

REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA

REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA AGENTZIA REGIONALE PRO S'AMPARU DE S'AMBIENTE DE SARDIGNA AGENZIA REGIONALE PER LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE DELLA SARDEGNA ARPAS

Dipartimento Geologico Servizio Idrogeologico e Idrografico

Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRACC) Macro-Azione C. Integrazione nella modellazione delle piene di sottobacino degli scenari di evoluzione del clima disponibili per la Sardegna RELAZIONE TECNICA

Novembre 2023

Sommario

1.	Intr	roduzione	1		
2.	Me	todologia e caso studio	3		
2	.1.	Il bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari	4		
2	.2.	Rete pluvio-termometrica e statistiche idrologiche	6		
2	.3.	Scenari di cambiamento climatico	8		
2	.4.	Modellazione idrologica1	7		
3.	3. Risultati21				
4.	4. Considerazioni finali25				
Bib	3ibliografia27				

1. Introduzione

La Regione Autonoma della Sardegna (RAS) – Direzione Generale della Difesa dell'Ambiente, nel ruolo di ufficio di coordinamento tecnico e supporto operativo per l'attuazione della Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SRAAC), ha incluso l'adattamento ai cambiamenti climatici tra gli elementi costitutivi del Programma Regionale di Sviluppo 2020-2024 (PRS), come approvato con la Deliberazione n. 9/15 del 5 marzo 2020.

Al fine di portare la Strategia a piena attuazione è necessario rendere accessibili le basi di conoscenza e potenziare le strutture per la governance e gli strumenti disponibili, integrando le procedure e ampliando l'indagine ad altri settori prioritari. A questo scopo, la Regione, attraverso la Deliberazione n. 59/83 del 27 novembre 2020, ha individuato nell'ARPAS, nell'ISPRA, nelle Università di Sassari e di Cagliari, i soggetti qualificati di comprovata e pluriennale esperienza incaricati del supporto tecnico-scientifico e della predisposizione dello studio per l'attuazione e la revisione della Strategia.

Con Determinazione n. 1696/2021 del 03/11/2021 il Direttore Generale di ARPAS ha approvato l'Accordo di collaborazione tra RAS–Direzione Generale della Difesa dell'Ambiente e ARPAS per la realizzazione di attività finalizzate alla attuazione e revisione della "Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici".

Il Piano Operativo di Dettaglio (POD) (prot. 10198/2022 del 29/03/2020) si propone di dettagliare le attività da condurre nell'ambito dell'accordo di collaborazione tecnicoscientifica per la realizzazione di attività istituzionali finalizzate all'attuazione e revisione della "Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici" (SRACC), stipulato tra la RAS e l'ARPAS.

In particolare, questo Servizio si è occupato della "Macro-azione C. Integrazione nella modellazione delle piene di sottobacino degli scenari di evoluzione del clima disponibili per la Sardegna". È stata condotta un'analisi idrologica ed idraulica sul bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari che impatta fortemente all'interno di un'area vastamente popolata come quella della Città Metropolitana di Cagliari e sui centri abitati in prossimità dell'asta principale dello stesso. Il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF), piano territoriale di settore e strumento conoscitivo, normativo, tecnico-operativo, evidenzia come parte del territorio compreso all'interno del bacino del Flumini Mannu di Cagliari è caratterizzato da importanti criticità di tipo idraulico. Considerando le aree prossime alla Città Metropolitana di Cagliari, il PSFF evidenzia le prime criticità nel territorio di Villasor che

risulta maggiormente interessato da inondazioni al di fuori del centro abitato (in prossimità della SS196), mentre il centro abitato più colpito è quello di Decimoputzu, con aree allagabili che si estendono fino alla provinciale SP3 per Villaspeciosa. Nel tratto fra Decimoputzu e Decimomannu, sono le infrastrutture a creare significative interferenze col reticolo fluviale, traducendosi in allagamenti in destra idraulica nei quartieri nord orientali di Villaspeciosa e negli insediamenti periferici di Decimomannu in sinistra idraulica. Nel tratto finale, le criticità sono dovute al possibile sormonto arginale in sponda sinistra che potenzialmente provoca allagamenti sulla rete viaria e su un'area densamente urbanizzata, ricca di insediamenti agricoli, civili ed industriali. Data l'elevata propensione a fenomeni alluvionali dell'area, è fondamentale analizzare come il cambiamento climatico potrebbe incidere su aree così già altamente esposte al rischio idrogeologico ed idraulico.

Per comprendere, qualificare e quantificare gli effetti del cambiamento climatico sul bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari sono stati utilizzati congiuntamente la modellistica idrologica e degli scenari climatologici di cambiamento climatico. È stata sondata la possibilità di rappresentare questi ultimi mediante il contributo del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC) implementando modelli climatologici resi disponibili in due possibili scenari (RCP 4.5 e RCP 8.5) con una simulazione che ricopre gli anni dal 2005-2050 oppure mediante l'utilizzo di eventi estremi pluviometrici brevi-intensi. La modellazione idrologica ha simulato l'influenza dei cambiamenti climatici sulla risposta idrologica di un bacino idrografico, con particolar focus sul deflusso di piena.

Nei paragrafi successivi viene illustrata la metodologia e le ipotesi adottate per condurre uno studio che si pone come obbiettivo quello di definire ed analizzare i possibili effetti sull'idrologia e sulla progettazione in ambito idraulico dovuti al cambiamento climatico all'interno di un bacino già fortemente interessato da criticità, pertanto è stato considerato come caso studio il bacino del Flumini Mannu di Cagliari.

Infine, sono riportati i risultati ottenuti sul bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari e le conclusioni di carattere generale.

2. Metodologia e caso studio

Nella seguente relazione viene mostrato l'impatto idrologico e idraulico dovuto alle possibili evoluzioni climatiche su un bacino idrografico in cui parecchie aree urbanizzate sono fortemente soggette a rischio idrogeologico ed idraulico, ovvero il Flumini Mannu di Cagliari. Attraverso la modellazione idrologica di tipo afflussi-deflussi sono stati eseguiti una serie di esperimenti modellistici per stimare possibili scenari idrologici e idraulici in condizioni di cambiamento climatico. In particolare, si è utilizzato un modello idrologico, rappresentante il comportamento idrologico del Flumini Mannu di Cagliari, per il quale le forzanti climatologiche rappresentano l'evoluzione e il cambiamento climatico futuro, qui declinate e nominate scenari di cambiamento climatico. Si fa presente che la seguente relazione tecnica ha solo lo scopo di dare una descrizione qualitativa dei fenomeni succitati. Si lascia ad analisi più dettagliate ed approfondite la capacità di comprendere dal punto di vista quantitativo la reale incidenza dei cambiamenti climatici sull'idrologia e l'idraulica a scala di bacino idrografico e locale.

La descrizione del bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari è presente nel Capitolo 2.1, mentre la descrizione della rete pluvio-termometrica e di alcune semplici statistiche sui dati registrati è riportata nel Capitolo 2.2. La descrizione del modello idrologico e delle procedure di calibrazione vengono discusse all'interno del Capitolo 2.4, mentre la descrizione degli scenari di cambiamento climatico adottati come input meteorologico nel modello idrologico vengono descritti nel Capitolo 2.3. Nel Capitolo 3 si riportano i risultati finali di questo lavoro, mentre nel Capitolo 4 vengono riportate delle considerazioni generali anche sulla base dei risultati ottenuti.

2.1. Il bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari

Il bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari a Decimomannu è situato nella Sardegna meridionale ed ha un'estensione di 1663 km² (Figura 2.1.1). Al Flumini Mannu di Cagliari, che rappresenta l'asta principale del bacino, confluiscono procedendo da monte verso valle il Torrente Leni (destra idraulica) e il Riu Mannu di San Sperate (sinistra idraulica). Il bacino è caratterizzato da basse pendenze nella parte centrale in quanto attraversa la piana del



Figura 2.1.1. Inquadramento bacino idrografico Flumini Mannu di Cagliari a Decimomannu e i suoi affluenti, relativo spartiacque e indicazione sezione di chiusura su sezione idrometrica F37 – Flumini Mannu a Decimomannu.



Figura 2.1.2. Sezione idrometrica F37 – Flumini Mannu di Cagliari a Decimomannu.

Campidano. La sezione di chiusura scelta per il Flumini Mannu di Cagliari corrisponde con la sezione idrometrica in cui il Servizio Idrogeologico ed Idrografico di ARPAS ha installato una stazione di monitoraggio idrometrico con finalità di protezione civile (Figura 2.1.2). Si riportano in Tabella 2.1 le principali caratteristiche idrologiche e morfologiche del bacino.

Area A [km ²]	1663
Lunghezza dell'asta principale L [km]	64,28
Pendenza dell'asta principale J [m/m]	0,008
Quota della sezione terminale H _o [m slm]	4,79
Altitudine media Hm [m slm]	252,90

Tabella 2.1. Parametri morfologici e idrologici del bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari.

2.2. Rete pluvio-termometrica e statistiche idrologiche

Al fine di caratterizzare la climatologia di lungo termine del bacino del Flumini Mannu di Cagliari sono stati considerati i dati pluviometrici di 57 stazioni termo-pluviometriche (Figura 2.2.1). Si tratta di un dataset pluviometrico reso disponibile dal Dipartimento Meteoclimatico di ARPAS, costituito dall'omogeneizzazione dei dati pluviometrici provenienti da stazioni di diversi enti (Università di Sassari e Cagliari, Servizio Idrogeologico e Idrografico di ARPAS, Aeronautica). Il dataset contiene i dati termo-pluviometrici di stazioni di monitoraggio in telemisura e tradizionali situate nell'intorno del bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari. Il dataset fa riferimento al progetto "Climatologia della Sardegna per il trentennio 1981-2010".

La precipitazione media annua è stata stimata sul bacino del Flumini Mannu pari a 577 mm, mentre la precipitazione mensile presenta un minimo nei mesi estivi per poi crescere e



Figura 2.2.1. Stazioni pluviometriche costituenti il database pluviometrico a scala giornaliera nel periodo 1981-2005.

raggiungere i valori massimi negli ultimi mesi dell'anno (Novembre – Dicembre) come riportato in Figura 2.2.2.



Figura 2.2.2. Precipitazione media mensile bacino Flumini Mannu di Cagliari (1981-2005).

2.3. Scenari di cambiamento climatico

In una prima fase si è ipotizzato di caratterizzare gli scenari di cambiamento climatico da utilizzare come input meteorologico del modello idrologico del Flumini Mannu di Cagliari mediante i dati provenienti dal dataset VHR-PRO_IT (Very High-Resolution PROjections for ITaly) (Raffa M. et. al., 2023) che rappresentano l'evoluzione del clima rispettivamente per il periodo 1981-2005 (scenario *historical*) e 2006-2050 (scenario futuro). Gli scenari futuri adottati sono quelli consueti all'interno della letteratura scientifica e dell'IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change, dal quinto rapporto in poi) ovvero RCP 4.5 e RCP 8.5 (2006-2050). Il dataset è prodotto dal Centro-Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC).

Lo scenario *historical* generalmente viene considerato al fine di valutare le performance del modello stesso nel riprodurre correttamente il clima passato mediante il confronto con i dati osservati. Invece, RCP è l'acronimo di *Representative Concentration Pathway*, ovvero l'ipotesi di evoluzione della concentrazione di gas serra all'interno dello scenario climatico futuro. Il numero associato rappresenta il valore di forzante radiativo supposto all'anno 2100 (4.5 e 8.5 W/m²). Gli scenari dell'evoluzione della concentrazione di gas serra della concentrazione di gas serra rappresentano un input del modello climatico che risulta così influenzato nella riproduzione delle variabili climatiche come precipitazione e temperatura.

VHR-PRO_IT è il frutto degli output di una catena modellistica che vede a monte il modello di larga scala Italy8Km-CM e di seguito un modello di dynamical downscaling COSMO-CLM. Il dataset rappresenta a scala oraria la distribuzione spaziale di alcune variabili climatiche e riproduce il clima sul territorio regionale, ma in questo studio verranno considerati i dati sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari. La descrizione dell'evoluzione climatica è rappresentata dall'andamento di un insieme di variabili climatiche, sia nello spazio che nel tempo (matrici 3d). La variabile climatologica considerata è la precipitazione. Il grigliato di calcolo ha un passo di 2,2 km e in Figura 2.3.1 si riporta la copertura per il bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari.

In Figura 2.3.2 si riporta il valore di precipitazione annua sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari secondo gli scenari RCP 4.5 e 8.5 e le rispettive linee di tendenza per il periodo 2006-2050. Si osserva come la precipitazione annua tende a diminuire nel futuro, con un tasso di riduzione di -0,29 e -2,67 mm/anno rispettivamente per gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5. Le linee di tendenza mostrano come nello scenario RCP 4.5 la riduzione della precipitazione annua sia meno marcata nel periodo 2006-2050 rispetto allo scenario RCP 8.5, ma comunque entrambi mostrano un'importante riduzione della precipitazione. Il valore

medio della precipitazione annua nell'ultimo decennio (2040-2050) per gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 è rispettivamente pari a 493 mm e 415 mm, indicando una riduzione rispetto alla media di lungo termine osservata (577 mm, Capitolo 2.2) del 15% e del 28%.

Le proiezioni climatiche secondo gli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5 del database VHR-PRO_IT mostrano come siano significative le variazioni delle statistiche della precipitazione e si osserva e comprende che potrebbero determinare potenzialmente importanti variazioni sul bilancio idrologico. Tuttavia queste analisi sono state compiute senza tenere in considerazione l'errore sistematico dei modelli climatici (bias, e ciò determina una stima più incerta del clima futuro. Pertanto le condizioni climatiche future presentate mediante l'analisi di alcune variabili climatologiche sono state rivalutate solo a monte di una preliminare procedura di correzione del bias, la cosiddetta *bias correction*.

Il principio fondamentale delle procedure di bias correction è quello di confrontare statisticamente o in maniera deterministica i prodotti della modellazione climatica (timeseries di variabili climatiche come precipitazione e temperatura) relativi allo scenario climatico *historical* con i dati osservati all'interno della stessa finestra temporale. I fattori di correzione così ottenuti vengono adottati per gli scenari futuri, RCP 4.5 e RCP 8.5 (Figura 2.3.3).



Figura 2.3.1. Grigliato di calcolo VHR-PRO_IT contenuto all'interno del bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari.



Figura 2.3.2. Precipitazione annua sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari e linee di tendenza per gli scenari RCP 4.5 e 8.5.



Figura 2.3.3. Rappresentazione esplicativa con diagramma a blocchi del processo di bias correction. Mediante confronto fra i dati osservati (Observations) e output dei modelli climatici (Model output) relativi alla finestra temporale degli scenari historical, si stima il bias e quindi la correzione da applicare. Gli output modellistici relativi agli scenari futuri (no bias correction) vengono successivamente corretti (adjust, bias correction) (Schwertfeger, B. T., and Lohmann, G., and Lipskoch, H., 2023).

Un metodo di tipo *quantile mapping* (Teutschbein, C. and Seibert, J., 2012) è stato adottato al fine di correggere l'errore direttamente sulla distribuzione di densità di probabilità della precipitazione giornaliera; sono stati adottati gli algoritmi di calcolo della libreria Python *xclim*: nel dettaglio la libreria implementa la procedura di bias correction di tipo *quantile mapping* come sviluppata da Hoffmann, H. and Rath, T. (2012). Sono stati utilizzati i dati di precipitazione giornaliera provenienti dalle 57 stazioni pluviometriche afferenti al Flumini Mannu di Cagliari, compresi fra gli anni 1970-2005. I dati disponibili come serie pluviometriche sono stati interpolati spazialmente su una griglia analoga a quella dei dati provenienti dal modello climatico (Figura 2.3.2): si tratta di una operazione necessaria al fine di eseguire il confronto giornaliero (aggregando i dati orari del database VHR-PRO_IT a scala giornaliera) finalizzato alla calibrazione dei parametri correttivi nel processo di bias correction.

In Figura 2.3.4, si riportano i valori di precipitazione annua per il Flumini Mannu di Cagliari relativi agli scenari historical (1981-2005) soggetto a bias correction e non soggetto a bias correction comparati al dato osservato.

La procedura di bias correction ha individuato correttamente i parametri correttivi per eseguire la correzione degli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5, come si può evincere confrontando la media di precipitazione annua dello scenario historical sottoposto a bias correction e quella dei dati osservati (572 mm e 577 mm), che in questo modo risultano confrontabili. Precedentemente la media di precipitazione annua per lo scenario historical era pari a 438 mm. Si evidenzia come inizialmente quindi VHR-PRO_IT sottostimasse la precipitazione media annua nel periodo di riferimento e quindi per lo scenario historical (1981-2005).

In Figura 2.3.5 si riporta l'andamento della precipitazione annua per il bacino del Flumini Mannu di Cagliari per gli scenari futuri (RCP 4.5 e 8.5) relativi al dataset VHR-PRO_IT sottoposto a procedura di bias correction. Si osserva come a seguito della correzione del bias, il tasso di riduzione sia superiore in segno e pari a -0,36 e -3,50 mm/anno. A seguito di procedura di bias correction, per lo scenario RCP 4.5 si osserva come la precipitazione media annua nel decennio 2040-2050 sia maggiore (643 mm) rispetto a quella osservata nel periodo historical sia nel caso di correzione del bias (572 mm) che senza correzione (438 mm). Nello scenario RCP 8.5 soggetto a correzione del bias si osserva un decremento della precipitazione annua nel decennio 2040-2050 che risulta essere pari a 542 mm, inferiore allo scenario historical (con bias correction), con un decremento percentuale rispetto ai dati osservati del periodo di riferimento 1981-2005 pari al 6%.

A seguito delle analisi presentate riguardanti il database VHR-PRO_IT, è necessario riportare alcune necessarie considerazioni che mostrano i limiti nell'utilizzo di questi dati ai fini di questo studio.

L'utilizzo di un unico dataset proveniente da un unico modello climatico non fornisce affidabilità alle previsioni compiute dallo stesso. Allo scopo di prevedere con maggiore affidabilità l'evoluzione climatica di una determinata area è preferibile riferirsi ad un insieme di modelli (ensemble): in tal modo si può verificare la presenza di eventuali modelli *outlier*, ovvero modelli che compiono previsioni completamente discordanti dai restanti modelli. Inoltre l'utilizzo di un ensemble fornirebbe un'indicazione sull'incertezza delle predizioni climatiche degli stessi modelli climatici ad una certa data: modelli climatici discordanti, alta incertezza. Analogamente, l'impiego di un ensemble, se adoperato come input all'interno di un modello idrologico o idraulico, permetterebbe di creare un inviluppo di possibili scenari futuri e quindi di poter considerare e prevedere in fase pianificatoria diversi scenari di intervento possibili.

L'applicazione di procedure di bias correction è necessaria, come evidenziato dalla letteratura scientifica, per migliorare la qualità e l'affidabilità delle proiezioni climatiche, eliminando gli errori sistematici e riproducendo in maniera più verosimile l'andamento stagionale delle variabili climatiche. Il database VHR-PRO_IT contiene gli output di una catena modellistica (in questo caso grigliati 3d di precipitazione e temperatura) con una risoluzione spaziale di 2,2 km e risoluzione temporale oraria. Data l'impossibilità di avere a disposizione per il periodo 1980-2005 un dataset pluviometrico validato di dati osservati alla stessa scala temporale oraria, non è stato possibile eseguire una procedura di bias correction classica sul dataset VHR-PRO_IT. La bias correction è stata utilizzata per correggere la previsione futura sulla variabile precipitazione giornaliera **solo a titolo di** esempio, allontanandosi dagli scopi di questo studio che mira ad analizzare gli effetti degli eventi estremi (durata inferiore alle 24 ore).

Viste queste considerazioni fatte sul dataset in oggetto, è stata individuata una differente modalità con cui determinare gli scenari di cambiamento climatico.

La letteratura scientifica internazionale è concorde nell'affermare che gli eventi estremi pluviometrici a partire dagli anni '50 sono aumentati in intensità e frequenza (IPCC, 2023, Allen and Ingram, 2002; Giorgi et al., 2019) e in particolar modo nell'area mediterranea sulla base dei dati osservati e delle proiezioni modellistiche (Frei et al., 1998; Kostopoulou and

Jones, 2005; Gao et al., 2006; Alexander et al., 2006; Toreti et al., 2013; Vautard et al., 2015; Papalexiou and Montanari, 2019; Cardell et al., 2020, Marras et al., 2021).



Figura 2.3.4. Precipitazione annua sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari in base ai dati osservati e per gli scenari historical senza correzione del bias (no bias correction) e con correzione del bias (bias correction).



Figura 2.3.5. Precipitazione annua sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari e linee di tendenza per gli scenari RCP 4.5 e 8.5.

Pertanto si è scelto un approccio metodologico che tenga conto di questa evidenza al fine di caratterizzare gli scenari climatici futuri.

Gli scenari di cambiamento climatico sono stati rappresentati come ietogrammi sintetici di tipo Chicago ($\Delta t = 15$ min), il cui valore cumulato *H* è stato posto pari all'altezza di precipitazione critica per il bacino del Flumini Mannu di Cagliari, stimata mediante curve di possibilità pluviometrica (CPP) ottenute con la distribuzione di probabilità TCEV (Deidda et al. 2000), incrementata delle percentuali dal 5% al 30%.

La durata di precipitazione dello ietogramma sintetico e di *H* è stata posta pari al tempo di corrivazione del bacino del Flumini Mannu di Cagliari. Quest'ultimo valore è stato valutato per il caso di studio in esame mediante diverse formulazioni presenti in letteratura che adottano come coefficienti i principali parametri idrologici e morfologici del bacino. In Tabella 2.2 si riportano i valori del tempo di corrivazione in ore con le diverse formulazioni.

Giandotti	20,6
Ventura	12,9
Viparelli (v=0,9 m/s)	19,8
Kirpic	20,5
Tournon	58,5
Pasini	72,1

Tabella 2.2. Valore del tempo di corrivazione in ore per il bacino del Flumini Mannu di Cagliari a Decimomannu.

Sulla base dei risultati ottenuti si è reputata opportuna la scelta di un tempo di corrivazione pari a 20 ore: la formula di Giandotti si adatta a bacini con area superiore ai 50 km² come il Flumini Mannu di Cagliari e propone risultati analoghi a quella semplice di Viparelli con una velocità media del lungo l'asta principale del tutto accettabile. È stato quindi scelto per arrotondamento il valore di 20 ore.

Quindi per eventi pluviometrici con tempi di ritorno T_R (50, 100, 200 anni) è stato generato un set di ietogrammi Chicago corrispondenti a differenti incrementi dell'altezza di precipitazione critica cumulata del Flumini Mannu di Cagliari a Decimomannu. In Tabella 2.3 si riportano i dati caratteristici degli ietogrammi considerati. Gli ietogrammi sintetici Chicago associati ad un incremento nullo rappresentano la condizione attuale, ovvero il valore cumulato di altezza di precipitazione critica stimato con Deidda et al. 2000, caratterizzante una condizione priva di cambiamento climatico. In Allegato 1 invece le serie temporali di precipitazione che rappresentano gli ietogrammi sintetici succitati.

Gli ietogrammi così generati sono stati utilizzati come forzante pluviometrica del cambiamento climatico nel modello idrologico del Flumini Mannu di Cagliari (Capitolo 2.4).

La scelta di considerare tali input pluviometrici per il modello idrologico permette di valutare in termini qualitativi come, ad esempio per la verifica di alcuni manufatti e opere idrauliche e per la valutazione delle aree di pericolosità idraulica etc., possa essere significativa l'influenza dei cambiamenti climatici sugli eventi estremi pluviometrici brevi-intensi. La portata di piena al colmo che rappresenta in molti contesti progettuali la variabile di progetto Q_c , è spesso stimata con l'adozione di metodi indiretti, cioè approcci che implicano la caratterizzazione degli eventi pluviometrici per la stima di Q_c . Proprio in questo caso, fissato un tempo di ritorno T_R e una durata dell'evento, si stima l'altezza di precipitazione critica cumulata H mediante curve di possibilità pluviometrica. La corretta valutazione di quest'ultima risulta cruciale nella definizione di Q_c e deve essere opportunamente valutata anche in funzione di futuri e possibili cambiamenti climatici. Gli scenari di cambiamento climatico all'interno del modello idrologico vogliono evidenziare come una stima della forzante meteorologica che non tiene conto dell'incremento dell'intensità dei fenomeni pluviometrici estremi e quindi del cambiamento climatico possono, ad esempio in un contesto di progettazione, portare ad una sottostima delle variabili di progetto come Q_c .

T _R	H attuale Deidda et al. 2000 [mm]	Incremento	H incrementata [mm]
	134,27	+5%	140,98
		+10%	147,69
50		+15%	154,40
50		+20%	161,12
		+25%	167,83
		+30%	174,54
	154,54	+5%	162,27
		+10%	169,99
100		+15%	177,72
100		+20%	185,45
		+25%	193,17
		+30%	200,90
	175,10	+5%	183,85
		+10%	192,61
200		+15%	201,36
200		+20%	210,12
		+25%	218,87
		+30%	227,63

Tabella 2.3. Altezze di precipitazione critica cumulata (Deidda et al. 2000) attuale (H attuale) e incrementate rappresentative del cambiamento climatico per diversi tempi di ritorno T_R (H incrementata).

2.4. Modellazione idrologica

In questo Capitolo si illustra e descrive il modello idrologico adottato per rappresentare qualitativamente il comportamento del Flumini Mannu di Cagliari in condizioni di cambiamento climatico, come riportato nel precedente Capitolo 2.3.

La modellazione idrologica è stata eseguita mediante l'utilizzo del software HEC-HMS, prodotto da Hydrologic Engineering Center (HEC) e ampiamente utilizzato per la modellazione idrologica in ambito professionale (Figura 2.4.1). HEC-HMS è una suite di



Figura 2.4.1. Schermata software HEC-HMS 4.11.

modelli che permette di rappresentare numerosi processi idrologici (precipitazione, trasformazione afflussi-deflussi, intercezione vegetale, evapotraspirazione, infiltrazione, laminazione di opere di sbarramento) sia in condizioni di deflusso di piena (breve durata) che per bilanci idrologici (lunga durata). Il software esegue una modellazione idrologica distribuita, semi-distribuita o concentrata, e le forzanti meteorologiche possono essere schematizzate in maniera puntuale (time-series) oppure come mappe di precipitazione/temperatura. I modelli digitali del terreno possono essere utilizzati al fine di tracciare il reticolo idrografico, i sottobacini e la linea spartiacque del bacino idrografico e di implementare modelli di trasformazione afflussi – deflussi complessi.

Per una simulazione idrologica è necessario compilare i moduli nel software *Basin models*, *Meteorologic Models*, *Control Specifications*, *Grid Data, Terrain Data*. Questi moduli descrivono il processo fisico di trasformazione afflussi – deflussi, i dati meteorologici per la ricostruzione degli eventi come la precipitazione e l'evapotraspirazione anche in formato spazialmente distribuito, il modello digitale del terreno e le informazioni necessari per impostare la simulazione idrologica (inizio e fine simulazione e discretizzazione temporale).

Nel caso di studio è stato considerato il bacino del Flumini Mannu di Cagliari con sezione di chiusura a Decimomannu, nella sezione idrometrica F37 Flumini Mannu a Decimomannu in corrispondenza dell'attraversamento sulla SS130 appartenente alla rete ARPAS (Capitolo 2.1). Per caratterizzare la morfologia del terreno ed eseguire le operazioni automatiche di tracciamento del bacino idrografico e del reticolo idrografico è stato scelto il modello digitale del 10 disponibile regionale terreno con passo m, sul geoportale (https://www.sardegnageoportale.it/).

Il modello di trasformazione afflussi-deflussi adottato è il modello di Clark modificato (ModClark) a parametri distribuiti. La maglia di discretizzazione del bacino relativa al modello idrologico è stata scelta regolare e di dimensioni pari a 2 km (Figura 2.4.2). Ogni cella della maglia è caratterizzata da un differente tempo di concentrazione che è scalato in funzione del *tempo di concentrazione del bacino* t_c e del rapporto fra la *travel distance* di ogni cella e quella massima, quest'ultima misurata sul reticolo idrografico del bacino alla sezione di chiusura. Contrariamente a t_c , lo *storage coefficient* R è unico per tutte le celle della maglia ed è l'unico parametro del modello del serbatoio lineare. Pertanto R e t_c sono i due parametri del modello di trasformazione afflussi-deflussi considerati e tali parametri saranno oggetto di calibrazione.

Il modello di infiltrazione scelto è quello del Curve Number (CN) del Soil Conservation Service per il quale, per ogni cella della maglia, il CN è stato posto pari al valore desunto



Figura 2.4.2. Rappresentazione grafica del grigliato di modellazione del Flumini Mannu di Cagliari.

dalla carta del Curve Number sviluppata dal Dipartimento Geologico di ARPAS (Figura 2.4.3). Si riporta il valore medio del Curve Number per il bacino del Flumini Mannu di Cagliari in Tabella 2.4. Al fine di considerare le condizioni più cautelative, sono state considerate nel modello idrologico condizioni di umidità del suolo elevate, cioè potenziale di infiltrazione minimo (AMC III).



Figura 2.4.3. Mappa Curve Number (CN) adottata nel modello idrologico del Flumini Mannu di Cagliar, sviluppata dal Dipartimento Geologico di ARPAS.

CN (AMC II)	70
CN (AMC III)	84

Tabella 2.4. Valore Curve Number (CN) medio in diverse condizioni di umidità del suolo (AMC II e AMC III) relativo al bacino del Flumini Mannu di Cagliari.

La calibrazione del bacino non è stata eseguita con le classiche procedure in quanto non sono disponibili idrogrammi osservati in nessuna sezione del bacino idrografico. Pertanto si è cercato di calibrare i due parametri del modello idrologico in maniera tale da ottenere il colmo dell'idrogramma di piena per diversi tempi di ritorno T_R, pari alla portata al colmo adottata nel Piano Stralcio Fasce Fluviali (PSFF) per analoga sezione sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari. Queste portate al colmo verranno indicate con la simbologia Q_{PSFF}.

Il modello idrologico è stato forzato con degli ietogrammi sintetici di tipo Chicago, con durata di pioggia pari al tempo di corrivazione del bacino e istante di picco pari a 2/5 del tempo di corrivazione. Quest'ultimo è stato posto pari a 20 ore, si veda Capitolo 2.3 e Tabella 2.2. Seguendo quest'approccio quindi, si riportano in Tabella 2.5, le portate di piena riportate dal PSFF per il Flumini Mannu di Cagliari, ottenute per i diversi tempi di ritorno T_R , ovvero 50, 100 e 200 anni. La calibrazione dei parametri t_c e R è avvenuta mediante una procedura trail&error, i valori dei parametri calibrati si riportano nella Tabella 2.6.

T _R [Anni]	Q _{PSFF} [m ³ /s]
50	3344
100	4073
200	4794

Tabella 2.5. Portate al colmo per diversi tempi di ritorno T_R alla sezione di Decimomannu del Flumini Mannu di Cagliari secondo il PSFF.

t_c [ore]	10
<i>R</i> [ore]	3.5

Tabella 2.6. Parametri calibrati del modello idrologico del Flumini Mannu di Cagliari.

Si riportano quindi in Tabella 2.7 i valori di portata al colmo Q_c ottenuti mediante simulazione con il modello idrologico e quelli adottati nel PSFF Q_{PSFF} per diversi tempi di ritorno T_R e la loro differenza percentuale: si osserva come il modello sottostimi la portata al colmo stimata nel PSFF, ma con scarti relativamente ridotti .

Non è stato considerato l'effetto di laminazione dovuto alle opere idrauliche di sbarramento presenti all'interno del bacino del Flumini Mannu di Cagliari (Diga is Barrocus, Diga del Rio Leni, Diga Sa Forada, Traversa Casa Fiume e Traversa di Monastir). Tale approssimazione è accettabile ai fini di questo studio in quanto si stanno eseguendo degli esperimenti modellistici che hanno la pretesa di comprendere qualitativamente l'influenza dei cambiamenti climatici sul regime idrologico del Flumini Mannu di Cagliari.

T _R	Q _c [m³/s]	Q _{PSFF} [m ³ /s]	Δ [%]
50	3334,7	3344	-0,28%
100	4059,7	4073	-0,33%
200	4810,5	4794	0,34%

Tabella 2.7. Portate al colmo per diversi tempi di ritorno T_R ottenute mediante modello idrologico (Q_c) e PSFF (Q_{PSFF}) e relativa differenza percentuale (Δ).

3. Risultati

A seguito della calibrazione del modello idrologico del Flumini Mannu di Cagliari (Capitolo 2.4) e della definizione della forzante meteorologica (input) rappresentante i diversi scenari di cambiamento climatico (Capitolo 2.3), è stato possibile eseguire degli esperimenti modellistici al fine di dimostrare l'influenza dei cambiamenti climatici sul deflusso di piena. Si discuteranno qualitativamente e quantitativamente i risultati ottenuti con tutte le limitazioni relative al processo di calibrazione, discusse nel Capitolo 3.

Nelle Figure 3.1, 3.2 e 3.3 vengono riportati gli esiti della modellazione idrologica e in particolare si riportano gli idrogrammi di piena generati mediante le diverse simulazioni con diversi scenari di cambiamento climatico. Nell'Allegato 2 si riportano in formato tabellare gli idrogrammi per tutti gli scenari di cambiamento climatico osservato. L'incremento del valore cumulato di precipitazione critica determina rispetto alla configurazione attuale di riferimento (attuale, priva di cambiamento climatico) un aumento della portata al colmo Q_c per tutti i T_R . Per gli scopi di tale relazione è necessario porre proprio l'attenzione sulle portate al colmo Q_c, che come affermato nel Capitolo 2.3, rappresenta un parametro fondamentale in contesto idraulico. In particolare, considerando le simulazioni in cui si adottano gli scenari di cambiamento climatico all'interno del modello idrologico, in funzione dell'incremento di H si osserva un aumento della portata al colmo Q_c compreso fra il 7,26% e il 44,40% per T_R = 50 anni, fra il 7,04% e il 42,74% per il T_R = 100 anni e fra il 6,80% e il 41,30% per il T_R = 200 anni (Tabella 3.1). Tale esperimento modellistico mette in luce l'impatto che potrebbe generare un cambiamento di intensità sugli eventi estremi e quindi sulla stima di alcune variabili di progetto come la portata al colmo di progetto Q_c, ed inoltre la necessità di ridefinire le procedure e le metodologie di stima delle aree di pericolosità idraulica (Piano Stralcio Fasce Fluviali, PAI, PGRA).

A 11	$T_R = 50 \text{ anni}$		$T_R = 100 \text{ anni}$		$T_R = 200 \text{ anni}$	
ΔH	Q_c	ΔQ_c	Q_c	ΔQ_c	Q_c	ΔQ_c
H attuale (Deidda et al. 2000)	3334,7	-	4060,1	-	4810,6	-
5%	3576,7	7,26%	4346,1	7,04%	5137,9	6,80%
10%	3821,2	14,59%	4632,9	14,11%	5467,1	13,65%
15%	4067,4	21,97%	4921,4	21,21%	5797,8	20,52%
20%	4315,1	29,40%	5211,5	28,36%	6129,8	27,42%
25%	4564,6	36,88%	5502,9	35,54%	6463,1	34,35%
30%	4815,4	44,40%	5795,5	42,74%	6797,4	41,30%

Tabella 3.1. Portate al colmo Q_c e relativi incrementi percentuali ΔQ_c per differenti incrementi dell'altezza di precipitazione critica cumulata H.



Figura 3.1. Idrogrammi di piena associati agli scenari con tempo di ritorno $T_R = 50$ anni per condizioni di assenza di cambiamento climatico (H attuale, Deidda et. al. 2000, linea nera) e di cambiamento climatico (incremento H attuale, linee rosse).



Figura 3.2. Idrogrammi di piena associati agli scenari con tempo di ritorno $T_R = 100$ anni per condizioni di assenza di cambiamento climatico (H attuale, Deidda et. al. 2000, linea nera) e di cambiamento climatico (incremento H attuale, linee rosse).



Figura 3.3. Idrogrammi di piena associati agli scenari con tempo di ritorno $T_R = 200$ anni per condizioni di assenza di cambiamento climatico (H attuale, Deidda et. al. 2000, linea nera) e di cambiamento climatico (incremento H attuale, linee rosse).

4. Considerazioni finali

Al fine di soddisfare le esigenze di realizzazione delle attività finalizzate alla attuazione e revisione della "Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici", in particolare per la parte di competenza di questo Servizio, ovvero "Macro-azione C. Integrazione nella modellazione delle piene di sottobacino degli scenari di evoluzione del clima disponibili per la Sardegna", è stata sviluppata la presente relazione tecnica. L'obbiettivo è quello di fornire indicazioni in merito ai possibili scenari idrologici e idraulici, al fine di indirizzare la pianificazione regionale verso una sempre più strutturata consapevolezza nei confronti dei cambiamenti climatici.

Come caso studio è stato scelto un bacino idrografico altamente antropizzato ed urbanizzato come quello del Flumini Mannu di Cagliari, chiuso alla sezione di Decimomannu, in corrispondenza del ponte sulla SS130. Il bacino considerato comprende un'area vastamente popolata come quella della Città Metropolitana di Cagliari, che dal punto di vista idrologico ed idraulico presenta importanti criticità (come evidenziato da PSFF).

Gli scenari di evoluzione climatica esaminati sono stati resi disponibili mediante il contributo del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), in particolare sono stati considerati gli scenari (RCP 4.5 e RCP 8.5) per il periodo dal 2006 al 2050, a scala oraria e su un grigliato con maglie di 2,2 km. Come evidenziato nel Capitolo 2.3, i dataset provenienti dai modelli climatici necessitano di un processo di bias correction al fine di ridurre l'incertezza sulla stima delle caratteristiche climatiche future. Al fine di poter essere applicata tale procedura, l'output del modello climatico in termini di precipitazione è stato aggregato a scala giornaliera e poi successivamente è stato "corretto" mediante comparazione con i dati osservati sullo scenario di riferimento (1980-2005). Come consuetudine in letteratura scientifica, le analisi di impatto eseguite mediante l'utilizzo della modellistica climatica vengono eseguite utilizzando un ensemble di modelli climatici, in particolare per lo studio dell'incidenza degli eventi estremi, viene utilizzato un dataset climatologico bias corrected a scala oraria. Per tale motivo, al fine di perseguire lo scopo di caratterizzare gli scenari di cambiamento climatico nell'ambito di tale studio è stato scelto un approccio differente. Gli scenari di evoluzione climatica per quanto riguarda la componente pluviometrica sono stati rappresentati mediante ietogrammi sintetici di tipo Chicago ($\Delta t = 15$ min), il cui valore cumulato è stato posto pari all'altezza di precipitazione critica media areale per il bacino del Flumini Mannu di Cagliari, stimata mediante curve di possibilità pluviometrica ottenute con la distribuzione di probabilità TCEV (Two-Component Extreme Value) (Deidda et al. 2000), incrementata delle percentuali dal 5% al 30%. La letteratura scientifica si è espressa

all'unisono in merito all'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi pluviometrici intensi per le aree mediterranee (Frei et al., 1998; Kostopoulou and Jones, 2005; Gao et al., 2006; Alexander et al., 2006; Toreti et al., 2013; Vautard et al., 2015; Papalexiou and Montanari, 2019; Cardell et al., 2020), pertanto la caratterizzazione degli eventi estremi secondo queste modalità è stata ritenuta accettabile.

L'esperimento modellistico è stato eseguito considerando differenti tempi di ritorno T_R ed è emerso che in caso di incremento dell'intensità degli eventi estremi sul bacino del Flumini Mannu di Cagliari le portate al colmo Q_C potrebbero aumentare percentualmente in una finestra compresa fra circa il 6% e il 40% in funzione della magnitudo di incremento degli eventi pluviometrici intensi.

Le elaborazioni compiute in questa relazione mettono in luce degli aspetti significativi ai fini dell'adattamento ai cambiamenti climatici per quanto concerne le tematiche associate all'idrologia e all'idraulica. L'incremento dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi potrebbe determinare una erronea stima delle variabili di progetto come la portata al colmo Q_C (Capitolo 3) che determinerebbero valutazioni errate ad esempio in fase di progettazione di opere idrauliche o nella valutazione della pericolosità delle aree fortemente urbanizzate come quelle vallive del bacino idrografico del Flumini Mannu di Cagliari.

Risulta pertanto cruciale un'opportuna caratterizzazione degli eventi estremi di precipitazione futuri in termini di intensità e frequenza che permetta una corretta stima dei deflussi di piena dei bacini idrografici, fondamentale per quanto riguarda gli aspetti idrogeologici ed idraulici del territorio. Al fine della corretta caratterizzazione degli eventi estremi di tipo pluviometrico, è indispensabile quindi un aggiornamento delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) sulla base di un aggiornato database degli eventi pluviometrici per le analisi a breve-medio termine, e per il lungo termine si potrebbe adottare per le stesse un coefficiente correttivo incrementale che tenga conto dei visibili cambiamenti degli eventi pluviometrici estremi, calibrato su un ensemble di modelli climatici relativi alla Sardegna. Si fa presente che quest'ultimo approccio è attualmente adottato dall' Environment Agency del Regno Unito come misura di adattamento ai cambiamenti climatici: in particolare, per differenti tempi di ritorno e in funzione dell'orizzonte temporale considerato, vengono definiti dei coefficienti correttivi incrementali per quantificare l'influenza dei cambiamenti climatici su precipitazione e deflussi di piena, differenziati per diverse aree del Regno Unito (https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessmentsclimate-change-allowances#peak-river-flow-allowances).

Bibliografia

Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A.M.G.K., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K.R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. and Vazquez-Aguirre, J.L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 111.

Allen, M. R., & Ingram, W. J. (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. Nature, 419(6903), 224-232.

Cardell, M.F., Amengual, A., Romero, R. and Ramis, C. (2020). Future extremes of temperature and precipitation in Europe derived from a combination of dynamical and statistical approaches. International Journal of Climatology, 40, 1–28.

Deidda, R., Piga, E., & Sechi, G.M., (2000). Analisi regionale di frequenza delle precipitazioni intense in Sardegna. L'ACQUA, (5), 29-38.

Frei, C., Schär, C., Lüthi, D. and Davies, H.C. (1998). Heavy precipitation processes in a warmer climate. Geophysical Research Letters, 25, 1431–1434.

Gao, X., Pal, J.S. and Giorgi, F. (2006). Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from a high resolution double nested RCM simulation. Geophysical Research Letters, 33.

Giorgi, F., Raffaele, F., & Coppola, E. (2019). The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. Earth System Dynamics, 10(1), 73-89.

Kostopoulou, E. and Jones, P.D. (2005). Assessment of climate extremes in the Eastern Mediterranean.

Mamalakis, A., Langousis, A., Deidda, R., & Marrocu, M. (2017). A parametric approach for simultaneous bias correction and high- resolution downscaling of climate model rainfall. Water Resources Research, 53(3), 2149-2170.

Marras P.A., Lima D.C.A., Soares P.M.M., Cardoso R.M., Medas D., Dore E., De Giudici G. (2001). Future precipitation in a Mediterranean island and streamflow changes for a small basin using EURO-CORDEX regional climate simulations and the SWAT model. Journal of Hydrology, Volume 603, Part B, 127025, ISSN 0022-1694, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127025.

Mehrotra, R., & Sharma, A. (2019). A resampling approach for correcting systematic spatiotemporal biases for multiple variables in a changing climate. Water Resources Research, 55(1), 754-770.

Papalexiou, S.M. and Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. Water Resources Research, 55, 4901–4914. Meteorology and Atmospheric Physics, 89, 69–85.

Raffa, M., Adinolfi, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Mercogliano, P. (2023). Very High Resolution Projections over Italy under different CMIP5 IPCC scenarios. Scientific Data, 10(1), 238.

Schwertfeger, B. T., Lohmann, G., & Lipskoch, H. (2023). Introduction of the BiasAdjustCXX command-line tool for the application of fast and efficient bias corrections in climatic research. SoftwareX, 22, 101379.

Stevens, B., & Bony, S. (2013). What are climate models missing?. Science, 340(6136), 1053-1054.

Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of hydrology, 456, 12-29.

Toreti, A., Xoplaki, E., Maraun, D., Kuglitsch, F.G., Wanner, H. and Luterbacher, J. (2010). Characterisation of extreme winter precipitation in Mediterranean coastal sites and associated anomalous atmospheric circulation patterns. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10, 1037–1050.

Vautard, R. (1990). Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. Monthly Weather Review, 118, 2056–2081.