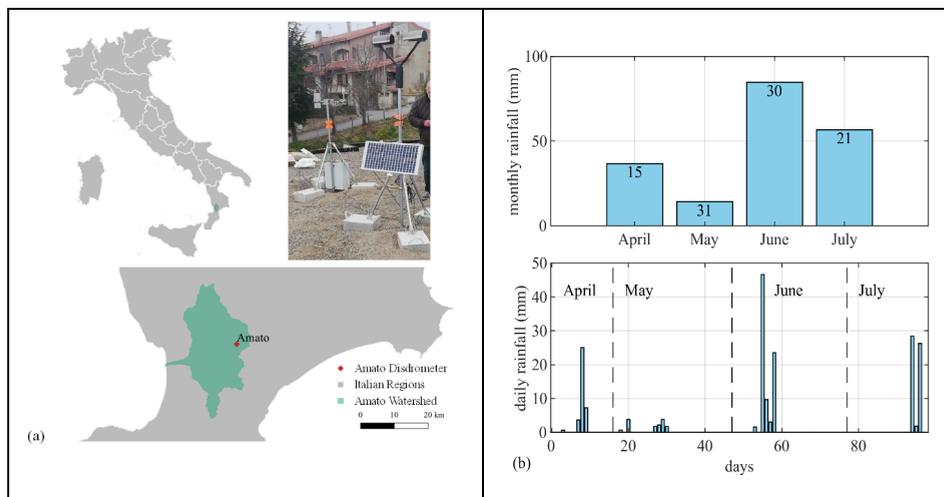


Figura 7.1. (a) Posizione e foto del disdrometro nel bacino idrografico di Amato; (b) serie temporali mensili e giornaliere registrate dalla stazione.

Per definire quale delle relazioni matematiche che legano l'intensità delle precipitazioni e l'energia cinetica sia la migliore per descrivere il nostro caso di studio, selezioniamo solo i minuti di precipitazione appartenenti a singoli eventi definiti come potenzialmente erosivi. Per identificare tali eventi, utilizziamo il "tempo minimo tra gli arrivi" (MIT), cioè il periodo di siccità che intercorre tra due eventi di precipitazione consecutivi. Secondo la classificazione proposta da Wischmeier e Smith (1978), un evento di pioggia può essere considerato potenzialmente erosivo se si verifica una delle seguenti condizioni: (i)  $H_{ev} > 12,7$  mm in 6 ore, oppure (ii)  $H_{ev} > 6,35$  mm in 15 minuti, dove  $H_{ev}$  è la profondità cumulativa delle precipitazioni dell'evento. Applicando queste condizioni, identifichiamo 5 diversi eventi potenzialmente erosivi, comprendenti 1.847 valori di precipitazione. Raggruppiamo quindi questi 5 eventi in classi di intensità delle precipitazioni (con una larghezza di  $1 \text{ mmh}^{(-1)}$ ) e stimiamo l'energia cinetica media ( $KE_{media}$ ) e l'intensità media delle precipitazioni ( $I_m$ ) per ogni classe.

### 7.3 Metodologia

L'analisi dell'erosione del suolo consiste nel determinare l'estensione della perdita potenziale di suolo in relazione alla caratteristica energetica delle precipitazioni. Molto spesso le misurazioni dirette dell'energia cinetica non sono disponibili, ed è necessario ricorrere a una stima indiretta. Questa stima può essere fatta a partire dall'intensità delle precipitazioni utilizzando formulazioni empiriche. La relazione tra energia cinetica e intensità delle precipitazioni è quindi uno strumento fondamentale per prevedere il rischio di erosione del suolo. Diverse equazioni sono disponibili in letteratura, in questo lavoro testiamo 4 diverse relazioni KE-I per il nostro caso di studio (Tabella 7.1).

Tabella 7.1. KE-I formulazioni testate in questo studio

Wischmeier e Smith (WS) [2]	$KE_{mm(WS)} = \{11.9 + 8.73 \log_{10}(I), I \leq 76 \text{ mm/h} \text{ } 28.3, I > 76 \text{ mm/h} \}$	(1)
Zanchi e Torri (ZT) [8]	$KE_{mm(ZT)} = 9.81 + 11.25 \log_{10}(I)$	(2)
McGregor et al. (1995) (MG) [9]	$KE_{mm(MG)} = 29 [1 - 0.72 \exp(-0.082I)]$	(3)
Mineo et al. (2019) (NF) [7]	$KE_{mm(NF)} = 31.75 [1 - 0.64 \exp(-0.05I)]$ , up to $I = 232 \text{ mm/h}$	(4)

Nella Tabella 7.1, per tutte le equazioni,  $KE_{mm}$  indica il contenuto di energia cinetica della pioggia, o energia per unità di volume, ed è espressa in  $\text{Jm}^{(-2)} \text{ mm}^{(-1)}$ ; mentre  $I$  è l'intensità delle precipitazioni. Per valutare quale delle relazioni KE-I sia la migliore nel descrivere i nostri dati registrati, consideriamo i 3 errori forniti nella Tabella 7.2.

Tabella 7.2. Formulazione degli errori, dove  $KE_{(E),i}$  è il valore empirico dell'energia cinetica per ogni classe di intensità e  $KE_{(NF),i}$  è il valore dell'energia cinetica stimato con le Eq. (1-4).

Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	$MAPE = \sum_{i=1}^N \left  \frac{KE_{(E),i} - KE_{(NF),i}}{KE_{(E),i}} \right  \frac{100\%}{N}$	(5)
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (KE_{(E),i} - KE_{(NF),i})^2}{N}}$	(6)
Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)	$NRMSE = \frac{RMSE}{\overline{KE_{(E)}}}$	(7)

### 7.4 Risultati e Conclusioni

In questo studio miriamo a identificare le relazioni KE-I più adatte per il caso di studio di Amato. Nella Figura 7.2 mostriamo il confronto tra coppie di valori di  $KE_{mean}$  e  $I_M$  e coppie di KE-I predette dalle relazioni WS, ZT, MG e NF (Eq. (1-4)).

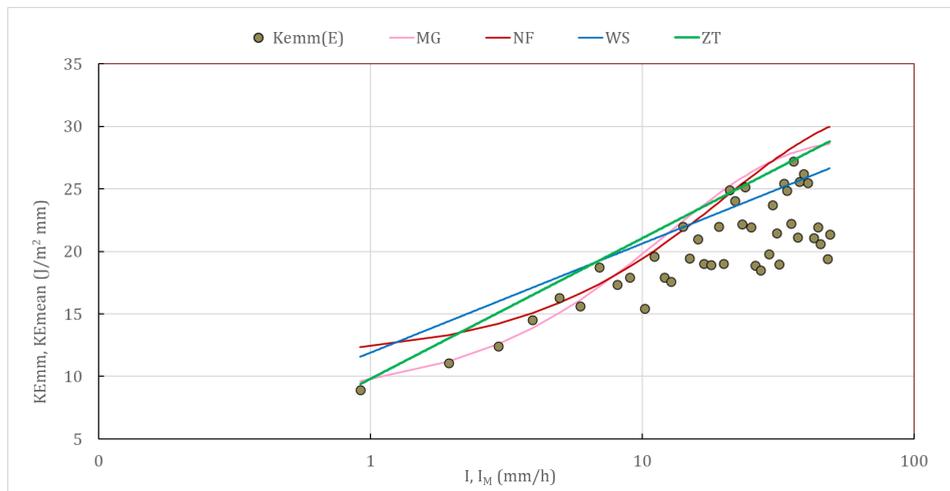


Figura 7.2. Confronto tra le coppie osservate di  $KE_{mean}$ - $I_M$  e le KE-I predette dalle Eq. (1-4). I risultati in termini di errori sono forniti nella Tabella 7.3: la relazione proposta da Wischmeier e Smith (2) risulta il candidato migliore nel descrivere i dati registrati dal disdrometro di Amato.

Tabella 7.3. Valutazione degli errori tra le coppie osservate di KE<sub>mean-IM</sub> e le KE-I predette dalle Eq. (1-4). La percentuale di MAPE è relativa ai 25°, 50°, 75° e 95° percentili.

Error	Unit	WS	ZT	MG	NF
MAPE <sub>25%</sub>	%	5.89	8.19	5.94	7.21
MAPE <sub>50%</sub>	%	14.11	15.81	12.61	13.74
MAPE <sub>75%</sub>	%	21.57	25.10	25.53	25.76
MAPE <sub>95%</sub>	%	27.54	33.22	36.01	35.81
max KEmm	J/(m <sup>2</sup> mm )	26.64	28.81	28.62	29.98
min KEmm	J/(m <sup>2</sup> mm )	11.57	9.38	9.63	12.34
RMSE	J/(m <sup>2</sup> mm )	4.40	4.40	4.54	4.74
NRMSE	-	0.17	0.22	0.22	0.24

Possiamo concludere che l'analisi dei dati del disdrometro installato ad Amato ci ha permesso di studiare le caratteristiche energetiche di 5 eventi meteorici potenzialmente erosivi e di valutare l'adeguatezza di quattro relazioni KE-I. I risultati preliminari di questo studio suggeriscono l'uso della relazione di Wischmeier e Smith (2) per valutare l'energia cinetica data l'intensità delle precipitazioni in assenza di valori registrati. È chiaro che lo studio dell'erosione, e in generale di tutti i fenomeni legati alle quantità idrologiche e meteorologiche, non può basarsi su un campione ridotto. Per questo motivo, sarebbe interessante continuare il monitoraggio nella zona, in modo da poter definire una relazione KE-I per il bacino fluviale di Amato.

## Bibliografia

1. Mineo, C., Ridolfi, E., Bertini, C., Napolitano, F., "Kinetic energy and rainfall intensity relationships: A review", AIP Conference Proceedings. 2116, 1–5 (2019).
2. Wischmeier, W.H., Smith, D.D., Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning., Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.  
Salles, C., Poesen, J., Sempere-Torres, D., "Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity", Journal of Hydrology. 257, 256–270 (2002).
3. Renard, K.G., Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), United States Government Printing, 1997.
4. Mineo, C., Ridolfi, E., Moccia, B., Napolitano, F., "Mapping Monthly Rainfall Erosivity for the Lazio Region (Italy)", AIP Conference Proceedings. 2293, 250004 (2020).
5. Mineo, C., Ridolfi, E., Moccia, B., Napolitano, F., Russo, F., "On the reliability of gamma distributed dsds for modelling kinetic energy of rainfall\*", Irrigation and Drainage. 69, 1176–1191 (2020).
6. Mineo, C., Ridolfi, E., Moccia, B., Russo, F., Napolitano, F., "Assessment of Rainfall Kinetic-Energy-Intensity Relationships", Water. 11, 1994 (2019).
7. Zanchi, C., Torri, D., Evaluation of rainfall energy in central Italy, 1980.
8. McGregor, K.C., Bingner, R.L., Bowie, A.J., Foster, G.R., "Erosivity index values for northern Mississippi", Transactions of the ASAE. 38, 1038–1047 (1995).
9. Kinnell, P.I.A., "Rainfall intensity-kinetic energy relationships for soil loss prediction", Soil Science Society of America Journal. 45, 153–155 (1981).
10. Greco, A., De Luca, D.L., Avolio, E., "Heavy precipitation systems in Calabria region (southern Italy): High-resolution observed rainfall and large-scale atmospheric pattern analysis", Water (Switzerland). 12, (2020).
11. Adirosi, E., Baldini, L., Lombardo, F., Russo, F., Napolitano, F., "Comparison of different fittings of experimental DSD", AIP Conference Proceedings. 1558, 1669–1672 (2013).
12. Adirosi, E., Roberto, N., Montopoli, M., Gorgucci, E., Baldini, L., "Influence of disdrometer type on weather radar algorithms from measured DSD: Application to Italian climatology", Atmosphere. 9, (2018).

APPENDICE 4 – Articolo in attesa di pubblicazione

## 8 Valutazione della Sicurezza dei Ponti: Analisi e Criticità delle Linee Guida per la Gestione del Rischio

*Titolo: "Safety Assessment of Bridges: Analysis and Criticalities of the Guidelines for Risk Management"*

*Autori: Luca Buonora, Benedetta Moccia, Elena Ridolfi, Fabio Russo and Francesco Napolitano*

**Abstract.** Il territorio italiano è caratterizzato da una elevata fragilità in termini di rischio idrogeologico. Pertanto, il patrimonio strutturale nazionale necessita dell'attuazione di piani di valutazione del rischio. In particolare, l'interazione tra infrastrutture e acqua è stata identificata come un fattore significativo che contribuisce ai recenti crolli e ai fallimenti. Le linee guida nazionali esistenti per valutare la vulnerabilità delle infrastrutture in Italia potrebbero non riflettere accuratamente le effettive condizioni idrauliche. Questo studio mira a valutare i punti di forza e le limitazioni delle analisi condotte secondo le linee guida e condotte su un vasto insieme di dati comprendente 51 ponti situati in Italia. Sono stati identificati problemi critici comuni che potenzialmente portano a stime errate del livello di rischio associato. Una valutazione errata del rischio può portare a una cattiva allocazione di tempo e risorse finanziarie. Una delle principali sfide risiede nella difficile tracciabilità della documentazione di progettazione originale, che influisce negativamente sul processo di valutazione e può portare a una sovrastima della vulnerabilità sia all'erosione generalizzata che a quella localizzata. Altre sfide significative includono la mancanza di indicazioni specifiche per casi particolari e le difficoltà nell'accesso ai ponti (ad esempio, la morfologia del terreno o la fitta vegetazione nelle aree di pianura alluvionale). Sebbene le linee guida forniscano un efficace quadro per l'analisi del rischio e la prevenzione dei danni, dovrebbero essere utilizzate in modo critico per individuare e affrontare eventuali carenze. Questa valutazione può portare a un'integrazione della metodologia e quindi delle linee guida, garantendo un miglioramento dell'affidabilità e della facilità di applicazione. Il nostro studio presenta metriche statistiche sulla vulnerabilità delle infrastrutture stimata in base alle linee guida. Queste analisi hanno identificato con successo diversi punti di forza e aspetti critici legati alla valutazione del rischio idraulico basata sull'attuazione delle linee guida, lasciando spazio per opportunità di miglioramento.

## 8.1 Introduzione

I ponti svolgono un ruolo fondamentale all'interno dei sistemi di trasporto. Sebbene essenziali per il benessere delle comunità dal punto di vista sociale ed economico, una mancanza di adeguata manutenzione e supervisione può portare a un graduale deterioramento delle loro strutture. L'analisi dei crolli dei ponti a livello mondiale sottolinea la significativa suscettibilità dei ponti sia a fattori legati all'uomo, come progettazioni inadeguate, ispezioni e manutenzioni insufficienti, sia a fattori naturali (Buratti et al., 2021). In particolare, le azioni idrauliche sui ponti sono considerate le principali cause scatenanti di danni e crolli (Ballio et al., 2018; Pregolato et al., 2022). I piani di gestione e manutenzione dei ponti sono quindi cruciali per migliorare la sicurezza degli utenti e ridurre gli impatti sociali ed economici legati ai loro fallimenti.

L'Italia mostra una considerevole suscettibilità alle instabilità idrogeologiche dovute a caratteristiche sfavorevoli del terreno geologico e geomorfologico e a interventi umani. Inoltre, la maggior parte del patrimonio italiano di ponti e viadotti è molto datato (Fattorini et al., 2022). Questi fattori sottolineano la necessità di valutazioni complete del rischio delle infrastrutture per mitigare proattivamente potenziali fonti di danni. Le azioni e le analisi preventive dovrebbero comprendere tutte le aree e le strutture a rischio concepibili. Dopo il crollo del ponte Morandi nella regione Liguria (nord-ovest Italia), nel 2020 il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici italiano ha pubblicato le "Linee guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti" (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti CSLP, 2020) per garantire un livello di sicurezza standardizzato alla rete nazionale di trasporti (Di Sano et al., 2023). Le Linee Guida Italiane (IG), con un metodo multi livello basato sulla valutazione del rischio e della classe di attenzione, mirano a valutare il livello di rischio dei ponti esistenti per organizzare attività di monitoraggio e manutenzione.

Questo studio si concentra esclusivamente sul rischio idraulico. In particolare, miriamo a evidenziare sia i punti di forza che le limitazioni della definizione della Classe di Attenzione Idraulica (HAC) basata su statistiche derivate dall'analisi di 51 ponti situati nel centro-sud Italia. Infatti, riteniamo che l'HAC possa non sempre riflettere accuratamente le reali condizioni dei ponti. Inoltre, la stima di questi parametri è fortemente influenzata dalla ispezionabilità della struttura e dalla presenza o assenza di progetti strutturali (non disponibili nel 98% dei casi). Le strutture in fase di analisi sono state classificate definendo una Classe di Attenzione (AC), che ha permesso di individuare alcuni aspetti critici nell'applicazione delle linee guida fornite dal ministero. Questi problemi critici sono stati riscontrati in tutte le valutazioni condotte e, in alcuni casi, potrebbero essere stati responsabili di possibili inaccurately nei livelli di rischio associati stimati. Anche se le fasi che portano alla determinazione dell'AC non rientrano nella categoria delle valutazioni approfondite e sono semplicemente necessarie per guidare azioni successive, un'esecuzione errata di queste fasi potrebbe portare a investimenti devianti in termini di

tempo e finanziamenti. Pertanto, pur cercando di mantenere un livello appropriato di semplicità, devono essere eseguite con la massima precisione.

## 8.2 Classe di Attenzione Idraulica (HAC) basata sulle IG

Questo breve paragrafo riassume gli aspetti principali legati alla valutazione dell'HAC e degli AC parziali per ciascun fenomeno idraulico separato, per ulteriori dettagli si prega di fare riferimento alle linee guida del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti CSLP (2020).

Il procedimento a più livelli delineato nelle IG riguarda sei livelli di analisi. Il Livello 0 riguarda la raccolta di informazioni e dati (ad esempio, censimenti, geolocalizzazione e, se disponibili, documentazione del progetto), e il Livello 1 le ispezioni in situ. Il Livello 2 si concentra sulla classificazione basata sul rischio, che si articola in quattro tipi di rischio, come ad esempio la struttura-fondazione, sismico, frana e idraulico. Nel Livello 3, le strutture con criticità vengono ulteriormente indagate con valutazioni di sicurezza semplificate o accurate (Livello 4). Il Livello 5 riguarda un'analisi della resilienza della rete di trasporto. Pertanto, la classificazione del rischio dei ponti è gestita nel Livello 2. La fase iniziale comporta l'assegnazione di una Classe di Attenzione (AC) a ciascun tipo di rischio, quindi, tutte le AC vengono combinate per derivare una AC globale, che determina la classificazione finale del rischio. Ci sono in totale cinque AC: Bassa, Media-Bassa, Media, Media-Alta e Alta. L'AC globale detta le azioni necessarie per ciascun ponte all'interno di un portfolio designato, come ad esempio il requisito per valutazioni di sicurezza o la necessità di raccogliere dati dettagliati attraverso ispezioni o Monitoraggio Strutturale della Salute. In questo studio ci concentriamo esclusivamente sull'applicazione delle IG al fine di valutare il rischio idraulico mediante la valutazione della Classe di Attenzione Idraulica (HAC). La valutazione dell'HAC comporta la valutazione di tre fenomeni idraulici specifici e dei relativi AC relativi a: insufficienza di distanza verticale minima, erosione generale e locale.

Si noti che in questo studio abbiamo utilizzato il termine "erosione generalizzata" come traduzione diretta di "generalized scour" utilizzato nelle IG, anche se specificamente denota il fenomeno di erosione di contrazione (Di Sano et al., 2023; Pregnotato et al., 2022). Il processo di stabilire una AC completa per l'erosione coinvolge il combinare le AC per sia l'erosione locale che quella generalizzata. L'ultima Classe di Attenzione Idraulica (HAC) è determinata scegliendo la AC più critica tra distanza verticale insufficiente e erosione. L'assegnazione delle classi di attenzione per vari fenomeni legati all'idraulica implica l'allocazione di AC parziali per pericolo, vulnerabilità ed esposizione. Per valutare il pericolo, la AC parziale per la distanza verticale minima è determinata esaminando la distanza tra il sottopasso del ponte e il livello dell'acqua corrispondente a un periodo di ritorno specifico. La AC parziale per l'erosione generalizzata considera il rapporto tra la porzione della larghezza del letto del fiume occupata dal ponte (Ca) o la porzione della

larghezza della pianura alluvionale occupata dal ponte ( $C_g$ ) e le larghezze complessive del letto del fiume e della pianura alluvionale, rispettivamente. Per l'erosione locale, la AC parziale è determinata dal rapporto tra la profondità dell'erosione e la profondità della fondazione (assunta come 2m se sconosciuta). La valutazione della vulnerabilità dipende dal tipo di fondazione, dalla geometria del letto del fiume e dalla quantità di sedimenti/debris/materiale galleggiante. Gli operatori si riferiscono alle tabelle delle IG per verificare condizioni come il deposito di sedimenti, l'erosione del letto del fiume, il trasporto di materiale vegetale di grandi dimensioni, le dimensioni del bacino idrografico, la distanza verticale insufficiente e l'esistenza di dispositivi di protezione dall'erosione. La valutazione dell'esposizione considera principalmente le conseguenze indirette legate alla perdita di funzionalità del ponte e ai danni ambientali derivanti dal crollo di un ponte ed è equivalente all'esposizione valutata per il rischio sismico.

### 8.3 Risultati e Discussione

Ricordiamo che in questo studio applichiamo le IG a 51 ponti situati nel Centro-Sud Italia per determinare l'HAC. Inizialmente determiniamo l'AC per i tre fenomeni idraulici, ossia la distanza minima verticale, l'erosione generalizzata e l'erosione locale (Figura 8.1(a)), quindi determiniamo l'HAC e lo confrontiamo con l'AC globale stimato come combinazione di tutti e quattro i rischi, ossia struttura-fondazione, sismico, frana e idraulico (Figura 8.1(b)).

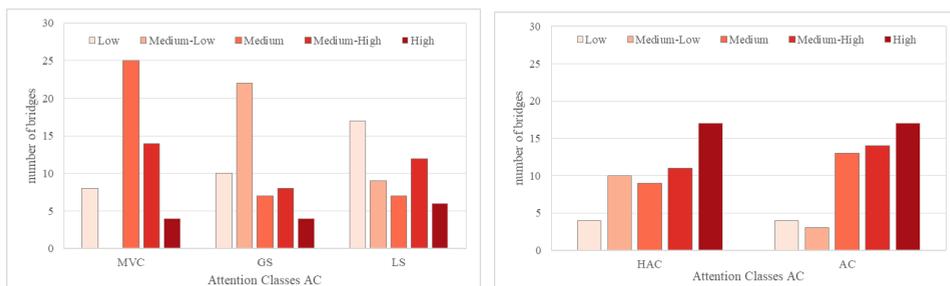


Figura 8.1. (a) Classi di Attenzione (AC) per ciascuno dei tre fenomeni idraulici, ossia distanza minima verticale, erosione generalizzata e erosione localizzata; (b) Classe di Attenzione Idraulica (HAC) e Classe di Attenzione Finale dopo la combinazione di tutti e 4 i potenziali rischi.

La combinazione dei tre AC idraulici porta all'attribuzione di un AC Alto a 17 ponti e un Medio-Alto a 11 ponti. Nella Figura 8.1(b) osserviamo che dopo aver combinato i quattro rischi, la maggior parte dei ponti analizzati appartiene agli AC Medi (13), Medio-Alti (14) e Alti (17). È interessante investigare ulteriormente come l'HAC si trasforma quando combinato con gli altri 3 rischi (Figura 8.2).

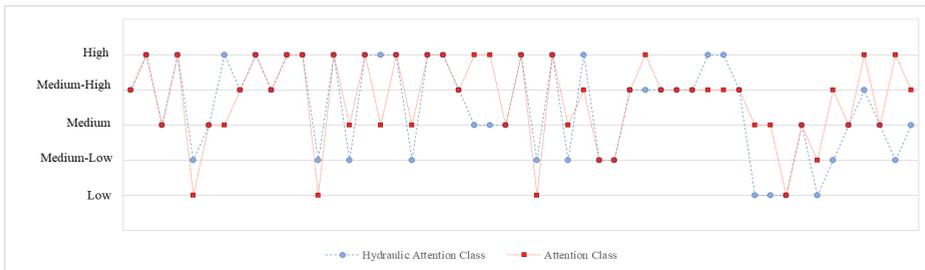


Figura 8.2. Differenze nell'attribuzione della Classe di Attenzione Idraulica e la Classe di Attenzione finale come combinazione dei quattro rischi.

Nella maggior parte dei casi (30 su 51), la AC globale coincide con la HAC, mentre per 13 ponti osserviamo un aumento nella AC globale rispetto alla HAC (il che significa che il ponte ha una AC peggiore per almeno uno degli altri rischi). Per i restanti 8 ponti notiamo che c'è una diminuzione della AC globale rispetto alla HAC. Ciò è dovuto alla combinazione della HAC con le altre AC per rischio di frane, fondazione-struttura o sismico. In questo senso, Santarsiero et al. (2021) hanno evidenziato che spesso il rischio di fondazione-struttura ha il maggiore impatto nel determinare la AC globale. Tuttavia, soprattutto per quei ponti con una HAC alta, questa riduzione della AC globale si riflette poi in un abbassamento nell'assegnazione di interventi prioritari. Ciò ci porta chiaramente ad esplicitare le criticità nell'applicazione delle IG. Infatti, riteniamo che se a un ponte viene assegnata una HAC alta per uno dei quattro rischi testati, la AC finale dovrebbe essere inevitabilmente alta. Inoltre, come anche discusso nell'Introduzione, i danni e i guasti ai ponti sono attribuiti principalmente ad azioni idrauliche; quindi, sottovalutare la AC finale potrebbe comportare conseguenze gravi.

Altri aspetti che desideriamo sottolineare riguardano la definizione della HAC e dei suoi componenti. A partire dal Livello 0 delle IG, il primo problema riguarda l'accessibilità ai progetti esecutivi. Infatti, in questo studio abbiamo avuto accesso ai progetti di costruzione solo per il 2% dei ponti analizzati. L'assenza di tali documentazioni influisce negativamente sulla valutazione di parametri che sono cruciali per la valutazione della AC di gran parte dei fenomeni idraulici (ad esempio, il rischio di erosione localizzata, la vulnerabilità all'erosione generalizzata e localizzata). Infatti, la maggior parte di questi parametri è puramente geometrica e, senza progetti di costruzione, devono essere derivati attraverso ispezioni in situ o stimati in modo qualitativo. Ad esempio, alcuni dettagli costruttivi (come la profondità della fondazione) sono difficili da stimare e vengono utilizzati i valori suggeriti dalle IG. A tal proposito, l'accessibilità per l'ispezione dei ponti (Livello 1 delle IG) non è sempre facile, a causa della presenza di proprietà private, scarsa manutenzione della vegetazione e scarichi consistenti. In questo contesto, sarebbe particolarmente utile avere una figura professionale competente in loco per ciascun dominio di rischio al fine di raccogliere non solo documentazione generale, ma anche informazioni specifiche richieste per diversi tipi di rischio. Per il rischio idraulico, sarebbe

utile ottenere informazioni sulle aree alluvionali e/o sulla larghezza del letto del fiume, così come sulle altitudini delle sponde, il deflusso e la velocità del flusso.

Tutti i problemi riscontrati nei primi due livelli influenzano anche la stima dei parametri necessari per valutare la AC del rischio idraulico. Una delle principali criticità che osserviamo nella valutazione del rischio idraulico è la dimensione del bacino. È infatti cruciale nella valutazione della AC di vulnerabilità per la distanza minima verticale: i ponti situati su un bacino con una dimensione inferiore a 100 km<sup>2</sup> soddisfano 1 delle 3 condizioni per avere una AC medio-alta. Sebbene sia risaputo che un bacino di piccole dimensioni possa rispondere rapidamente a eventi estremi, è altrettanto importante considerare altre caratteristiche, come la morfologia del bacino e il tempo di concentrazione, che influenzano il comportamento del deflusso massimo. L'area del bacino, insieme alla precipitazione massima annua di 24 ore, viene utilizzata anche nell'equazione di Forti (Silva et al., 2021) per determinare il deflusso superficiale (per aree di bacino inferiori a 1000 km<sup>2</sup>). Anche questo aspetto può essere messo in discussione, poiché su bacini non monitorati l'incertezza legata al metodo di regionalizzazione nella stima della quantità di precipitazione è molto alta. Inoltre, i bacini con dimensioni comprese tra 100 e 500 km<sup>2</sup> non hanno peso nella valutazione della AC, poiché non compaiono nei casi scenari proposti dalle IG. In questo studio abbiamo anche trovato casi particolari ricorrenti che non sono considerati all'interno delle IG. Un esempio è quando i piloni e/o i sostegni sono posizionati all'interno del letto del fiume: in questo caso riteniamo che il ponte dovrebbe cadere almeno in una AC media, indipendentemente dai rapporti Ca e Cg. Lo stesso dovrebbe essere valido quando i piloni e/o i sostegni si trovano in aree alluvionali mappate dai Piani di Gestione del Rischio di Alluvioni (FRMP). La presenza di un pilone nel letto del fiume o in un'area alluvionale provoca sempre una restrizione del flusso regolare, portando a problemi di erosione indipendentemente dalla larghezza del fiume stesso. Un altro esempio non trattato riguarda i ponti vicini a fiumi canalizzati. Infatti, in assenza di manutenzione regolare o in presenza di ostacoli al libero deflusso, un ostacolo può causare un aumento del livello dell'acqua a monte del tratto canalizzato, con conseguenti condizioni critiche per il fenomeno dell'innalzamento (e quindi per la valutazione della distanza minima verticale).

## 8.4 Conclusioni

In questo studio forniamo i risultati dell'applicazione delle "Linee guida per la classificazione e la gestione del rischio, la valutazione della sicurezza e il monitoraggio dei ponti esistenti" italiani a 51 ponti situati nel Centro-Sud Italia. Concentrandoci sul rischio idraulico, mostriamo le parziali Classi di Attenzione per le tre principali azioni idrauliche, ovvero la distanza minima verticale, l'erosione generalizzata e localizzata, che combinate insieme forniscono la Classe di Attenzione Idraulica. È emerso che la maggior parte dei ponti analizzati appartiene a classi di attenzione da Media ad Alta quando si tratta di Rischio Idraulico. Confrontiamo quindi la Classe di Attenzione Idraulica con la

classificazione globale utilizzata per la prioritizzazione delle azioni di intervento. La classificazione globale è il risultato della combinazione dei quattro diversi rischi trattati nelle LG (struttura-fondazione, sismico, frana e idraulico). Osserviamo che per più della metà dei ponti, la classificazione globale coincide con la Classe di Attenzione Idraulica. Tuttavia, per 8 ponti notiamo una riduzione della classificazione globale rispetto alla HAC, portando a una sottostima del livello di attenzione del ponte. Questo è critico soprattutto perché le azioni idrauliche sono la causa scatenante dei cedimenti dei ponti (Biscarini et al., 2021).

Le linee guida sono certamente un modo eccellente e facile da usare per affrontare l'analisi del rischio, la prevenzione dei danni e garantire gli adeguati standard di sicurezza delle strutture esistenti. Allo stesso tempo, devono essere utilizzate in modo critico per individuare potenziali deficienze che possono essere adeguatamente integrate per garantire una metodologia più affidabile. Queste analisi preliminari hanno permesso di individuare punti di forza ma anche criticità legate all'applicabilità delle LG, specialmente per il rischio idraulico.

## **8.5 Ringraziamenti**

Questo studio è stato sostenuto da FABRE, il Consorzio di ricerca per la valutazione e il monitoraggio di ponti, viadotti e altre strutture ([www.conorziofabre.it/en](http://www.conorziofabre.it/en)), nell'ambito delle attività del programma di ricerca FABRE-ANAS 2021-2024. Le opinioni espresse nel presente lavoro non riflettono necessariamente il punto di vista del finanziatore.

## Bibliografia

1. Buratti, G., Celati, S., Cosentino, A., Gaudio, D., Mazzatura, I., Morelli, F., Salvatore, W., 2021. The New Guidelines of Italian Ministry of Infrastructures for the Structural Risk Classification of Existing Bridges: Genesis, Examples of Application and Practical Considerations, in: Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures: EUROSTRUCT 2021. Springer Nature, pp. 835–844. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4\\_95](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91877-4_95)
2. Ballio, F., Ballio, G., Franzetti, S., Crotti, G., Solari, G., 2018. Actions monitoring as an alternative to structural rehabilitation: Case study of a river bridge. *Struct. Control Heal. Monit.* 25, 1–22. <https://doi.org/10.1002/stc.2250>
3. Pregolato, M., Giordano, P.F., Panici, D., Prendergast, L.J., Limongelli, M.P., 2022. A comparison of the UK and Italian national risk-based guidelines for assessing hydraulic actions on bridges. *Struct. Infrastruct. Eng.* 1–14. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2081709>
4. Fattorini, F., Salvatore, W., Renzi, E., Tamasi, G., 2022. Application to the territorial authorities of the “Guidelines for the classification and management of risk, for the evaluation of safety and for the monitoring of existing bridges”. The case study of the Municipality of Rome. *Procedia Struct. Integr.* 44, 689–696. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.090>
5. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti CSLP, 2020. Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza ed il Monitoraggio dei Ponti Esistenti.
6. Di Sano, S., Costa, G., Giordano, P.F., Pregolato, M., Limongelli, M.P., 2023. Multi-risk assessment for bridges the application of the Italian Guidelines. *ce/papers* 6.
7. Santarsiero, G., Masi, A., Picciano, V., Digrisolo, A., 2021. The Italian guidelines on risk classification and management of bridges: Applications and remarks on large scale risk assessments. *Infrastructures*. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080111>
8. Silva, A., Gonçalves, L., Moura, A., Lousada, S., Gouveia, J., Camacho, R., 2021. Flood Hazard Assessment in Madeira (Portugal) – The Case Study of Machico. *Am. J. Water Sci. Eng.* 7, 1. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20210701.11>
9. Biscarini, C., Di Francesco, S., Casadei, S., Venturi, S., Manciola, P., 2021. Vulnerability of hydraulic constructions in flood-prone agricultural areas. *Water (Switzerland)* 13. <https://doi.org/10.3390/w13111549>
10. Samela, C., Carisi, F., Domeneghetti, A., Petrucelli, N., Castellarin, A., Iacobini, F., Rinaldi, A., Zammuto, A., Brath, A., 2023. A methodological framework for flood hazard assessment for land transport infrastructures. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 85, 103491. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103491>

APPENDICE 5 – Articolo in attesa di pubblicazione

## 9 Analisi Preliminare sull'Accuratezza dei Dati per le Misure di Pioggia tramite IoT

*Titolo: "A Preliminary Analysis On Data Accuracy For IoT Rainfall Measurements"*

*Autori: Benedetta Moccia, Luca Buonora and Francesco Napolitano*

**Abstract.** Le precipitazioni sono una delle variabili idrometeorologiche più difficili da misurare a causa della loro elevata variabilità nello spazio e nel tempo. La rete di pluviometri è il metodo tradizionale più antico per raccogliere i dati puntuali sulle precipitazioni. Tuttavia, ottenere serie temporali lunghe per stime affidabili delle precipitazioni potrebbe essere complicato, e le stazioni dei pluviometri non sono distribuite uniformemente in tutto il globo, risultando in vaste aree non campionate. Pertanto, le informazioni sulle precipitazioni sono spesso ottenute tramite osservazioni basate su satellite e dataset radar. In questo lavoro analizziamo l'affidabilità di una delle novità nel monitoraggio dei dati a scopo idrologico. Con l'avvento dell'Internet delle cose (IoT), l'ultima generazione di misurazioni delle precipitazioni è rappresentata dalle Stazioni Meteorologiche Personali (PMS) che forniscono automaticamente dati quasi in tempo reale su piattaforme online. La domanda che sorge normalmente è: le stazioni sono abbastanza affidabili per ottenere stime delle precipitazioni idonee per la modellazione idrologica? In questo lavoro effettuiamo un'analisi preliminare testando le prestazioni di una PMS Netatmo situata a Roma, confrontata con un pluviometro gestito dalla Protezione Civile Italiana. Questa analisi preliminare evidenzia il potenziale di questa nuova frontiera delle misurazioni, che, senza alcuna correzione, fornisce risultati promettenti per le precipitazioni registrate su scala temporale giornaliera.

### 9.1 Introduzione

Nonostante i suoi innumerevoli benefici, le precipitazioni possono anche produrre impatti drammatici, come siccità e inondazioni, che ogni anno causano perdite di vite umane, distruzione di aree urbanizzate, infrastrutture e colture, e miliardi di euro di danni in tutto il mondo. Lo sviluppo di piani di mitigazione è fondamentale per contenere gli impatti di questi eventi catastrofici e richiede previsioni affidabili dei valori delle precipitazioni basate su dati storici osservati. Attualmente, le fonti più comuni di dati sulle precipitazioni sono fornite dalla rete di pluviometri, dai radar e dai satelliti (Kidd et al., 2017). Tuttavia, negli ultimi anni, anche il monitoraggio meteorologico beneficia della diffusione dell'IoT (Fadhel et al., 2019). Infatti, grazie alla convenienza economica, alla facilità d'uso e alla possibilità di avere dati in tempo reale direttamente online, il numero di stazioni meteorologiche personali (PMS) sta crescendo significativamente in tutto il mondo. Queste stazioni funzionano con IoT basato sul crowdsourcing dei dati e sono sviluppate

per condividere le condizioni meteorologiche locali con il contributo dei cittadini. Il grande potenziale del crowdsourcing come fonte di dati climatici è fortemente mitigato dalle preoccupazioni sulla loro qualità (Muller et al., 2015), ma il vantaggio di avere misurazioni ad alta risoluzione (o osservazioni in aree attualmente non campionate) non può essere ignorato. Tra le piattaforme di PMS più popolari c'è Netatmo, i cui strumenti comunicano con un modulo interno (posizionato a una distanza massima di 100 m) e trasmettono i dati ad esso attraverso la combinazione delle tecnologie Bluetooth e WiFi.

Nonostante il grande potenziale di questa nuova rete di monitoraggio, essa è affetta da alcuni problemi emersi in diversi studi letterari. Infatti, nonostante la risoluzione spaziale e temporale di questa fonte di dati sia elevata, le osservazioni pluviometriche sono soggette a errori sistemici, che attualmente ne impediscono l'uso in tempo quasi reale (deVos et al., 2019). Tra i principali problemi emerge l'impossibilità di avere informazioni riguardanti il tipo di sensore, i metodi di installazione e la manutenzione delle stazioni (de Vos et al., 2017). Questo è chiaramente in contrasto con gli standard che le stazioni appartenenti alla rete di monitoraggio ufficiale devono rispettare. La mancanza di linee guida per l'installazione delle PMS e l'assenza di informazioni in tal senso non permette l'utilizzo dei dati sulle precipitazioni senza prima testarne l'affidabilità. Questo aspetto è stato indagato da de Vos et al. (2017) (5) che hanno condotto un esperimento installando tre stazioni Netatmo seguendo gli standard richiesti dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) (6) insieme a un pluviometro elettronico ad alta risoluzione. L'esperimento è stato condotto per un periodo di circa 4 mesi, durante il quale gli strumenti hanno registrato continuamente gli eventi di pioggia con diversi intervalli di registrazione. Le osservazioni sono state anche confrontate con i dati forniti da un radar meteorologico regolato con dati a terra. Per il periodo di osservazione, è emerso che la stazione Netatmo ha registrato una quantità inferiore di pioggia rispetto agli altri due strumenti. In particolare, un confronto tra i dati di Netatmo e i pluviometri ha mostrato un alto coefficiente di determinazione (0,94), che aumenta con l'aggregazione temporale; mentre le differenze considerevoli ottenute con il radar dipendevano essenzialmente dal problema del confronto tra osservazioni puntuali e areali (Sebastianelli et al., 2010; Sebastianelli et al., 2013).

De Vos et al. (2017) (5) hanno anche riscontrato vari problemi riguardanti il download dei dati dalla piattaforma Weather map: le precipitazioni misurate vengono assegnate all'istante in cui vengono raccolte sulla piattaforma anziché quando la stazione le registra effettivamente. Questo problema ha comportato un'attribuzione errata dell'intervallo di precipitazione e ha influenzato le correlazioni con altri dataset. Successivamente, per la città di Amsterdam, sono stati analizzati i dati registrati da 83 pluviometri della rete nazionale e le precipitazioni misurate da 64 stazioni Netatmo gestite dai cittadini. I risultati hanno mostrato che la precipitazione mediana registrata dalla rete Netatmo presentava meno distorsioni rispetto alle misurazioni in tempo reale fornite dal radar

meteorologico. In uno studio successivo, de Vos et al. (2019) (4) hanno proposto un algoritmo di correzione applicabile alle misurazioni delle PMS in tempo reale senza l'uso di dati aggiuntivi. Questo studio ha portato buoni risultati per le precipitazioni registrate nella città di Amsterdam, ma non è ancora stato testato in altre città. Bárdossy et al. (2021) (9) hanno proposto un metodo geostatistico combinato con statistiche di rango per integrare le informazioni sulle precipitazioni fornite dalle PMS con quelle della rete ufficiale di uno stato federale in Germania. Questo studio sottolinea anche che i dati registrati dalle PMS devono essere validati e corretti prima di poter essere utilizzati nelle applicazioni idrologiche.

## 9.2 Dataset e Caso Studio

In questa analisi preliminare, testiamo e confrontiamo i dati del 2020 di una stazione Netatmo (identificatore della stazione: 70:ee:50:3c:e8:22) con quelli registrati da un pluviometro nazionale gestito dalla Protezione Civile Italiana, ovvero il pluviometro di Bufalotta, entrambi situati nella città di Roma (Figura 9.1). Le due stazioni distano 700 metri l'una dall'altra e sono installate rispettivamente a un'altitudine di 61 e 53 m s.l.m.

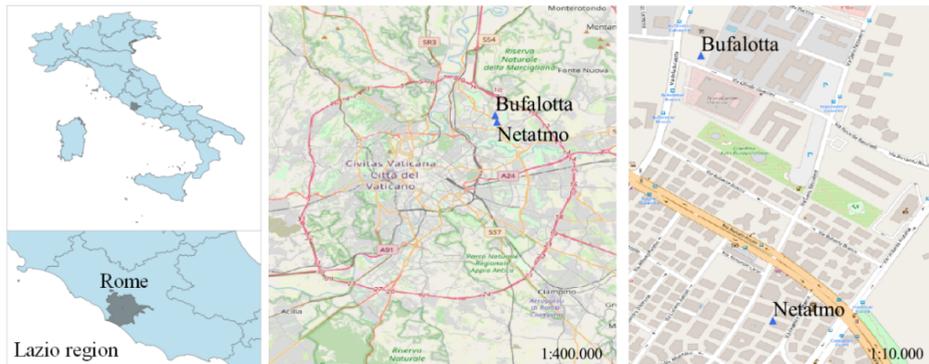


Figura 9.1. Caso di studio e posizionamento delle due stazioni analizzate.

I dati sulle precipitazioni provenienti dalla stazione Netatmo vengono inviati ogni cinque minuti al cloud, che li raccoglie e consente di visualizzarli e scaricarli dal sito web della Documentazione dell'API meteorologica. Questo pluviometro intelligente a secchiello basculante, secondo le caratteristiche tecniche fornite dall'azienda, ha un intervallo di misurazione compreso tra 0,2 e 150 mm/h, con una risoluzione di 1 mm/h. I secchielli di plastica hanno un volume di 0,1 mm, mentre l'imbutto di raccolta ha un diametro di 13 cm. Questo dispositivo intelligente è stato installato nel 2019, su un pilastro di legno di un balcone al sesto piano di un edificio. Il bordo superiore dell'imbutto è posizionato più in alto della trave, per evitare di misurare accidentalmente l'acqua che scorre su di essa.

L'unica limitazione della procedura di installazione potrebbe essere dovuta alla breve distanza tra la superficie orizzontale della trave e la bocca del pluviometro. Nel caso di

eventi di pioggia molto intensi, infatti, le gocce che cadono sulla trave potrebbero rimbalzare all'interno del pluviometro, causando misurazioni distorte. Non escludiamo che ciò sia accaduto durante il periodo di osservazione, ma in questa fase dell'analisi non è possibile considerare questi errori.

### 9.3 Metodologia

I due pluviometri presentano diversi intervalli di registrazione temporale (cioè, 30 minuti e 1 minuto per Netatmo e Bufalotta, rispettivamente), quindi aggregiamo entrambe le serie temporali per ottenere osservazioni sulle precipitazioni ogni 0,5, 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Nel processo di aggregazione, non consideriamo tutti i valori mancanti della serie Netatmo, dove la perdita di informazioni è principalmente dovuta a interruzioni di alimentazione o WiFi. Confrontiamo quindi l'affidabilità del pluviometro Netatmo nel catturare gli eventi di pioggia confrontando la sua serie temporale con quella registrata dal pluviometro Bufalotta. Per effettuare il confronto, utilizziamo alcune metriche comuni: il Coefficiente di Correlazione (CC), la Correlazione Incrociata (XC) e l'Errore Standard Normalizzato (NSE), la cui formulazione è:

$$NSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PMS_i - RG_i)^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RG_i}$$

dove PMS e RG si riferiscono rispettivamente alle misure di Netatmo e Bufalotta, e N è la dimensione del campione.

### 9.4 Risultati e Conclusioni

In questo studio abbiamo investigato l'affidabilità di un pluviometro Netatmo nel monitorare le precipitazioni nella zona nord-est di Roma nel 2020. Come primo confronto, calcoliamo le precipitazioni totali registrate dalle due stazioni. Emergono 6,28 mm in più misurati da Netatmo rispetto a Bufalotta, con un totale di 634,28 mm e 628 mm, rispettivamente. Questa differenza potrebbe essere dovuta a diversi fattori: (i) anche se le stazioni sono abbastanza vicine, durante un evento di pioggia convettiva, è possibile che il centro del rovescio sia localizzato vicino solo a una stazione, producendo una quantità maggiore, (ii) la variabilità spaziale dei fenomeni di precipitazione, e (iii) errori nel meccanismo del pluviometro o rottura e rimbalzo di alcune goccioline sulla trave (a causa di un'installazione non ottimale). Nella Figura 9.2(a,b) mostriamo le serie temporali giornaliere registrate dai due pluviometri durante l'anno 2020, e il loro confronto nella Figura 9.2(c).

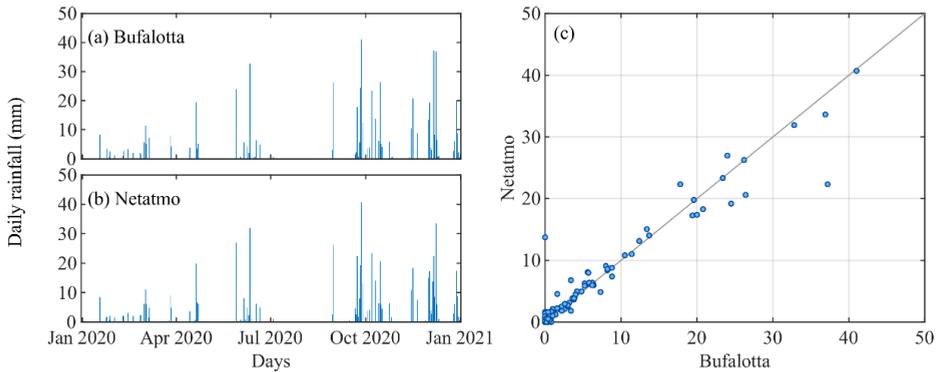


Figura 9.2. Serie temporali giornaliere delle precipitazioni registrate per (a) i pluviometri di Bufalotta e (b) di Netatmo. In (c) è fornito un diagramma a dispersione degli eventi di precipitazione giornalieri.

A prima vista, dalle Figure 9.2(a,b) le due serie temporali sembrano seguire la stessa progressione. Il dettaglio nella Figura 9.2(c) conferma questa percezione poiché i punti sono vicini alla retta di regressione. Alcune eccezioni sono osservate per valori di precipitazione superiori a 20 mm, dove il pluviometro di Bufalotta ha misurato una quantità maggiore rispetto a Netatmo. Come previsto, l'errore minimo e la massima correlazione sono osservati a scala temporale giornaliera (Tabella 9.1), con anche il massimo coefficiente di determinazione di 0,94. Tuttavia, le metriche a scala temporale ridotta (fino a 6 ore) sono piuttosto elevate e ulteriori indagini sono necessarie. È interessante notare che c'è un tempo di ritardo positivo tra le due serie temporali sia a scala temporale di 30 minuti che di 1 ora, confermando quanto trovato da de Vos et al. (5).

Tabella 9.1. Elenco delle metriche statistiche utilizzate nella valutazione delle prestazioni della serie temporale di Netatmo.

<i>Time scale (hours)</i>	0.5	1	3	6	12	24
<i>Lag time (hours)</i>	0.5	1	0	0	0	0
XC	0.77	0.9	0.68	0.87	0.92	0.97
CC	0.17	0.29	0.68	0.87	0.92	0.97
NSE	12.59	9.52	4.66	2.36	1.55	0.74

In conclusione, riteniamo che questi dati possano essere incredibilmente utili nel prossimo futuro, poiché potrebbero aumentare la risoluzione spaziale della rete ufficiale di pluviometri. Inoltre, i PMS, grazie al loro basso costo e alla facilità d'uso, potrebbero fornire informazioni anche in aree non monitorate o impermeabili, poiché l'unico vincolo

è la connessione Internet. In questo modo, la cosiddetta scienza partecipativa può contribuire a migliorare la rete di monitoraggio delle precipitazioni. Possiamo beneficiare di queste osservazioni per diversi scopi: riempire i valori mancanti nei registri della rete di monitoraggio nazionale, aumentare la distribuzione spazio-temporale degli eventi di precipitazione (Biondi et al., 2021), migliorare l'affidabilità dei prodotti grigliati, fornire informazioni riguardanti i bacini non monitorati (Ridolfi et al., 2020; Bertini et al., 2020), supportare i sistemi di allarme precoce (Ridolfi et al., 2013), e mitigare il rischio residuo di alluvioni, e fornire un livello di dettaglio spaziale nei metodi di regionalizzazione. Pertanto, riteniamo che migliorare la conoscenza sulla affidabilità e le prestazioni dei PMS sia di importanza fondamentale, specialmente nei prossimi anni.

## Bibliografia

1. Kidd, C., Becker, A., Huffman, G.J., Muller, C.L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D.B., "So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges?", *Bulletin of the American Meteorological Society*. 98, 69–78 (2017).
2. Fadhel, N., Lombardi, F., Aniello, L., Margheri, A., Sassone, V., "Towards a semantic modelling for threat analysis of IoT applications: A case study on transactive energy", *IET Conference Publications*. 2019, 1–6 (2019).
3. Muller, C.L., Chapman, L., Johnston, S., Kidd, C., Illingworth, S., Foody, G., Overeem, A., Leigh, R.R., "Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: Current status and future potential", *International Journal of Climatology*. 35, 3185–3203 (2015).
4. de Vos, L.W., Leijnse, H., Overeem, A., Uijlenhoet, R., "Quality Control for Crowdsourced Personal Weather Stations to Enable Operational Rainfall Monitoring", *Geophysical Research Letters*. 46, 8820–8829 (2019).
5. de Vos, L.W., Leijnse, H., Overeem, A., Uijlenhoet, R., "The potential of urban rainfall monitoring with crowdsourced automatic weather stations in Amsterdam", *Hydrology and Earth System Sciences*. 21, 765–777 (2017).
6. World Meteorological Organization, "Analyzing Long Time Series of Hydrological Data With Respect To Climate Variability", (1988). WMO Publication.
7. Sebastianelli, S., Russo, F., Napolitano, F., Baldini, L., "Comparison between radar and rain gauges data at different distances from radar and correlation existing between the rainfall values in the adjacent pixels", *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 7, 5171–5212 (2010).
8. Sebastianelli, S., Russo, F., Napolitano, F., Baldini, L., "On precipitation measurements collected by a weather radar and a rain gauge network", *Natural Hazards and Earth System Science*. 13, 605–623 (2013).
9. Bardossy, A., Seidel, J., El Hachem, A., "The use of personal weather station observations to improve precipitation estimation and interpolation", *Hydrology and Earth System Sciences*. 25, 583–601 (2021).
10. Biondi, D., Greco, A., De Luca, D.L., "Fixed-area vs storm-centered areal reduction factors: a Mediterranean case study", *Journal of Hydrology*. 595, 125654 (2021).
11. Ridolfi, E., Kumar, H., Bárdossy, A., "A methodology to estimate flow duration curves at partially ungauged basins", *Hydrology and Earth System Sciences*. 24, 2043–2060 (2020).
12. Bertini, C., Buonora, L., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F., "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site", *Water*. 12, 1–20 (2020).
13. Ridolfi, E., Montesarchio, V., Rianna, M., Sebastianelli, S., Russo, F., Napolitano, F., "Evaluation of rainfall thresholds through entropy: Influence of bivariate distribution selection", *Irrigation and Drainage*. 62, 50–60 (2013).



APPENDICE 6 – Articolo in attesa di pubblicazione

## 10 Influenza della Dimensione del Campione e della Recentità per la Definizione delle Precipitazioni di Progetto

*Titolo: "On the Influence of Sample Size and Recentness for the Definition of Design Rainfall"*

*Autori: Benedetta Moccia, Luca Buonora and Claudia Bertini*

**Abstract.** La definizione delle piogge di progetto è di importanza fondamentale negli studi idrologici, come per la progettazione delle reti di drenaggio urbano e per la gestione del rischio di inondazioni. Il temporale di progetto è di solito definito attraverso l'analisi della frequenza dei massimi annuali osservati della profondità delle precipitazioni, definendo la distribuzione di probabilità che meglio si adatta al campione di osservazioni. A causa dell'aumento recente della frequenza delle inondazioni urbane e dell'interesse acquisito sugli effetti del cambiamento climatico sulle caratteristiche delle precipitazioni, molte autorità idriche locali stanno chiedendo agli ingegneri idraulici di utilizzare non solo serie temporali lunghe, ma anche campioni recenti per stimare i valori del temporale di progetto. Tuttavia, sebbene sia riconosciuto il ruolo della dimensione del campione nell'analisi della frequenza, non è ancora stato indagato l'influenza della recentezza dei campioni nella stima delle precipitazioni di progetto. In questo studio analizziamo l'influenza delle caratteristiche dei campioni sulla stima di un temporale di progetto con periodo di ritorno di 100 anni e durata di 1 ora, utilizzando serie temporali di precipitazioni dei pluviometri situati nel centro Italia. Lo studio rivela che nella maggior parte dei casi l'intervallo temporale da cui sono estratti i campioni è rilevante solo per campioni di dimensioni ridotte, mentre per campioni opportunamente ampi i valori delle precipitazioni di progetto calcolate utilizzando osservazioni recenti sono simili a quelli ottenuti con osservazioni più datate.

### 10.1 Introduzione

L'altezza e l'intensità delle precipitazioni associate a una specifica durata e frequenza di occorrenza sono comunemente indicate come "piogge di progetto" ed è di fondamentale importanza negli studi idrologici. Infatti, essere in grado di prevedere la profondità delle precipitazioni che possono verificarsi per una specifica durata con una data probabilità è necessario in una vasta gamma di applicazioni idrologiche ed idrauliche, come la gestione del rischio di inondazioni, la progettazione efficace delle infrastrutture idriche e l'urbanistica (Montesarchio et al., 2015; Russo et al., 2006). Inoltre, a causa della frequente mancanza di osservazioni di portata, il temporale di progetto è comunemente utilizzato per calcolare l'inondazione di progetto di un bacino idrografico utilizzando un modello

idrologico per stimare la portata massima, assumendo che quest'ultima preservi la stessa probabilità di occorrenza del temporale che l'ha generata (ad es. (Balbastre-Soldevila et al., 2019; Bertini et al., 2020)). L'intensità del temporale di progetto per un periodo di ritorno e una durata fissati può essere derivata sia tramite un'analisi statistica diretta delle osservazioni delle precipitazioni relative alla durata di interesse, sia attraverso relazioni matematiche che quantificano l'intensità delle precipitazioni delle tempeste con specifica probabilità di occorrenza a durate variabili, note come curve Intensità-Durata-Frequenza (IDF) (5). In entrambi i casi, l'analisi di frequenza idrologica viene utilizzata per calcolare le precipitazioni di progetto basate su osservazioni storiche dei massimi annuali (MA) della profondità delle precipitazioni (ad es. (Mineo et al., 2018; Montesarchio et al., 2013)). Poiché il metodo prevede l'adattamento di una distribuzione di probabilità al campione di dati osservati, per avere stime statisticamente robuste i campioni selezionati dovrebbero essere sufficientemente lunghi per garantire che siano rappresentativi per l'intera popolazione (Li et al., 2018). Infatti, è stato dimostrato in letteratura che la dimensione del campione dei dati impiegati per l'inferenza statistica ha una forte influenza sulle stime finali (Moccia et al., 2021). Per questo motivo, le autorità nazionali di tutto il mondo forniscono requisiti sulla lunghezza minima delle serie temporali per studi di frequenza robusti (Li et al., 2018). D'altra parte, l'aumento della frequenza con cui si verificano le inondazioni urbane negli ultimi decenni, insieme all'interesse recente negli studi sul cambiamento climatico, ha portato molte autorità idriche locali a richiedere un secondo requisito sulle serie temporali adottate, che è legato alla modernità delle osservazioni. Infatti, sempre più frequentemente le autorità locali mettono in discussione l'uso di serie temporali lunghe che si interrompono negli ultimi vent'anni, costringendo gli idrologi e gli ingegneri idraulici a scartare molte serie temporali di precipitazioni.

In questo studio analizziamo l'influenza sia della dimensione del campione che del "tempismo", cioè il periodo temporale da cui sono estratte le osservazioni, nella valutazione dell'intensità delle precipitazioni relative al temporale di progetto con durata di 1 ora e periodo di ritorno di 100 anni. A questo scopo, adottiamo una finestra mobile di durate fisse di 20, 25, 30 e 35 anni che estrae il campione di MA dalle serie temporali, utilizzando osservazioni che vanno dal 1928 al 2020. I temporali di progetto ottenuti con ciascun campione di durata fissa vengono quindi confrontati con quelli valutati utilizzando l'intero insieme di osservazioni disponibili per una specifica località. Lo scopo dello studio, quindi, è analizzare quale dei due fattori menzionati, cioè la dimensione del campione e il tempismo, fornisca maggiore incertezza nella stima dei temporali di progetto.

## 10.2 Dataset e Caso Di Studio

Il presente studio è condotto nell'Italia centrale, precisamente nelle regioni dell'Umbria e del Lazio. Le due aree differiscono per la vicinanza al mare, la topografia e il clima. Il Lazio si trova sul lato occidentale dell'Italia centrale, ha una superficie di circa 17232 km<sup>2</sup>, il suo

lato ovest è esposto al mare e presenta un clima mediterraneo (Csa della classificazione di Köppen): l'area costiera è la più secca e le precipitazioni annuali aumentano spostandosi verso l'interno, con la stagione più secca che è l'estate. L'Umbria si trova nella zona degli Appennini dell'Italia centrale e ha una superficie di circa 8456 km<sup>2</sup>, non è esposta al mare e ha un clima sub-litoraneo (Cfa della classificazione climatica di Köppen), che è fortemente influenzato dall'altitudine, con i periodi più umidi che sono la primavera e l'autunno. Entrambe le regioni sono dotate di un'estesa rete di monitoraggio, da cui sono state estratte le osservazioni dei massimi annuali delle precipitazioni (AM) con durata oraria. Nonostante la densità della rete, la maggior parte delle stazioni ha una lunghezza delle serie temporali ridotta, a causa della presenza di valori mancanti o del fatto che siano state installate di recente. Poiché lo studio che proponiamo qui richiede serie temporali lunghe, sono state selezionate solo le stazioni con i massimi AM orari più lunghi, per un totale di 6 stazioni, di cui due in Umbria e quattro situate nel Lazio (Figura 10.1.a e Figura 10.1.b).

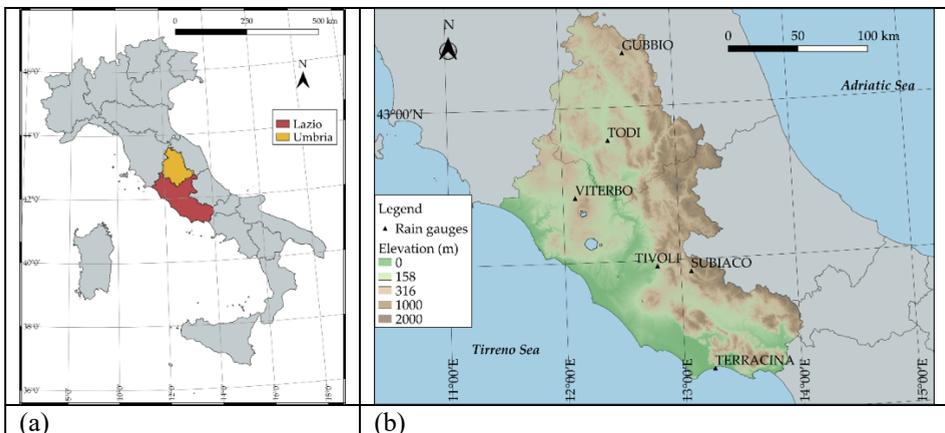


FIGURA 10.1. a) Posizione delle regioni del Lazio e dell'Umbria all'interno dell'Italia; b) Posizioni delle sei stazioni selezionate per lo studio.

### 10.3 Metodologia

Per condurre l'analisi, innanzitutto abbiamo selezionato solo le stazioni che avevano almeno 60 anni di osservazioni, dal 1928 al 2020. Successivamente, per ciascuna delle stazioni selezionate, abbiamo estratto i campioni dei massimi annuali (AM) utilizzando una finestra mobile di durate fisse di 20, 25, 30 e 35 anni. Infatti, come dimostrato in lavori precedenti (Li et al., 2018; Moccia et al., 2020), la dimensione del campione influenza fortemente la stima del temporale di progetto associato a un determinato periodo di ritorno; abbiamo quindi impiegato finestre di dimensioni diverse per tener conto dell'incertezza dovuta alle serie temporali ridotte. Per ciascun campione, ovvero per ciascuna lunghezza e ciascuna stazione, abbiamo adattato la distribuzione di Gumbel,

utilizzando il metodo dei momenti per stimare i parametri della distribuzione. La distribuzione di Gumbel è stata scelta perché è una delle più comunemente impiegate per descrivere il comportamento dei massimi annuali (ad es. Moccia et al., 2021)):

$$P(X \leq x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}}$$

dove  $X$  è la variabile casuale (in questo caso l'intensità delle precipitazioni),  $x$  è un valore fisso dell'intensità delle precipitazioni,  $\mu$  e  $\alpha$  sono i parametri della distribuzione.

Una volta stimati i parametri della distribuzione di Gumbel, per ciascun campione abbiamo calcolato il quantile relativo al periodo di ritorno di 100 anni della profondità delle precipitazioni orarie. Lo stesso calcolo è stato ripetuto considerando tutte le osservazioni disponibili per ciascuna stazione, al fine di ottenere una stima delle precipitazioni più robusta che possa essere considerata come il punto di riferimento per tutti i campioni di diverse dimensioni.

#### **10.4 Risultati e conclusioni**

In questo studio abbiamo indagato l'influenza della dimensione del campione e della recentezza del campione sul calcolo delle tempeste di progetto. A questo scopo, abbiamo calcolato l'intensità delle precipitazioni riferita a una durata di 1 ora e a un periodo di ritorno di 100 anni utilizzando diversi campioni di AM, che differiscono per dimensione e per il periodo di osservazione. Lo studio è stato condotto nel centro Italia utilizzando le serie temporali delle precipitazioni di 6 stazioni che avevano più di 60 anni di osservazioni. I risultati ottenuti sono presentati nella Figura 10.2, con una casella per ciascuna stazione analizzata. Anche se abbiamo eseguito l'analisi con campioni di 20, 25, 30 e 35 anni di osservazioni, per chiarezza nella Figura 10.2 mostriamo solo i valori delle precipitazioni ottenuti con 20 anni (cerchi), 35 (quadrati) e con l'intero set di dati disponibile (linea). Per tutte le stazioni, ogni campione è riferito all'anno medio della finestra temporale utilizzata per derivare la tempesta di progetto. Quindi, ad esempio, se un campione di 20 anni di osservazioni disponibili è riferito al periodo temporale 1930-1960, perché ha avuto 10 anni di dati mancanti, allora la profondità delle precipitazioni corrispondente nella Figura 10.2 è collocata nell'anno 1945.

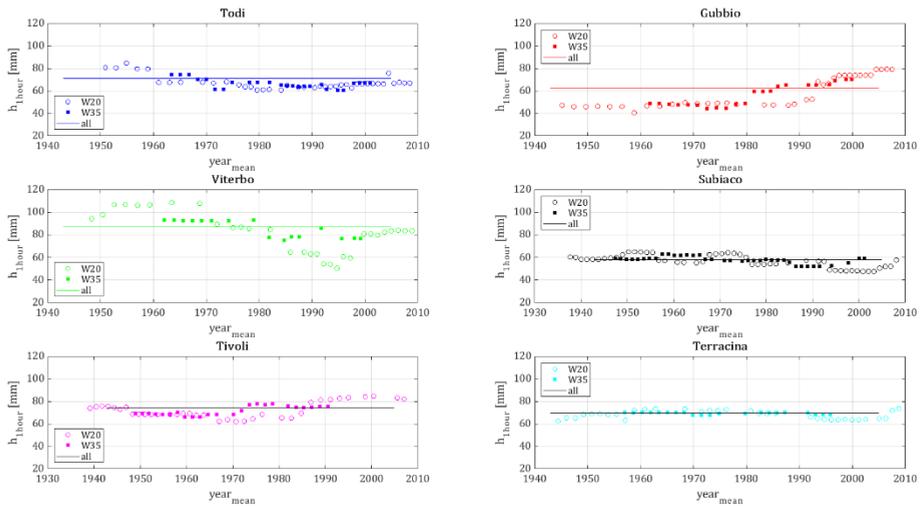


FIGURA 10.2. Intensità delle precipitazioni di progetto per una durata di un'ora e un periodo di ritorno di 100 anni, calcolata utilizzando campioni con 20 anni (W20), 35 anni (W35) e l'intero campione di osservazioni (tutto).

Per tutte le stazioni, si osserva che passando da campioni di 20 anni a campioni di 35 anni, le profondità delle precipitazioni di progetto tendono a diventare più simili al valore calcolato utilizzando l'intero set di osservazioni disponibili. Inoltre, per alcune stazioni, come Terracina e Subiaco, le differenze tra i due campioni di diverse dimensioni sono minime, mentre per altre, come Viterbo e Gubbio, non sono trascurabili. Inoltre, si osserva che per alcune stazioni c'è un forte legame tra il valore di progetto delle precipitazioni ottenuto e l'anno di riferimento del campione. Infatti, in molti casi, l'utilizzo di un campione estratto dagli anni più recenti di osservazioni fornisce valori di progetto delle precipitazioni molto diversi da quelli ottenuti utilizzando gli anni più vecchi di osservazioni. Tuttavia, questa scoperta non dovrebbe essere interpretata come la presenza di tendenze nelle precipitazioni, poiché è evidente che le differenze tra i valori delle precipitazioni ottenuti con i campioni più vecchi e quelli più recenti diminuiscono all'aumentare delle dimensioni del campione. In conclusione, i risultati ottenuti confermano l'importanza di avere campioni lunghi per stime statistiche robuste dei valori delle tempeste di progetto, poiché il periodo temporale dei campioni estratti influenza i risultati solo per campioni di piccole dimensioni.

## Bibliografia

1. Montesarchio, V., Napolitano, F., Rianna, M., Ridolfi, E., Russo, F., Sebastianelli, S., "Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation", *Nat. Hazards*. 75, (2015).
2. Russo, F., Lombardo, F., Napolitano, F., Gorgucci, E., "Rainfall stochastic modeling for runoff forecasting", *Phys. Chem. Earth*. (2006).
3. Balbastre-Soldevila, R., García-Bartual, R., Andrés-Doménech, I., "A comparison of design storms for urban drainage system applications", *Water (Switzerland)*. 11, (2019).
4. Bertini, C., Buonora, L., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F., "On the Use of Satellite Rainfall Data to Design a Dam in an Ungauged Site", *Water*. 12, 3028 (2020).
5. Efstratiadis, A., Koussis, A.D., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., "Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted?", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*. 14, (2014).
6. Mineo, C., Napolitano, F., "A technical note on short-duration rainfall in central Italy", *AIP Conf. Proc.*, 2018.
7. Montesarchio, V., Napolitano, F., Russo, F., Spina, S., "IDF relationships for short duration rainfall", *AIP Conf. Proc.*, 2013.
8. Li, H., Sun, J., Zhang, H., Zhang, J., Jung, K., Kim, J., Xuan, Y., Wang, X., Li, F., "What large sample size is sufficient for hydrologic frequency analysis?-A rational argument for a 30-year hydrologic sample size in water resources management", *Water (Switzerland)*. 10, (2018).
9. Moccia, B., Mineo, C., Ridolfi, E., Russo, F., Napolitano, F., "Probability distributions of daily rainfall extremes in Lazio and Sicily, Italy, and design rainfall inferences", *J. Hydrol. Reg. Stud*. 33, (2021).
10. Moccia, B., Mineo, C., "A technical note on the influence of time-series length on the intensity-duration-frequency curves for Lazio region", *AIP Conf. Proc.*, 2020.

APPENDICE 7 – Articolo pubblicato

## 11 Entropia per Applicazioni Idrologiche: una Revisione

**Titolo:** *“Entropy for Hydrological Applications: a Review”*

**Autori:** Elena Ridolfi, Claudia Bertini, Benedetta Moccia, Luca Buonora e Fabio Russo

**Titolo del volume:** Proceedings of the 19th International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2021 (ICNAAM-2021)

**Codice DOI:** <https://dx.doi.org/10.1063/5.0163633>

**Abstract.** Il concetto di entropia è stato introdotto per la prima volta in termodinamica per descrivere l'evoluzione di tutti i sistemi verso stati più disordinati. Nel XX secolo, Shannon ha utilizzato lo stesso concetto per introdurre una misura di incertezza riferita a una variabile casuale e da allora l'entropia dell'informazione, così chiamata, è stata utilizzata in molti campi scientifici per descrivere la quantità di informazione fornita da una o più variabili casuali. Circa 25 anni dopo la sua introduzione, l'entropia di Shannon ha fatto la sua prima comparsa nell'ambito delle risorse idriche, grazie ad Amorocha e Espildora. Da quel momento in poi, l'entropia dell'informazione e i concetti correlati della Teoria dell'Informazione sono stati ampiamente applicati in idraulica e idrologia. Qui presentiamo una breve rassegna delle principali applicazioni dell'entropia nella pratica dell'ingegneria idraulica, dai problemi idraulici all'ottimizzazione delle reti di monitoraggio idrologico.

### 11.1 Introduzione

Il concetto di entropia è stato introdotto per la prima volta nel campo della termodinamica per descrivere la caratteristica di tutte le trasformazioni dei sistemi verso la condizione di massimo disordine. In seguito, Boltzmann e Gibbs hanno sviluppato il concetto di meccanica statistica, fornendo una formulazione statistica alle variabili termodinamiche (Theodoratos et al., 2012). Nella prima metà del XX secolo, Shannon ha innovato il campo della Teoria dell'Informazione (TI), introducendo una misura di incertezza con la stessa forma matematica dell'entropia di Gibbs (Shannon et al., 1949), anche nota come entropia di Shannon o entropia dell'informazione per distinguerla dal suo concetto originale. Questo studio si concentra sull'entropia dell'informazione e, pertanto, la definizione formale sarà data di seguito. Data un insieme di  $n$  eventi, con probabilità di accadimento note  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , la misura di incertezza dei possibili  $n$  risultati è indicata come "entropia". Nel caso in cui si acquisisca più informazioni su uno degli eventi, l'incertezza dei risultati diminuisce. Pertanto, l'informazione può essere vista come una diminuzione dell'incertezza e l'entropia può essere considerata come una misura del contenuto

informativo. Il concetto di entropia può essere esteso a una variabile discreta casuale  $X$ , con valori discreti  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e le relative probabilità  $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_n)$ :

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \log p(x_i) \quad 1)$$

dove  $H(X)$  è l'entropia per la variabile  $X$ , anche chiamata entropia marginale.

È possibile estendere il concetto a più variabili  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , introducendo il concetto di entropia congiunta:

$$JH(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_N=1}^{n_N} p(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_N}) \cdot \log p(x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_N}) \quad 2)$$

dove  $JH(X_1, X_2, \dots, X_N)$  è l'entropia congiunta di  $N$  variabili discrete casuali e  $p(x_{(i_1)}, x_{(i_2)}, \dots, x_{(i_N)})$  è la probabilità congiunta delle variabili  $X_1, X_2, \dots, X_N$

## 11.2 Teoria dell'entropia nelle Applicazioni Idrologiche e Idrauliche

Il concetto di entropia è stato per la prima volta applicato nel settore delle risorse idriche da Amorocho e Espildora (3) e da allora è stato adottato per molte applicazioni (Singh, 1997). Nell'analisi statistica, Jaynes (5) ha introdotto il Principio dell'Entropia Massima (POME), che fornisce la stima meno tendenziosa delle distribuzioni di probabilità basata su conoscenze parziali, aprendo la strada a diverse applicazioni. Nel campo dell'ingegneria idraulica, Chin et al. (6) hanno definito la distribuzione della velocità all'interno di un canale, nel caso di flusso non uniforme, attraverso il POME. Il lavoro di Chin è stato successivamente sviluppato per molti scopi, come stabilire una relazione tra velocità media e massima (Xia, 1997) e stimare la portata in posizioni remote (Moramarco et al., 2001). Ridolfi et al. (2012; 2014) hanno utilizzato un approccio di multi-ottimizzazione basato sulla massimizzazione del contenuto informativo, espresso attraverso l'entropia congiunta, e sulla minimizzazione dell'informazione ridondante, espressa attraverso il concetto di Correlazione Totale (C), per definire la distanza ottimale tra le sezioni trasversali e i sensori di monitoraggio delle inondazioni per implementare rispettivamente un modello idraulico 1-D e 2-D. Lo stesso approccio è stato anche utilizzato da Ridolfi et al. (10) per definire il sottoinsieme ottimale di nodi di monitoraggio per stimare la distribuzione della pressione nei sistemi di distribuzione dell'acqua. Una rassegna completa delle applicazioni dell'entropia in idrologia può essere trovata in Singh (2015). L'entropia di Shannon probabilmente ha trovato ancora più applicazioni nel campo dell'idrologia, dove è stata impiegata per diversi scopi. Koutsoyiannis (13) ha dimostrato che il POME può essere applicato per determinare i parametri di uno spazio di probabilità soggetto a vincoli dati, per derivare la distribuzione appropriata della variabile studiata e per valutare le proprietà di dipendenza delle variabili delle precipitazioni come

l'aggregazione e la persistenza. Koutsoyiannis et al. (14) applicano questo principio per studiare il flusso del fiume Nilo e determinare la distribuzione marginale del flusso, per spiegare la dipendenza a lungo termine del flusso, per trovare la struttura di covarianza sconosciuta nella struttura stocastica e per spiegare la linearità nei flussi ritardati. Papalexiou et al. (15) applicano il principio della massima entropia per costruire un modello di distribuzione di probabilità appropriato per le precipitazioni e i processi geofisici. Per quanto riguarda la geomorfologia di un bacino, Fiorentino et al. (16) hanno trovato una relazione tra l'entropia e l'elevazione media del bacino. L'entropia è stata ampiamente adottata anche nel campo delle previsioni: Krstanovic e Singh (17) hanno sviluppato un modello univariato per la previsione a lungo termine del deflusso basato sul concetto di Massima Entropia dell'Analisi Spettrale (MESA); Pechlivanidis et al. (18) hanno estratto misure di entropia significative dal segnale di flusso e hanno indagato gli effetti della risoluzione della suddivisione sul calcolo dell'entropia. AghaKouchak (19) ha presentato una rassegna dei metodi frequentemente impiegati per combinare entropia e copule e ha discusso delle loro possibili applicazioni in idrologia e climatologia. Pechlivanidis et al. (20) hanno adottato il concetto di Massima Informazione Minima Redondanza (MIMR) per identificare un sottoinsieme rappresentativo di proiezioni idroclimatiche dall'intero insieme di proiezioni ensemble. L'entropia è stata anche impiegata nella modellazione pioggia-deflusso per migliorare la calibrazione delle prestazioni del modello Pechlivanidis et al. (21) e come strumento diagnostico Pechlivanidis et al. (22). Ridolfi et al. (23) hanno adottato un approccio basato sull'entropia per definire regioni idrologicamente omogenee per un approccio di regionalizzazione. Spina et al. (24) hanno utilizzato un approccio basato sull'entropia per definire il numero ottimale di eventi di pioggia necessari per calibrare i dati radar sulle precipitazioni. Una rassegna più completa dell'uso dell'entropia nelle applicazioni idrologiche può essere trovata in Singh (2011). Nel campo della mappatura delle inondazioni e della valutazione del rischio, il concetto di entropia è stato anche applicato per determinare la quantità di precipitazione cumulata che porta a un valore critico di deflusso in corrispondenza di una sezione trasversale del fiume, minimizzando una funzione di rischio basata su un approccio bayesiano-entropico (Ridolfi et al., 2013; Montesarchio et al., 2011; Montesarchio et al. 2015). Horritt (29) ha applicato una metodologia basata sull'entropia per valutare l'incertezza e valutare l'accuratezza delle mappe di inondazione probabilistiche.

### 11.3 Teoria dell'Entropia per Reti di Monitoraggio

Diversi autori si sono occupati della progettazione, valutazione e ottimizzazione delle reti di monitoraggio nei campi della qualità dell'acqua, delle precipitazioni, delle acque sotterranee e delle reti idrometriche. Husain (30) ha introdotto l'indice di informazione reciproca  $T$  come misura della ridondanza di una rete di monitoraggio idrologico e ha proposto una metodologia basata su questo concetto per progettare una rete di sensori di misurazione. Ozkul et al. (31) hanno applicato la stessa metodologia per valutare una rete di qualità dell'acqua del fiume Mississippi (USA). Un interessante approccio basato

sull'entropia è presentato da Yang et al. (32), che hanno valutato le informazioni che fluiscono tra coppie di stazioni di misurazione attraverso un valore standardizzato di  $T$ , chiamato indice di trasferimento delle informazioni direzionali (DIT). Tuttavia, poiché l'indice DIT non è simmetrico, Mogheir et al. (33) hanno utilizzato l'indice di Informazione Trasferita (ITI), che è una standardizzazione del valore di  $T$  attraverso l'entropia congiunta di coppie di variabili, per determinare la variabilità spaziale tra i pozzi di monitoraggio della qualità delle acque sotterranee.

Diversi autori hanno ottimizzato il numero e la posizione dei sensori utilizzando un approccio di ottimizzazione multi-obiettivo (ad esempio, utilizzando un metodo che massimizza simultaneamente l'informazione congiunta e minimizza la correlazione totale (de Pádua, et al., 2019; Keum et al., 2019; Alfonso et al., 2014; Alfonso et al. 2010; Alfonso et al., 2010; Alfonso et al., 2013). Molti autori hanno impiegato il concetto di transinformazione (TI) per derivare il layout ottimale della rete (Werstuck et al., 2017), utilizzando anche modelli idrologici come meccanismo di post-elaborazione per definire quale dei layout soddisfi meglio le esigenze dell'utente (Ursulak et al., 2021). Alcuni studiosi hanno impiegato funzioni obiettivo basate sull'entropia accoppiate con tecniche di interpolazione kriging per definire i layout ottimali della rete di monitoraggio (Xu et al., 2018; Yeh et al., 2017). Altri autori hanno cercato di derivare il massimo contenuto informativo ottenibile con una rete di monitoraggio delle piogge urbane, secondo diversi intervalli di tempo (Ridolfi et al., 2011). Per ottenere informazioni in aree non misurate, alcuni autori hanno utilizzato dati radar e satellitari in un contesto basato sull'entropia (Ye et al., 2017; Bertini et al., 2021; Huang et al., 2020). Revisioni più dettagliate sull'uso di approcci correlati all'entropia per progettare e ottimizzare reti di monitoraggio dell'acqua sono presentate da Keum et al. (2017) e Chacon-Hurtado et al. (2017), mentre ulteriori informazioni su tutte le funzioni obiettivo adottate sono fornite in Foroosand et al. (51).

## Bibliografia

1. N. Theodoratos, "Entropy: Uncertainty in Hydrology and Nature", Athens, Greece (2012).
2. C.E. Shannon, W. Weaver, The mathematical theory of communication, 1949.
3. J. Amorocho, B. Espildora, "Entropy in the assessment of uncertainty in hydrologic systems and models", *Water Resour. Res.* (1973).
4. V.P. SINGH, "THE USE OF ENTROPY IN HYDROLOGY AND WATER RESOURCES", *Hydrol. Process.* 11, 587–626 (1997).
5. E.T. Jaynes, "Information theory and statistical mechanics, I", *Phys. Rev.* 106, (1957).
6. C. Chin, D.W. Murray, "Variation of Velocity Distribution along Nonuniform Open-Channel Flow", *J. Hydraul. Eng.* 118, (1992).
7. R. Xia, "Relation between Mean and Maximum Velocities in a Natural River", *J. Hydraul. Eng.* 123, (1997).
8. T. Moramarco, V.P. Singh, "Simple Method for Relating Local Stage and Remote Discharge", *J. Hydrol. Eng.* 6, (2001).
9. E. Ridolfi, L. Alfonso, G. Di Baldassarre, F. Dottori, F. Russo, F. Napolitano, "An entropy approach for the optimization of cross-section spacing for river modelling", *Hydrol. Sci. J.* (2014).
10. E. Ridolfi, K. Yan, L. Alfonso, G. Di Baldassarre, F. Napolitano, F. Russo, P.D. Bates, "An entropy method for floodplain monitoring network design", *AIP Conf. Proc.*, 2012.
11. E. Ridolfi, F. Servili, R. Magini, F. Napolitano, F. Russo, L. Alfonso, "Artificial Neural Networks and entropy-based methods to determine pressure distribution in water distribution systems", *Procedia Eng.*, 2014.
12. V.P. Singh, *Entropy theory in hydraulic engineering: An introduction*, 2015.
13. D. Koutsoyiannis, "An entropic-stochastic representation of rainfall intermittency: The origin of clustering and persistence", *Water Resour. Res.* 42, (2006).
14. D. Koutsoyiannis, H. Yao, A. Georgakakos, "Medium-range flow prediction for the Nile: A comparison of stochastic and deterministic methods", *Hydrol. Sci. J.* 53, (2008).
15. S.M. Papalexiou, D. Koutsoyiannis, "Entropy based derivation of probability distributions: A case study to daily rainfall", *Adv. Water Resour.* 45, (2012).
16. M. Fiorentino, P. Claps, V.P. Singh, "An entropy-based morphological analysis of river basin networks", *Water Resour. Res.* 29, (1993).
17. P.F. Krstanovic, V.P. Singh, "A univariate model for long-term streamflow forecasting - 2. Application", *Stoch. Hydrol. Hydraul.* 5, (1991).
18. I.G. Pechlivanidis, B. Jackson, H. Mcmillan, H. V. Gupta, "Robust informational entropy-based descriptors of flow in catchment hydrology", *Hydrol. Sci. J.* 61, (2016).
19. A. AghaKouchak, "Entropy-copula in hydrology and climatology", *J. Hydrometeorol.* 15, (2014).
20. I.G. Pechlivanidis, H. Gupta, T. Bosshard, "An Information Theory Approach to Identifying a Representative Subset of Hydro-Climatic Simulations for Impact Modeling Studies", *Water Resour. Res.* 54, (2018).

21. I.G. Pechlivanidis, B. Jackson, H. McMillan, H. Gupta, "Use of an entropy-based metric in multiobjective calibration to improve model performance", *Water Resour. Res.* 50, (2014).
22. I.G. Pechlivanidis, B.M. Jackson, H.K. McMillan, H. V. Gupta, "Using an informational entropy-based metric as a diagnostic of flow duration to drive model parameter identification", *Glob. Nest J.* 14, (2012).
23. E. Ridolfi, M. Rianna, G. Trani, L. Alfonso, G. Di Baldassarre, F. Napolitano, F. Russo, "A new methodology to define homogeneous regions through an entropy based clustering method", *Adv. Water Resour.* 96, 237–250 (2016).
24. S. Spina, S. Sebastianelli, E. Ridolfi, F. Russo, L. Baldini, L. Alfonso, "Data selection to assess bias in rainfall radar estimates: An entropy-based method", *AIP Conf. Proc.*, 2013.
25. V.P. Singh, "Hydrologic Synthesis Using Entropy Theory: Review", *J. Hydrol. Eng.* 16, (2011).
26. E. Ridolfi, V. Montesarchio, M. Rianna, S. Sebastianelli, F. Russo, F. Napolitano, "Evaluation of rainfall thresholds through entropy: Influence of bivariate distribution selection", *Irrig. Drain.* 62, (2013).
27. V. Montesarchio, E. Ridolfi, F. Russo, F. Napolitano, "Rainfall threshold definition using an entropy decision approach and radar data", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, (2011).
28. V. Montesarchio, F. Napolitano, M. Rianna, E. Ridolfi, F. Russo, S. Sebastianelli, "Comparison of methodologies for flood rainfall thresholds estimation", *Nat. Hazards.* 75, (2015).
29. M.S. Horritt, "A methodology for the validation of uncertain flood inundation models", *J. Hydrol.* 326, (2006).
30. T. Husain, "HYDROLOGIC UNCERTAINTY MEASURE AND NETWORK DESIGN", *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 25, (1989).
31. S. Ozkul, N.B. Harmancioglu, V.P. Singh, "Entropy-Based Assessment of Water Quality Monitoring Networks", *J. Hydrol. Eng.* 5, (2000).
32. Y. Yang, D.H. Burn, "An entropy approach to data collection network design", *J. Hydrol.* (1994).
33. Y. Mogheir, J.L.M.P. de Lima, V.P. Singh, "Characterizing the spatial variability of groundwater quality using the entropy theory: I. synthetic data", *Hydrol. Process.* 18, (2004).
34. L.H.R. de Pádua, N. de O. Nascimento, F.E.O.E. Silva, L. Alfonso, "Analysis of the fluviometric network of rio das velhas using entropy", *Rev. Bras. Recur. Hidricos.* (2019).
35. J. Keum, F.S. Awol, J. Ursulak, P. Coulibaly, "Introducing the ensemble-based dual entropy and multiobjective optimization for hydrometric network design problems: EnDEMO", *Entropy.* (2019).
36. L. Alfonso, E. Ridolfi, S. Gaytan-Aguilar, F. Napolitano, F. Russo, "Ensemble entropy for monitoring network design", *Entropy.* 16, 1365–1375 (2014).
37. L. Alfonso, A. Lobbrecht, R. Price, "Information theory-based approach for location of monitoring water level gauges in polders", *Water Resour. Res.* 46, (2010).
38. L. Alfonso, A. Lobbrecht, R. Price, "Optimization of water level monitoring

- network in polder systems using information theory", *Water Resour. Res.* (2010).
39. L. Alfonso, L. He, A. Lobbrecht, R. Price, "Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River", *J. Hydroinformatics*. 15, 211–228 (2013).
  40. C. Li, V.P. Singh, A.K. Mishra, "Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy", *Water Resour. Res.* 48, (2012).
  41. C. Werstuck, P. Coulibaly, "Hydrometric network design using dual entropy multi-objective optimization in the Ottawa River basin", *Hydrol. Res.* (2017).
  42. J. Ursulak, P. Coulibaly, "Integration of hydrological models with entropy and multi-objective optimization based methods for designing specific needs streamflow monitoring networks", *J. Hydrol.* 593, (2021).
  43. P. Xu, D. Wang, V.P. Singh, Y. Wang, J. Wu, L. Wang, X. Zou, J. Liu, Y. Zou, R. He, "A kriging and entropy-based approach to raingauge network design", *Environ. Res.* (2018).
  44. H.C. Yeh, Y.C. Chen, C. Wei, R.H. Chen, "Entropy and kriging approach to rainfall network design", *Paddy Water Environ.* (2011).
  45. E. Ridolfi, V. Montesarchio, F. Russo, F. Napolitano, "An entropy approach for evaluating the maximum information content achievable by an urban rainfall network", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11, 2075–2083 (2011).
  46. H.C. Yeh, Y.C. Chen, C.H. Chang, C.H. Ho, C. Wei, "Rainfall network optimization using radar and entropy", *Entropy*. 19, 1–14 (2017).
  47. C. Bertini, E. Ridolfi, L.H.R. de Padua, F. Russo, F. Napolitano, L. Alfonso, "An entropy-based approach for the optimization of rain gauge network using satellite and ground-based data", *Hydrol. Res.* 52, (2021).
  48. Y. Huang, H. Zhao, Y. Jiang, X. Lu, "A method for the optimized design of a rain gauge network combined with satellite remote sensing data", *Remote Sens.* (2020).
  49. J. Keum, K.C. Kornelsen, J.M. Leach, P. Coulibaly, "Entropy applications to water monitoring network design: A review", *Entropy*. 19, (2017).
  50. J.C. Chacon-Hurtado, L. Alfonso, D.P. Solomatine, "Rainfall and streamflow sensor network design: A review of applications, classification, and a proposed framework", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 3071–3091 (2017).
  51. H. Foroozand, S. V. Weijjs, "Objective functions for information-theoretical monitoring network design: What is "optimal"?", *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, (2021).

