COMUNE DI SASSARI
SETTORE AMBIENTE E VERDE PUBBLICO

MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Comune di Sassari

Piano locale di adattamento
ai cambiamenti climatici

PROFILO CLIMATICO

cmcc

COMUNE DI SASSARI
SETTORE AMBIENTE E VERDE PUBBLICO

MINISTERO DELL'AMBIENTE
E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Profilo climatico locale per il Comune di Sassari

cmcc

La redazione del profilo climatico locale per il Comune di Sassari rientra tra le iniziative finanziate dal Ministero per l'ambiente e la sicurezza energetica all'interno del Programma sperimentale di interventi per l'adattamento ai cambiamenti climatici in ambito urbano.

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Autori

Fondazione CMCC
Centro Euro-Mediterraneo sui cambiamenti Climatici

Dott.ssa Giuliana Barbato
Dott.ssa Paola Mercogliano
Dr. Alessandro Pugliese
Dott.ssa Serena Marras

Comune di Sassari

Dott.ssa Marge Cannas
Dr. Pier Paolo Spanedda
Dott.ssa Marinella Osilo

Sommario

Introduzione 4

1. Nota metodologica 5

1.1 Informazioni climatiche disponibili 5

1.2 Strumenti per la ricostruzione del clima sul periodo di riferimento: osservazioni 6

1.3 Modelli numerici per la produzione di scenari climatici 7

1.3.1 Scenari IPCC 8

1.3.2 Modelli climatici regionali 8

1.4 Indicatori climatici 9

2. Risultati 10

2.1 Analisi del clima sul periodo di riferimento 1991-2020 10

2.2 Analisi del clima futuro atteso 12

3. Conclusioni 18

Bibliografia 19

Allegato 1: Mappe del clima futuro atteso 21

Allegato 2: Analisi di consistenza tra VHR-PRO_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici 33

Glossario 34

Introduzione

Il presente elaborato ha lo scopo di aggiornare il *Profilo climatico locale per il Comune di Sassari* redatto nel 2018[1] che nel seguito sarà indicato, per brevità, come "profilo climatico precedente".

Lo studio del clima a livello locale, includendo anche l'analisi delle sue future variazioni attese per effetto dei cambiamenti climatici di natura antropica, sulla base di diversi scenari IPCC (https://www.ipcc.ch/), rappresenta uno strumento indispensabile per la valutazione dell'eventuale evoluzione degli impatti, che da tali cambiamenti dipendono, sulle risorse naturali e sui diversi settori socioeconomici, nonché per una successiva valutazione delle vulnerabilità settoriali.

Nel precedente profilo climatico per il Comune di Sassari, l'**analisi del clima sul periodo di riferimento** è stata realizzata sul periodo 1981-2010 a partire dai dati di temperatura (minima e massima) e di precipitazione della stazione di Sassari, forniti da A.R.P.A.S.-Dipartimento Meteoclimatico. In questa nuova versione, l'analisi è stata aggiornata considerando un periodo di riferimento più recente (1991-2020), includendo nell'analisi anche il periodo 2011-2020 con i medesimi dati forniti sempre da A.R.P.A.S.-Dipartimento Meteoclimatico.

Invece, per quanto riguarda le **variazioni climatiche attese**, esse sono state aggiornate considerando due **nuovi periodi futuri di interesse**: la finestra temporale centrata intorno al 2035[2] (**2021-2050**) e quella centrata sul 2050[3] (**2036-2065**). Vengono considerati tre scenari specifici dell'IPCC: *RCP8.5 "Ad elevate emissioni", RCP4.5 "Forte mitigazione", RCP2.6 "Mitigazione aggressiva"*.

Le analisi, inoltre, sono state effettuate sulla base dei dati estratti dalle seguenti simulazioni:

- Simulazioni disponibili nel programma EURO-CORDEX alla massima risoluzione disponibile, recentemente utilizzate nel Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico (PNACC, 2023), attualmente in fase di completamento, a valle della procedura di Valutazione Ambientale Strategica
- simulazione VHR-PRO_IT (Very High-Resolution PROjections for Italy; Raffa et al. 2022) con risoluzione di 2km utilizzata recentemente nell'aggiornamento della Strategia regionale di adattamento ai cambiamenti climatici della Sardegna**.**

Le analisi del clima vengono riportate in termini di **indicatori climatici**, ottenuti dall'elaborazione di variabili climatiche specifiche (precipitazione, temperatura, vento etc.) e giudicati sufficientemente rappresentativi dei pericoli fisici di interesse. Gli indicatori climatici consentono di determinare e di investigare l'evoluzione di specifiche caratteristiche del clima (ad esempio **ondate di calore, tempeste di vento, piogge intense, siccità meteorologica**) in termini di variazione di frequenza, magnitudo ed intensità. Tutti questi elementi sono utili a dare indicazioni preliminari inerenti all'evoluzione degli impatti del cambiamento climatico sul territorio e su diversi settori di interesse e, quindi, a sviluppare politiche efficaci di adattamento al cambiamento climatico. A tale scopo, questo approccio è stato recentemente utilizzato a livello nazionale sia dal Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (MIMS) (Carraro et al., 2021), sia dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE[4])

[1] https://www.comune.sassari.it/.galleries/doc-documenti/Profilo-climatico-Comune-di-Sassari.pdf
[2] Tale finestra temporale di seguito è talvolta denominata 2035s per brevità
[3] Tale finestra temporale di seguito è talvolta denominata 2050s per brevità
[4] http s://www.mase.gov.it/pagina/piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici

all'interno del Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico (PNACC, 2023), attualmente in fase di completamento, a valle della chiusura della procedura di Valutazione Ambientale Strategica.

1. Nota metodologica

Il cambiamento climatico di natura antropica, come riportato dall'ampia letteratura dell'IPCC[5], induce variazioni complesse delle caratteristiche del clima su diverse scale spaziali e temporali. Tali variazioni riguardano, ad esempio, le caratteristiche medie del clima (valori medi annui, ciclo stagionale) e la frequenza, intensità, estensione spaziale e durata dei fenomeni meteorologici estremi[6]. Tali variazioni possono assumere un'entità tale da causare degli impatti negativi sui sistemi ambientali e socioeconomici, facendo insorgere quelli che vengono tipicamente definiti "**pericoli climatici**". Pertanto, conoscere il pericolo climatico è la sua evoluzione attesa costituisce un elemento fondamentale per lo studio e la valutazione del rischio climatico, dato dal prodotto complesso dell'interazione tra **vulnerabilità** (quanto un sistema umano e naturale è suscettibile a subire impatti negativi dei cambiamenti climatici), **esposizione** (ovvero la presenza di persone, ecosistemi, servizi, infrastrutture, attività socio-economiche e culturali, che possono essere esposti agli impatti negativi dei cambiamenti climatici), ed, infine, dal **pericolo climatico** stesso.

Comprendere le caratteristiche del pericolo climatico è un aspetto fondamentale per una corretta e adeguata definizione delle strategie di adattamento[7]. Tali caratteristiche possono essere però controintuitive e complesse, e una loro corretta quantificazione necessita di una conoscenza avanzata dei sistemi impattati. Tuttavia, per analisi generali di contesto, per caratterizzare l'evoluzione spaziale e temporale dei pericoli climatici vengono solitamente utilizzati una serie di indicatori climatici che sintetizzano alcune delle caratteristiche del clima che si ritengono di particolare rilevanza sulla base della conoscenza del territorio e degli eventi atmosferici che possano aver prodotto, nel passato, importanti impatti sul territorio.

Nei successivi paragrafi vengono descritti nel dettaglio le simulazioni climatiche utilizzate, il tipo di analisi condotte e, infine, gli indicatori climatici adottati. Inoltre, allo scopo di facilitare ulteriormente la lettura, il presente documento è arricchito da un **glossario** contenente i termini tecnici maggiormente adoperati nel report.

1.1 Informazioni climatiche disponibili

A seconda della scala temporale considerata, è possibile classificare le informazioni climatiche disponibili in:

- ***Osservazioni*** - Sono fondamentali per comprendere le caratteristiche passate e attuali del clima; includono dati provenienti da una varietà di registrazioni strumentali che vanno dalle osservazioni meteorologiche storiche alle più recenti misurazioni satellitari.
- ***Rianalisi climatiche*** - Combinano osservazioni passate con modelli climatici per generare serie temporali coerenti per un ampio insieme di variabili climatiche per il clima passato e attuale; sono tra i set di dati più utilizzati nelle scienze geofisiche.
- ***Proiezioni climatiche*** - Forniscono proiezioni dei futuri cambiamenti climatici per diversi scenari di concentrazione di gas serra e aerosol sulla base dei risultati di diversi modelli climatici globali e regionali.

1.2 Strumenti per la ricostruzione del clima sul periodo di riferimento: osservazioni

Al fine di avere una migliore conoscenza degli aspetti più locali del clima di Sassari, l'analisi del clima sul periodo di riferimento sull'area di interesse è stata effettuata prendendo in considerazione un periodo più recente (1991-

[5] https://www.ipcc.ch/
[6] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX-Chap3_FINAL-1.pdf
[7] https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/

2020) sempre mediante i dati giornalieri di temperatura minima, massima e di precipitazione, registrati dalla stazione della stazione di Sassari, forniti da ARPAS- Dipartimento Meteoclimatico.

Le serie di dati disponibili durante il periodo 1991-2020 sono state sottoposte ad un controllo di qualità e omogeneità che può essere sintetizzato nelle seguenti fasi:

- ✓ **Analisi di completezza dei dati.** Per ogni risoluzione temporale, viene controllata la presenza di almeno il 75% di dati disponibili in quanto la presenza di missing (dati mancanti) può portare ad analisi poco significative, fortemente distorte e/o addirittura errate.

- ✓ **Individuazione e rimozione dei breakpoint.** Tale procedura, che consiste nell'individuare e rimuovere dalla serie dei dati osservati disomogeneità che sono la conseguenza di fattori esterni non climatici, è stata effettuata mediante due test non parametrici, quello di Pettitt e quello del CUSUM (CUMulative SUM) (ISPRA, 2013).

Tali controlli sono effettuati per escludere eventuali discontinuità nei valori misurati causati dallo spostamento della stazione di misura, sostituzione della strumentazione, cambiamenti nell'esposizione dello strumento o all'adozione di nuove procedure di elaborazione dei dati. Tali fattori possono essere fonte di disomogeneità e determinare una tendenza artificiale nella serie (ISPRA, 2013). Nella Tabella 1 viene riportato il numero totale di anni con dati validi (percentuale di dati mancanti inferiore al 25%), per la stazione di Sassari e per ogni variabile considerata: sono stati esclusi 7 anni per le temperature (minime e massime) e 1 anno per la precipitazione, in quanto era presente una percentuale di dati non validi superiore al 25%.

Tabella 1: Numero totale di anni con dati giornalieri validi (percentuale di dati mancanti inferiore al 25%), per ogni variabile considerata. Inoltre, sono indicati gli anni con dati non validi (percentuale di dati mancanti superiore al 25%).

	Stazione Sassari	
	Temperatura	***Precipitazione***
Numero massimo di anni	**30**	**30**
Numero totale di anni disponibili	**23**	**29**
Completezza	**77%**	**97%**
Anni con dati non validi	**2004,2005,2006,2007 2008,2009,2010**	**2010**

A valle dei controlli di qualità e omogeneità dei dati in situ, per descrivere la variabilità climatica sul periodo 1991-2020 sono state eseguite diverse analisi statistiche e climatiche. In particolare

- **Serie di anomalie**. Mostrano la serie temporale annuale/stagionale delle anomalie dell'indicatore selezionato rispetto alla media climatologica del periodo storico selezionato con stima delle tendenze e calcolo significatività statistica. Il calcolo del trend e della significatività statistica è necessario per l'individuazione di un trend di crescita/decrescita significativo. Nello specifico, il metodo utilizzato è il test di MannKendall (Hirsch,1982; Kendall, 1975; Mann,1945).

- **Cicli stagionali.** Mostrano i valori medi mensili dell'indicatore di interesse nel periodo storico selezionato.

1.3 Modelli numerici per la produzione di scenari climatici

Le proiezioni climatiche rappresentano simulazioni dell'andamento previsto del clima terrestre nei prossimi decenni, di solito fino al 2100. Queste simulazioni si basano su "scenari" ipotetici per le concentrazioni di gas serra, aerosol e altri componenti atmosferici che influenzano il bilancio radiativo del pianeta. Questi scenari sono ottenuti mediante modelli numerici dell'atmosfera e possono essere sviluppati utilizzando due tipi principali di modelli climatici: i Modelli Climatici Globali (GCM), noti anche come Modelli di Circolazione Generale, che coprono l'intero pianeta, o i Modelli Climatici Regionali (RCM), che si concentrano su regioni specifiche come l'Europa (Fig.1). I modelli climatici globali sono fonti di informazioni fondamentali per comprendere quantitativamente come il clima della Terra potrebbe cambiare nel corso del XXI secolo. Grazie alla maggiore risoluzione dei modelli climatici regionali (generalmente tra 10 km e 15 km), essi sono in grado di fornire informazioni utili per svolgere analisi relative agli impatti alla scala locale, attesi per effetto del cambiamento climatico e/o supportare i decisori nella scelta delle azioni di adattamento. In quest'ottica, i risultati dei modelli climatici regionali sono indispensabili per supportare gli studi sull'impatto climatico regionale, analisi del rischio e strategie di adattamento.

I recenti avanzamenti nella modellistica climatica hanno reso possibile l'esecuzione di modelli climatici ad altissima risoluzione, con griglie su scala chilometrica (nell'intervallo 1-3 km). Questi modelli, noti anche come "convection permitting," dovrebbero mostrare un valore aggiunto rispetto ai modelli regionali a risoluzione inferiore nel rappresentare fenomeni localizzati nello spazio e nel tempo. Inoltre, questi modelli offrono la possibilità di includere parametrizzazioni più dettagliate di ambiti complessi, come quelli urbani.

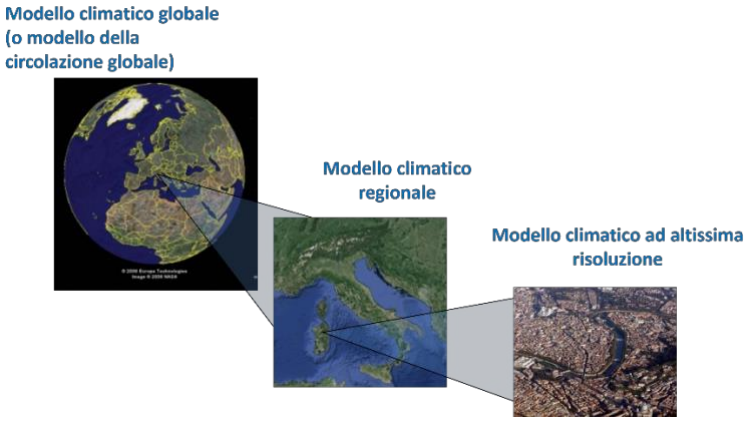

Figura 1: Esempio di un processo di lavoro tipico nel contesto del downscaling dinamico. Questa procedura coinvolge l'uso di un Modello Climatico Regionale (RCM - Regional Climate Model), che si innesta su un Modello a Circolazione Globale (GCM - Global Climate Model) da cui acquisisce le condizioni iniziali e i confini, producendo proiezioni climatiche su una zona geografica limitata. Queste proiezioni hanno una risoluzione spaziale più elevata rispetto al modello a scala globale, ma coprono un'area più ristretta. Attraverso un approccio simile di downscaling dinamico, è anche possibile passare da un Modello Climatico Regionale a un modello caratterizzato da una risoluzione spaziale ancora maggiore ma che produce analisi su un'area ancora più ristretta. Questi modelli sono noti come "modelli con risoluzione che consente la convezione" (CPM), in quanto consentono la rappresentazione esplicita del fenomeno di convezione profonda.

1.3.1 Scenari IPCC

Gli scenari IPCC utilizzati nella presente analisi sono RCP8.5 "Ad elevate emissioni", RCP4.5 "Forte mitigazione" e RCP2.6 "Mitigazione aggressiva", adottati anche nel Piano Nazionale di Adattamento al Cambiamento Climatico (PNACC, 2023), attualmente in fase di completamento, a valle della procedura di Valutazione Ambientale Strategica.

Per quanto attiene l'utilizzo dello scenario RCP8.5, è importante sottolineare che esso è oggetto di critica in quanto ritenuto troppo pessimistico e poco realistico nei suoi presupposti tecnologici ed economici (Hausfather & Peters, 2020). L'utilizzo di questo scenario è però utile se si vogliono fornire informazioni sui potenziali scenari peggiori che potrebbero realizzarsi senza adottare significative misure di adattamento. Esso può servire come punto di riferimento per valutare l'efficacia di diverse politiche e strategie nel ridurre le emissioni ed evitare gli impatti peggiori del cambiamento climatico. Inoltre, risulta particolarmente utile per la ricerca scientifica per studiare la risposta del sistema climatico a valori elevati di emissioni.

È utile segnalare che il sesto rapporto dell'IPCC (AR6) (IPCC, 2021) ha introdotto nuovi scenari, che integrano le traiettorie di concentrazione già definite (Reprentative Concentration Pathways, RCPs) con una selezione di possibili "Percorsi socio-economici condivisi" (Shared Socioeconomic Pathways, SPPs), ovvero cinque diverse "narrazioni" che corrispondono ad altrettanti possibili percorsi socioeconomici futuri. Tali scenari non sono stati utilizzati nel presente documento in quanto non sono ancora disponibili simulazioni climatiche ad alta risoluzione che ne facciano utilizzo; di conseguenza, per analisi di impatto locale, attualmente la comunità scientifica continua a riferirsi agli scenari RCP che fanno parte del "Coupled Model Intercomparison Project 5" (CMIP5), presentati all'interno del quinto rapporto IPCC (AR5)(https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/).

1.3.2 Modelli climatici regionali

Per quanto attiene i modelli climatici attualmente disponibili per gli studi di impatto e adattamento prima citati a livello europeo i principali modelli usati per questi scopi sono i Modelli Climatici Regionali prodotti dalla comunità scientifica internazionale nell'ambito del programma EURO-CORDEX[8] con una risoluzione di circa 12 km sull'Europa (Jacob et al. 2014; Hennemuth et al. 2017; Jacob et al. 2020). Tali modelli sono stati utilizzati, nel presente lavoro, per elaborare le variazioni climatiche attese nell'area di interesse. In particolare, sono stati selezionati quelli attualmente disponibili per la consultazione sulla piattaforma Climate Change Service (C3S) di Copernicus[9]. Per ogni scenario RCP considerato sono state utilizzate 14 simulazioni climatiche fornite da diverse combinazioni di **Modelli Climatici Globali** (GCM, *Global Climate Models* oppure *General Circulation Models*) e **Modelli Climatici Regionali** (RCM, *Regional Climate Models*). È importante sottolineare che le analisi prodotte dai modelli climatici sono affette, per diversi motivi, da incertezze, quali ad esempio i differenti scenari di concentrazione ipotizzati, l'imperfetta simulazione del sistema climatico da parte dei modelli e la sua elevata complessità e non-linearità (Collins 2007). Per tale motivo, specie per il supporto alle decisioni, si preferisce la strategia di utilizzare sia diversi scenari che un insieme (ensemble) di catene modellistiche. Tale strategia permette di quantificare alcune delle fonti di incertezza associate ai modelli (Von Trentini et al. 2019). Inoltre, nel presente lavoro le analisi sono anche state svolte utilizzando i dati della simulazione denominata VHR-PRO_IT (Raffa et al; 2023). Si tratta di simulazioni ad una risoluzione di circa 3 km disponibili sull'intero territorio nazionale, con gli scenari IPCC RCP4.5 ed RCP8.5, recentemente rilasciato dalla Fondazione CMCC. Lo scopo di questo confronto è di permettere di valutare il valore aggiunto di questa simulazione in un contesto locale, sebbene la mancanza di valutazione dell'incertezza associata al modello, non permette di utilizzare direttamente questi dati per l'adattamento.

[8] https://www.euro-cordex.net/
[9] https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=overview

1.4 Indicatori climatici

Gli indicatori climatici sono comunemente utilizzati nella letteratura di settore per caratterizzare il clima del recente passato e/o quello atteso, sia per quanto riguarda il clima medio, sia per l'analisi degli eventi estremi. La maggior parte degli indicatori utilizzati, come quelli definiti dall'ETCCDI[10] (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*; Karl et al. 1999, Peterson et al. 2001) sono ricavati a partire dalle variabili di precipitazione e temperatura, e risultano utili per studi di settore volti a valutare i principali impatti locali del cambiamento climatico su cui basare, ad esempio, strategie di adattamento al cambiamento climatico. È importante rilevare che l'analisi degli indicatori climatici non può essere ritenuta esaustiva; tuttavia, essi restano un metodo speditivo che può essere impiegato in via preliminare rispetto all'applicazione di più complessi modelli di impatto fisicamente basati (EEA 2009, EEA 2018).

Nella **Tabella 2** sono riportati gli indicatori analizzati nel presente lavoro. Essi sono stati identificati tra quelli disponibili in letteratura sulla base delle esigenze locali e già definiti nel profilo climatico precedente.

[10] http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml

Tabella 2: Lista degli indicatori adottati per il profilo climatico del Comune di Sassari

Indicatore (unità di misura)	Descrizione
HW- Ondate di caldo (giorni)	Numero di giorni con temperatura massima giornaliera maggiore di 35°C.
FD- Giorni con gelo (giorni)	Numero di giorni con temperatura minima giornaliera inferiore a 0°C.
R10- Giorni con pioggia (mm)	Numero di giorni con precipitazione superiore a 10 mm.
PRCPTOT-Precipitazione cumulata nei giorni piovosi(mm)	Cumulata (somma) della precipitazione per i giorni con precipitazione maggiore/uguale a 1 mm.
SDII- Precipitazione media giornaliera (mm)	Precipitazione media giornaliera nei giorni di precipitazione maggiore o uguale a 1mm.
RX5DAY (mm)- Precipitazione massima (mm)	Massima precipitazione in 5 giorni.
CWD- Giorni consecutivi umidi (giorni)	Numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera maggiore o uguale a 1 mm.
RR1- Giorni piovosi (giorni)	Numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore o uguale a 1 mm.
HUMIDEX4- Indice di disagio termico (giorni)	Misura del calore percepito che risulta dall'effetto combinato dell'umidità e della temperatura. Categoria 4: numero di giorni in cui l'indice è tra 40°C e 45°C
HUMIDEX5- Indice di disagio termico (giorni)	Misura del calore percepito che risulta dall'effetto combinato dell'umidità e della temperatura. Categoria 5: numero di giorni in cui l'indice è maggiore di 45°C
CDD- Giorni consecutivi secchi (giorni)	numero massimo di giorni consecutivi con precipitazione giornaliera minore a 1 mm.

2. Risultati

La sezione risultati riporta l'analisi del clima sul periodo di riferimento (1991-2020) e le variazioni climatiche attese su 2035s e 2050s, rispetto al periodo 1981-2010, considerando i tre scenari IPCC: RCP8.5 "Ad elevate emissioni", RCP4.5 "Forte mitigazione", RCP2.6 "Mitigazione aggressiva", in analogia al piano nazionale di adattamento al cambiamento climatico. Nello specifico, gli indicatori di **Tabella 2** sono stati riportati di seguito sia in forma tabellare sia attraverso opportune mappe/grafici per mostrarne la variazione spaziale/temporale.

2.1 Analisi del clima sul periodo di riferimento 1991-2020

Le caratteristiche del clima sul periodo di riferimento sono state analizzate calcolando gli indicatori di **Tabella 2** per le serie di dati fornite da ARPAS sul periodo 1991-2020. Tali risultati sono riportati in **Tabella 3**.

La stazione di Sassari è caratterizzata da un numero medio di giorni all'anno con temperatura minima minore di 0°C (FD) pari a 2 mentre il numero di giorni all'anno con temperatura massima giornaliera maggiore di 35°C (HW) è pari a 8.

In termini di precipitazione, Sassari risulta caratterizzata da circa 60 giorni annui consecutivi senza pioggia (CDD) e da un una precipitazione media giornaliera nei giorni con precipitazione maggiore di 1 mm (SDII) relativamente bassa (di 9 mm). I valori medi degli indicatori selezionati per il periodo osservato 1991-2020 vengono riportati nella **Tabella 3** (ad esclusione dell'indicatore Humidex in quanto per il suo calcolo è necessario disporre della variabile umidità relativa che per l'osservato non è stata presa in considerazione).

In **Figura 2** sono riportati i cicli stagionali (andamenti medi mensili) di temperatura minima (Tmin) e massima (Tmax), mentre in **Figura 3** quelli di precipitazione (Pr). Per ciascuna variabile è stata rappresentata anche la dispersione dei dati rispetto al 5° e al 95° percentile della distribuzione mensile. Il grafico in **Figura 2** evidenzia che le temperature assumono valori più bassi nei mesi di dicembre e gennaio (con una Tmin intorno a 5 °C e Tmax intorno ai 12 °C); al contempo, i massimi valori sono registrati tra luglio e agosto, con la Tmax che raggiunge all'incirca i 31 °C e la Tmin di 18 °C. La primavera e l'autunno mostrano valori intermedi e comparabili. Inoltre, i mesi di gennaio, febbraio e marzo mostrano una maggiore dispersione in termini di temperature minime e massime (come mostrato in **Figura 2**).

Per quanto riguarda la precipitazione (**Figura 3**), i valori sono calcolati cumulando i dati giornalieri su base mensile. Per le precipitazioni, si osservano diversi picchi annuali: uno ad ottobre (di circa 80millimetri/mese), un secondo a novembre (di circa 100 millimetri/mese) e un terzo meno intenso ad aprile (di circa 60 millimetri/mese). Ottobre rappresenta il mese caratterizzato dalla dispersione maggiore; infatti, per il mese di ottobre il 95° percentile è di circa 200 millimetri rispetto al valore medio di 80 millimetri. Nel mese di luglio si registrano i valori mensili più bassi sotto i 20 millimetri/mese.

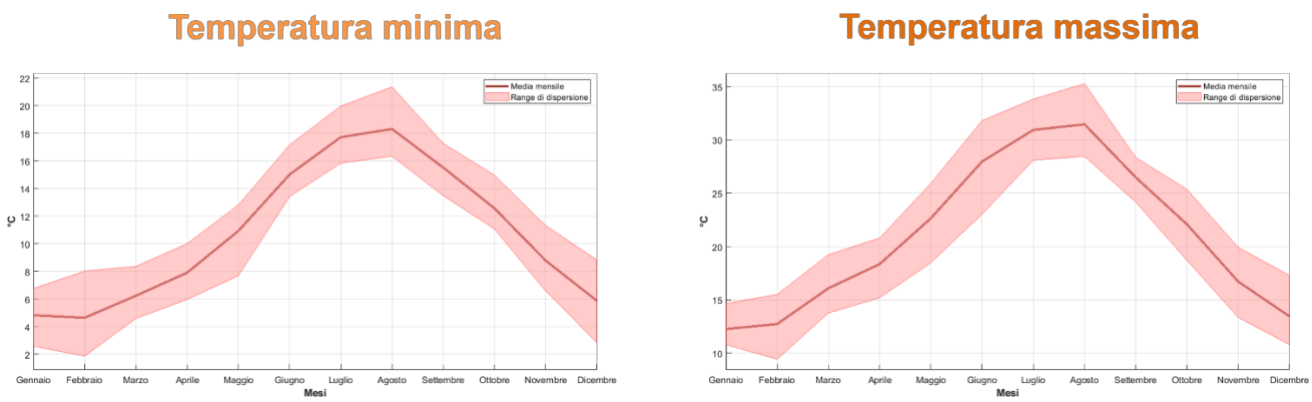

Figura 2: Ciclo stagionale di temperatura minima e massima. L'area ombreggiata (denominata in legenda range di dispersione) indica la dispersione rispetto al 5° e al 95° percentile della distribuzione mensile sul periodo di riferimento.

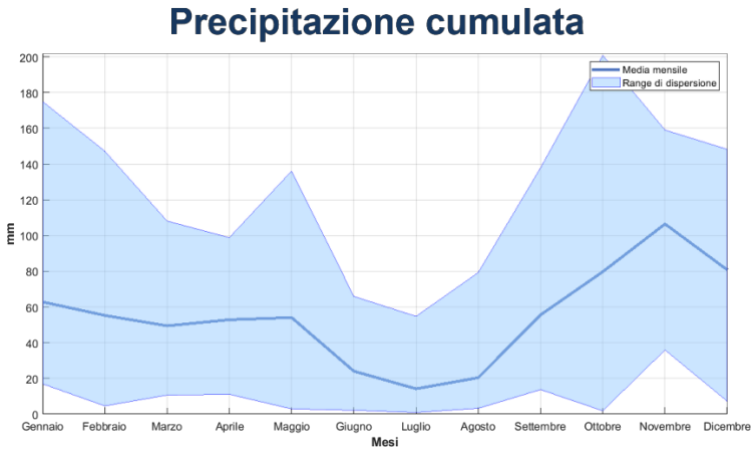

Figura 3: Ciclo stagionale di precipitazione cumulata mensile. L'area ombreggiata (denominata in legenda range di dispersione) indica la dispersione rispetto al 5° e al 95° percentile della distribuzione mensile sul periodo di riferimento.

In **Figura 4** è riportata la serie di anomalie medie annuali delle ondate di caldo (numero di giorni all'anno con temperatura massima giornaliera maggiore di 35 °C), l'unica per la quale il test di Mann Kendall abbia mostrato un
test significativo (a livello di significatività del 95%) sul periodo di riferimento 1991-2020. Come mostrato in **Figura 4**, si osserva un trend di crescita (trend=0.41).

Tabella 3: Valori medi degli indicatori selezionati per il periodo osservato 1991-2020

Indicatore (unità di misura)	Valore medio
HW- Ondate di caldo (giorni)	8
FD- Giorni con gelo (giorni)	2
R10	21
PRCPTOT-Precipitazione cumulata nei giorni piovosi(mm)	609
SDII- Precipitazione media giornaliera (mm)	9
RX5DAY (mm)	81
CWD- Giorni consecutivi umidi (giorni)	7
RR1- Giorni piovosi (giorni)	69
CDD- Giorni consecutivi secchi (giorni)	56

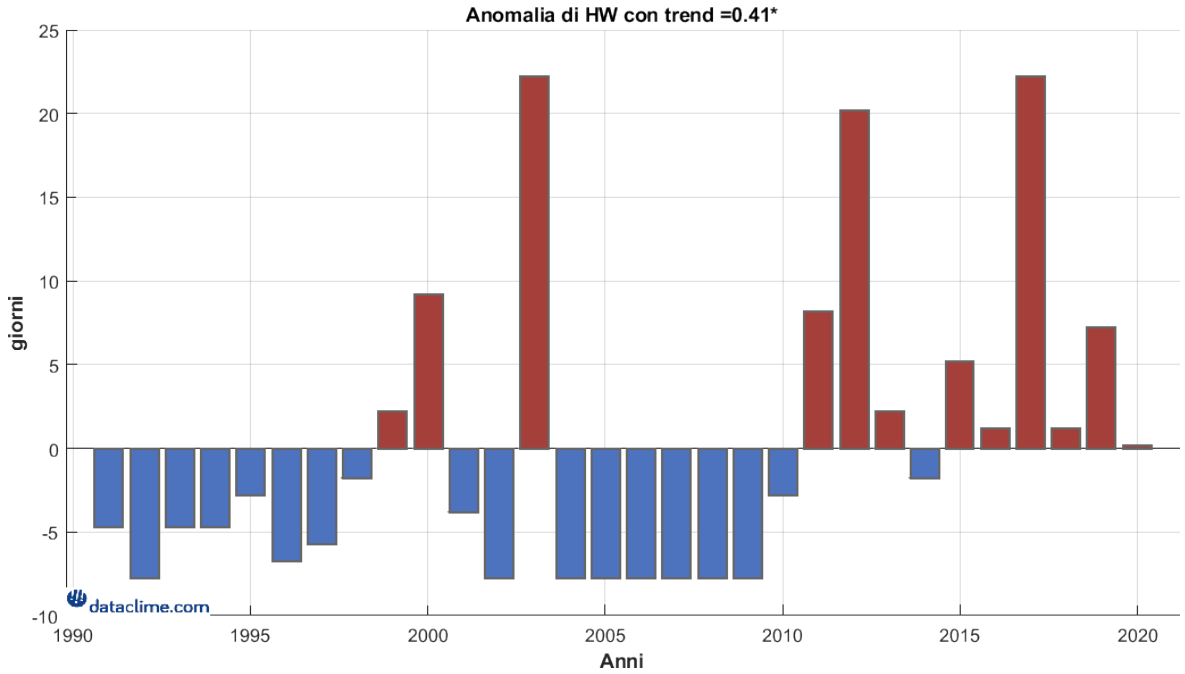

Figura 4 - Serie di anomalie medie annuali delle ondate di caldo (HW) rispetto alla media climatologica valutata sul periodo di riferimento 1991-2020 a partire dai dati stazioni forniti da ARPAS.

2.2 Analisi del clima futuro atteso

Le caratteristiche del clima atteso sul periodo futuro sono state analizzate in termini di variazione climatica e di incertezza associata agli indicatori descritti in **Tabella 4** considerando due periodi futuri (2021-2050 e 2036-2065) e come trentennio di riferimento il periodo 1981-2010. Il periodo di riferimento per il calcolo delle variazioni dei parametri climatici selezionati è il trentennio dal 1981 al 2010. Questo periodo è stato scelto sulla base di quanto stabilito nel protocollo degli esperimenti condotti dal progetto CIMP5 dell'IPCC. Gli scenari IPCC del progetto CMIP5 rappresentano il set di scenari più aggiornato sulla base dei quali sono stati elaborati simulazione di scenario con modelli climatici ad alta risoluzione. L'utilizzo di modelli ad elevata risoluzione è essenziale per poter effettuare analisi adeguate per il dominio e l'analisi di interesse per il presente lavoro. È importante altresì sottolineare che, secondo i protocolli standard delle simulazioni climatiche CMIP5, il periodo storico di riferimento è compreso tra il 1981 e il 2005 (il periodo storico serve come base di confronto per valutare le future variazioni climatiche). Tuttavia, nel nostro lavoro attuale, seguendo un approccio analogo a quanto fatto nella PNACC (attualmente in fase di valutazione) e in numerosi altri studi scientifici, abbiamo esteso il periodo storico fino al 2010, includendo così gli anni recenti dal 2006 al 2010. Questi anni aggiuntivi sono ricavati da simulazioni climatiche ottenute utilizzando come forzanti le concentrazioni dello scenario RCP4.5, il che significa che non si basano su osservazioni dirette delle concentrazioni di gas serra, come nel periodo storico, ma su scenari.

Va sottolineato che periodi storici ancora più recenti saranno disponibili con l'avanzamento del progetto CMIP6. Tuttavia, al momento non esistono insiemi di simulazioni regionali che utilizzino queste forzanti.

In **Tabella 4** vengono riportate le variazioni climatiche annuali su scala comunale, per entrambi i periodi futuri analizzati, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010. La scelta del periodo di riferimento è determinata dalle caratteristiche degli scenari climatici utilizzati, che possono limitare l'uso di periodi più recenti. Tuttavia, la definizione di un periodo di riferimento è fondamentale in un'analisi climatica poiché l'approccio corretto per valutare le variazioni climatiche è l'analisi delle differenze tra periodi diversi, con una durata minima di tali periodi almeno di 30 anni. Questa lunghezza è considerata necessaria per caratterizzare adeguatamente il clima dell'area in esame. Pertanto, le discrepanze osservate tra i due periodi rappresentano statisticamente le variazioni climatiche.

Sempre con riferimento alla **Tabella 4**, si ricordi, che l'incertezza così come valutata nel seguente documento e in analogia a quanto fatto in altri lavori è rappresentata dal calcolo della deviazione standard a partire dall'insieme di tutti i modelli climatici utilizzati da cui si ottiene anche la media (ovvero il valore ritenuto più affidabile). La deviazione
standard in questo caso serve a dare indicazione su quanto i modelli che costituiscono l'ensemble siano dispersi rispetto al valore medio (valori elevati di deviazione standard indicano un minor accordo tra i modelli rispetto al valore di ensemble mean che rappresenta la stima della variazione dell'indicatore ritenuta più affidabile; di contro valori bassi di deviazione standard indicano una minor dispersione rispetto al valore medio e quindi un maggior accordo tra i modelli rispetto al valore di ensemble mean; di conseguenza quindi una minor incertezza associata alla stima di quella valutazione). La scelta della deviazione standard come valutazione dell'incertezza è fatta per avere una stima dell'incertezza che abbia la stessa unità di misura del valore di variazione dato dall'ensemble mean: se la variazione, quindi, è espressa in giorni, sia l'ensemble mean che l'incertezza saranno espresse in giorni; se la variazione è espressa in termini percentuali, sia l'ensemble mean che l'incertezza saranno espresse in termini percentuali.

Detta "EM" l'ensemble mean e "SD" l'incertezza, per effetto dell'aver usato un ensemble di proiezioni il valore atteso di variazione sarà dunque "EM ± SD" (ovvero valore medio ± deviazione standard). Nella tabella, è presente l'indicatore humidex valutato solo utilizzando i dati dell'ensemble EURO-CORDEX, in quanto, per le osservazioni non è disponibile la variabile *umidità relativa* utilizzata per il calcolo dell'indicatore.

Un altro modo per visualizzare i cambiamenti climatici consiste nell'osservare le tendenze climatiche di un indicatore specifico del clima (vedi **Figura 5**). Sebbene questa rappresentazione non permetta di cogliere il dettaglio spaziale e/o la quantificazione della variazione, permette di notare l'evoluzione attesa nel tempo di una

certa caratteristica del clima al variare di diversi scenari e su un periodo temporale più lungo rispetto a quello considerato nelle mappe di variazione. Di seguito sono utilizzate entrambe le rappresentazioni, per facilitare la comprensione dei risultati.

Tabella 4: Variazioni climatiche annuali (ensemble mean e deviazione standard) attese per gli indicatori considerati per entrambi i periodi futuri analizzati (2021-2050 e 2036-2065), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. I valori sono mediati su scala comunale.

	Variazione climatica						
	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		
Indicatore	EM	±SD	EM	±SD	EM	±SD	
TEMPERATURA MEDIA (°C)	0.9	0.3	1	0.2	1.2	0.2	2035s
	1	0.3	1.4	0.3	1.8	0.3	2050s
HW (giorni)	3	2	4	2	4	3	2035s
	3	2	6	3	7	4	2050s
HUMIDEX4 (giorni)	7	5	7	4	8	5	2035s
	8	5	9	6	11	6	2050s
HUMIDEX5 (giorni)	5	4	6	6	6	6	2035s
	5	5	9	8	10	9	2050s
FD (giorni)	-2	1	-2	1	-2	2	2035s
	-2	1	-2	1	-3	2	2050s
CDD (giorni)	1	3	4	3	3	6	2035s
	1	3	4	4	4	5	2050s
CWD (giorni)	0	1	0	1	0	1	2035s
	0	1	0	1	0	1	2050s
RR1 (giorni)	-2	3	-2	3	-3	4	2035s
	-1	3	-4	3	-6	3	2050s
PRCPTOT (%)	1	5	2	6	0	6	2035s
	4	5	-1	6	-2	6	2050s
SDII (%)	4	3	3	3	4	3	2035s
	5	3	4	3	5	3	2050s
RX5DAY (%)	5	8	3	6	5	6	2035s
	8	6	5	6	5	9	2050s

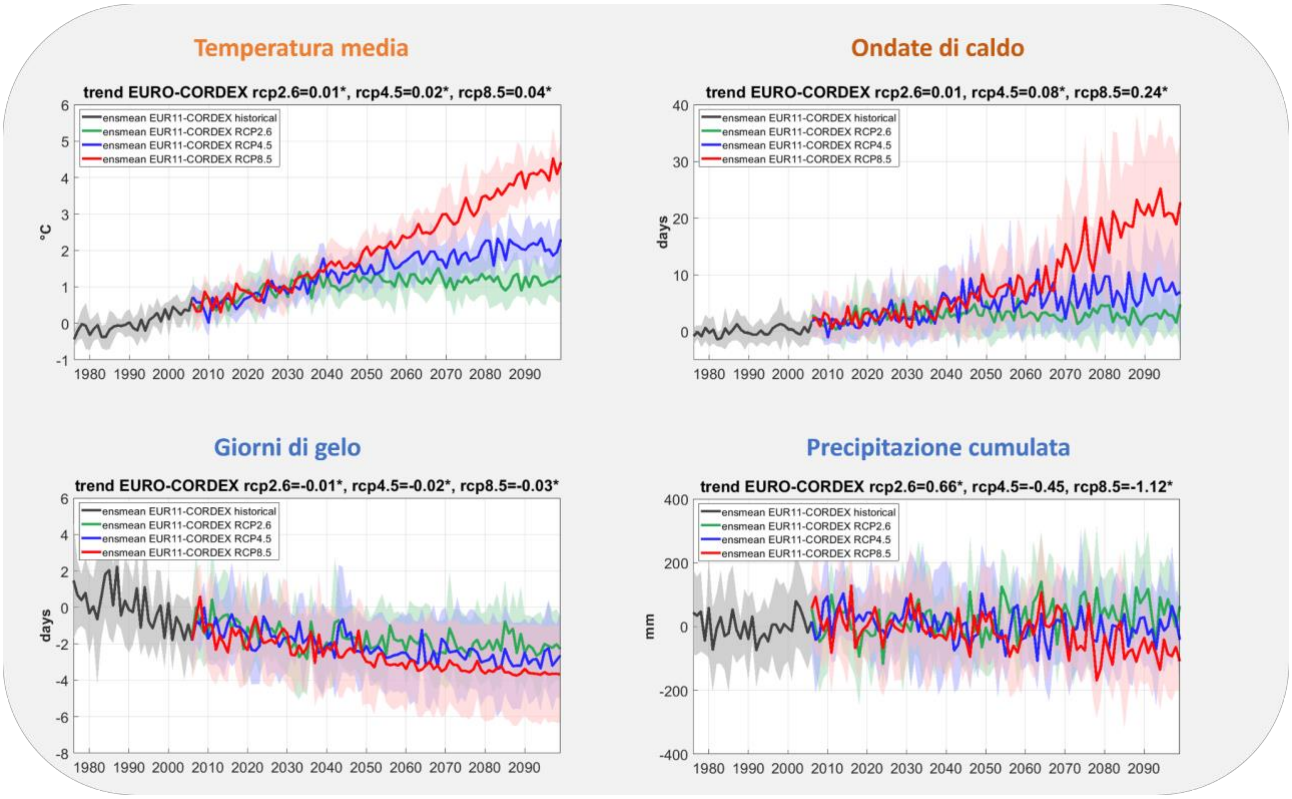

Figura 5: Anomalie annuali di Temperatura media, Ondate di caldo, Giorni di gelo, Precipitazione cumulata su scala comunale ottenute a partire dai modelli EURO-CORDEX, considerando il periodo storico (in grigio) e gli scenari RCP8.5 (in rosso), RCP4.5 (in blu) e RCP2.6 (in verde). Le anomalie annuali sono calcolate rispetto al valore medio del periodo di riferimento 1976-2005. La linea spessa indica la proiezione climatica media (ensemble mean), calcolata mediando i valori annuali di tutte le simulazioni considerate per ogni scenario di concentrazione; le aree ombreggiate rappresentano invece il range ottenuto sommando e sottraendo all'ensemble mean la deviazione standard dei valori simulati dai modelli e forniscono una misurazione dell'incertezza delle proiezioni.

In **Figura 6** e **7** sono mostrate rispettivamente le variazioni attese a scala annuale per la Temperatura media giornaliera e la Precipitazione cumulata nei giorni piovosi per il periodo 2021-2050 e 2036-2065. Per la temperatura media, per il periodo 2021-2050, è previsto un aumento dal punto di vista spaziale, da 0.9°C a circa 1.2°C passando da condizioni di mitigazione aggressiva a condizioni di nessuna mitigazione; per il trentennio centrato sull'anno 2050 invece, è previsto un aumento più marcato che va da 1°C a 1.8°C passando da condizioni di mitigazione aggressiva a condizioni di nessuna mitigazione.

Per quanto riguarda invece la precipitazione cumulata, è prevista una diminuzione (fino ad un -5% su alcune aree, in condizioni di elevate emissioni), più marcata per il periodo 2036-2065; tale informazione, è tuttavia associata ad un'incertezza generalmente compresa tra il 5-6%.

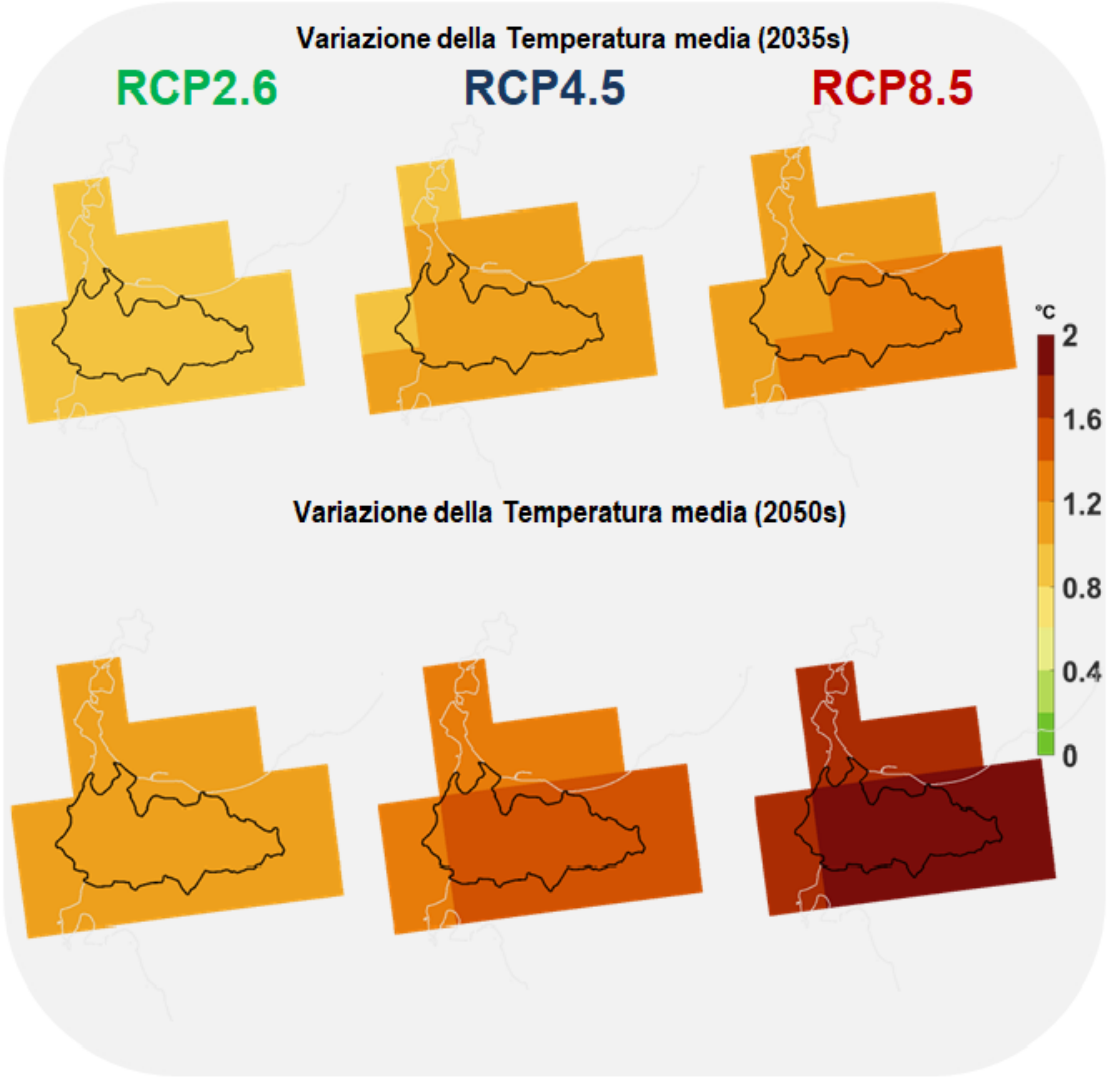

Figura 6: Variazione (ensemble mean) della temperatura media giornaliera su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

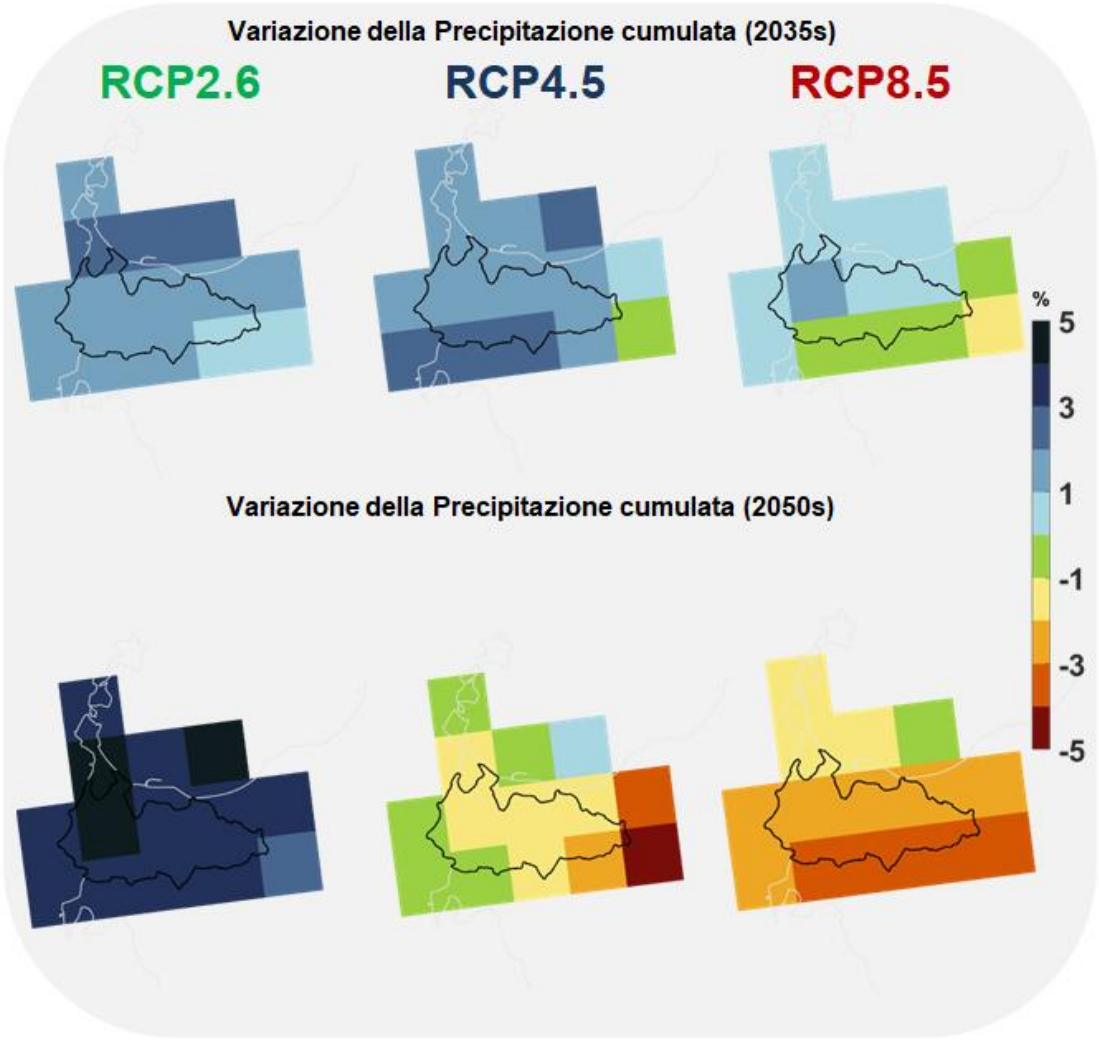

Figura 7: Variazione (ensemble mean) della precipitazione cumulata su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

Per maggiori dettagli sull'analisi del clima futuro atteso si rimanda all'Allegato 1, dove è possibile consultare le mappe delle variazioni attese su base annuale per i restanti indicatori selezionati. Inoltre, nel suddetto allegato, risulta possibile consultare l'analisi effettuata utilizzando la simulazione VHR-PRO_IT (Raffa et al; 2023) sull'Italia recentemente rilasciata dalla Fondazione CMCC e caratterizzata da una risoluzione di circa 3 km.

3. Conclusioni

Il presente elaborato ha delineato le caratteristiche del clima sul periodo di riferimento 1991-2020 e del clima futuro atteso (2021-2050 rispetto al 1981-2010) per il Comune di Sassari. I risultati più rilevanti sono i seguenti:

- **PERIODO STORICO DI RIFERIMENTO (1991-2020)**: Sassari è caratterizzata da un numero medio di giorni all'anno con temperatura minima minore di 0 °C (FD) pari a 2 mentre il numero di giorni all'anno con temperatura massima giornaliera maggiore di 35 °C (HW) è pari a 8. In termini di precipitazione, Sassari risulta caratterizzata mediamente da circa 60 giorni annui consecutivi senza pioggia (CDD) e da una precipitazione media giornaliera, nei giorni con precipitazione maggiore di 1 mm (SDII), relativamente bassa (di 9 mm). I valori medi degli indicatori selezionati per il periodo osservato 1991-2020 vengono riportati nella Tabella 3 (ad esclusione dell'indicatore Humidex in quanto per il suo calcolo è necessario disporre della variabile umidità relativa che per l'osservato non è stata presa in considerazione).

- **CLIMA FUTURO ATTESO**: per quanto riguarda le analisi sul clima futuro atteso, effettuate con i due scenari climatici RCP4.5 e RCP8.5, evidenziano un generale aumento della temperatura media, degli estremi di temperatura e dei periodi con temperature elevate. Inoltre, sono state valutate diverse caratteristiche delle precipitazioni intense e, da questa analisi, si evince un incremento sia della precipitazione cumulata giornaliera (massimo di precipitazione giornaliera, RX5DAY) sia dell'intensità (indice di intensità di precipitazione giornaliera, SDII) e della frequenza degli eventi estremi di precipitazione. Le analisi evidenziano, inoltre, un ruolo meno significativo dello scenario climatico (i.e., la scelta di uno scenario piuttosto che di un altro) sul regime delle precipitazioni future. Il non sempre intuitivo effetto dello scenario di concentrazione (RCP4.5 o RCP8.5) sulla pericolosità meteo-indotta, rende necessaria l'adozione di soluzioni di adattamento. Anche nel caso migliore in cui tutti gli obiettivi di mitigazione (cioè di riduzione delle emissioni di gas serra) previsti dagli accordi internazionali fossero soddisfatti, esiste un futuro prossimo in cui le comunità si troveranno comunque ad affrontare gli effetti del cambiamento climatico.

Bibliografia

Collins, M., 2007. Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365.1857, 1957-1970. http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2068

European Environmental Agency (2009). Regional Climate Change and Adaptation: The Alps Facing the Challenge of Changing Water Resources. EEA Report No 8/2009. http://doi.org/10.2800/12552.

European Environmental Agency (2018). National climate change vulnerability and risk assessments in Europe. EEA Report No 1/2018. http://doi.org/10.2800/348489.

Hausfather, Z., Peters, G.P. (2020). Emissions – the 'business as usual' story is misleading. Nature 577, 618–620. https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3.

Hennemuth, T.I., Jacob, D., Keup-Thiel, E., Kotlarski, S., Nikulin, G., Otto, J., Szépszó, G., 2017. Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use. Version1. 0-2017.08. https://www.hereon.de/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf

Hirsch, R.M., Slack, J.R. and Smith, R.A. (1982) Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. Water Resources Research, 18, 107-121. https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3−32. https://doi.org/10.1017/9781009157896.001.

ISPRA (2013). Linee Guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici [Braca, G., Bussettini, M., Lastoria, B., Mariani, S.]

Jacob, D. et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change 14(2), 563-578. http://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2.

Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Beldaet, M. et al., 2020. Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. Regional Environmental Change 20(51), 1-20. https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9

Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (1999). CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. In: Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A. (Eds.), Weather and Climate Extremes. Springer, Dordrecht, pp. 3-7. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9265-9_2.

Kendall, M.G., Stuart, A., 1976. The Advanced Theory of Statistics, Vol. I: Distribution Theory. Griffin, London. Mann H.B.: Nonparametric tests against trend, Econometrica 17(3), 245-259. doi: 10.2307/1907187, 1945

MIMS, 2021. Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità (a cura di Carraro, C. et al.) Rapporto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, già Ministero per le Infrastrutture e la Mobilità Sostenibili.

Peterson, T., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., Plummer, N. (2001). Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs. World Meteorological Organization, Geneva.

Raffa, M., Reder, A., Marras, G. F., Mancini, M., Scipione, G., Santini, M., Mercogliano, P. (2021). VHR-REA_IT Dataset: Very High-Resolution Dynamical Downscaling of ERA5 Reanalysis over Italy by COSMO-CLM. Data 6(8), 88. https://doi.org/10.3390/data6080088.

Raffa, M., Mercogliano, P. (2022). Dynamical Downscaling with COSMO-CLM of historical (1989/2005) and future climate (2006/2050) data under scenario RCP4.5 and RCP8.5 at 2.2 km over Italy [Data set]. Fondazione CMCC. https://doi.org/10.25424/CMCC-J90A-5P12.

Von Trentini, F., Leduc, M., Ludwig, R. (2019). Assessing natural variability in RCM signals: comparison of a multi model EURO-CORDEX ensemble with a 50-member single model large ensemble. Climate Dynamics 53(3), 1963-1979. https://doi.org/10.1007/s00382-019-04755-8.

Allegato 1: Mappe del clima futuro atteso

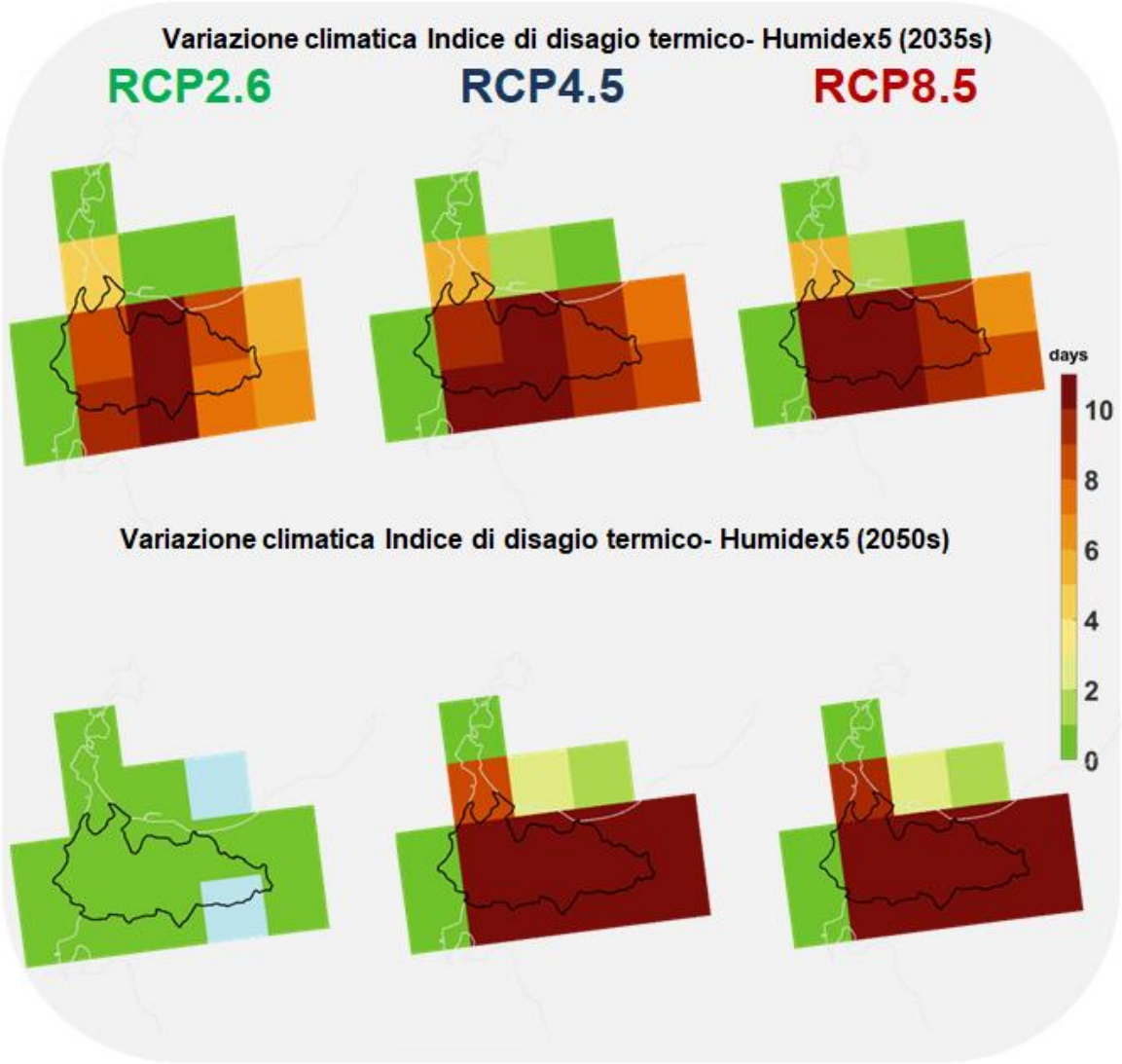

Figura A1: Variazione (ensemble mean) dell'indice di disagio termico (Humidex5) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

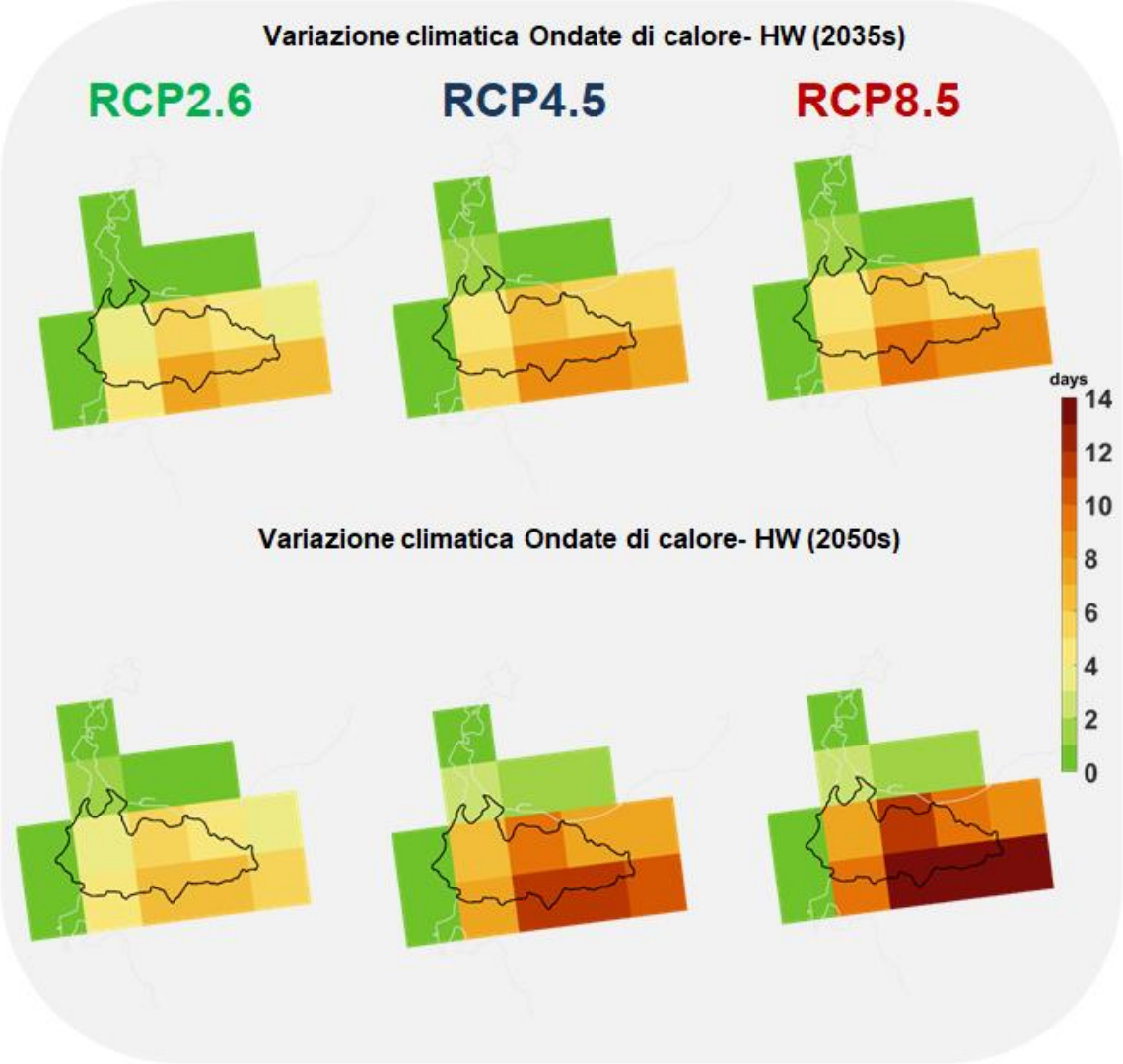

Figura A2: Variazione (ensemble mean) delle Ondate di calore (HW) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

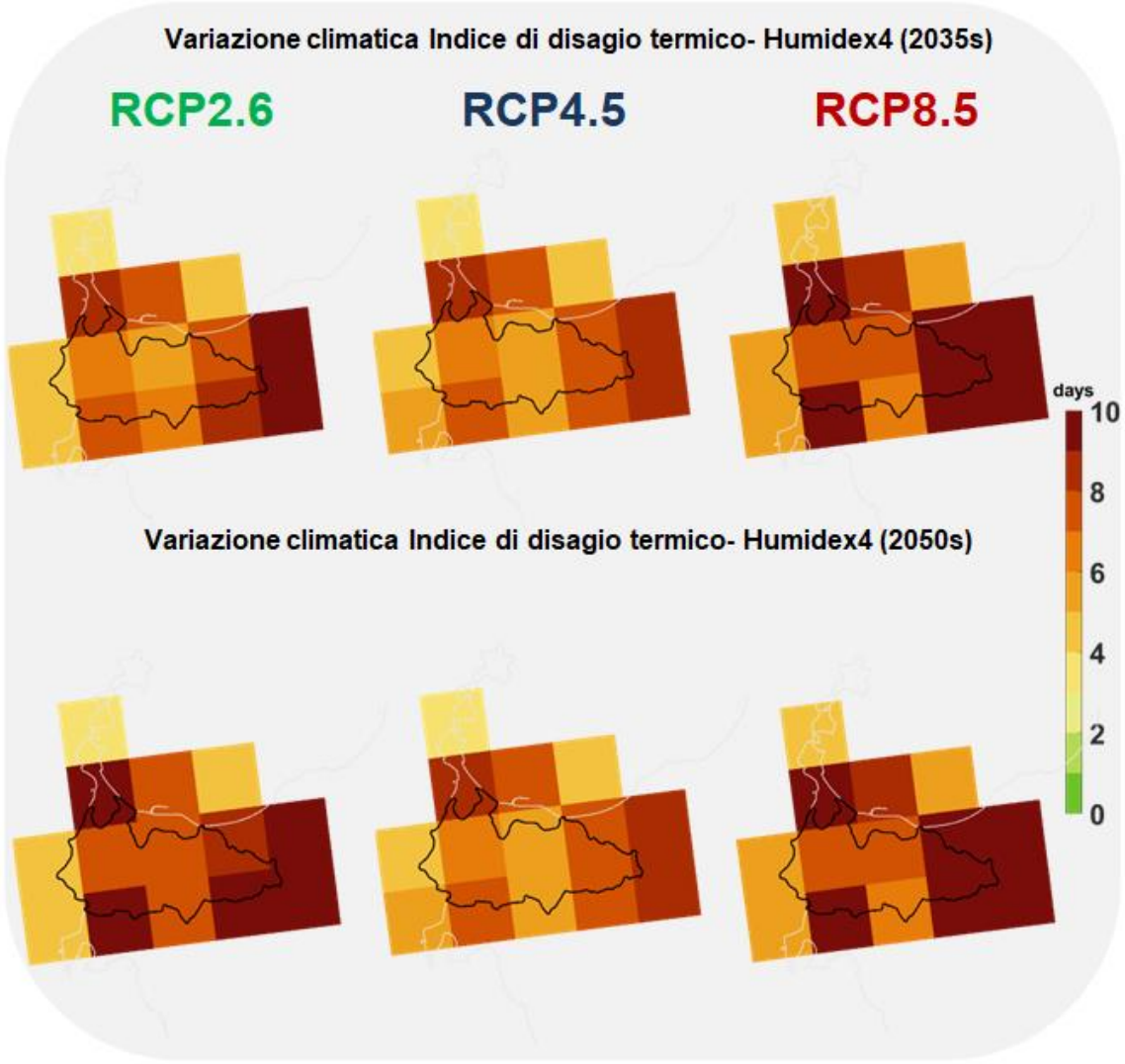

Figura A3: Variazione (ensemble mean) dell'indice di disagio termico (Humidex4) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

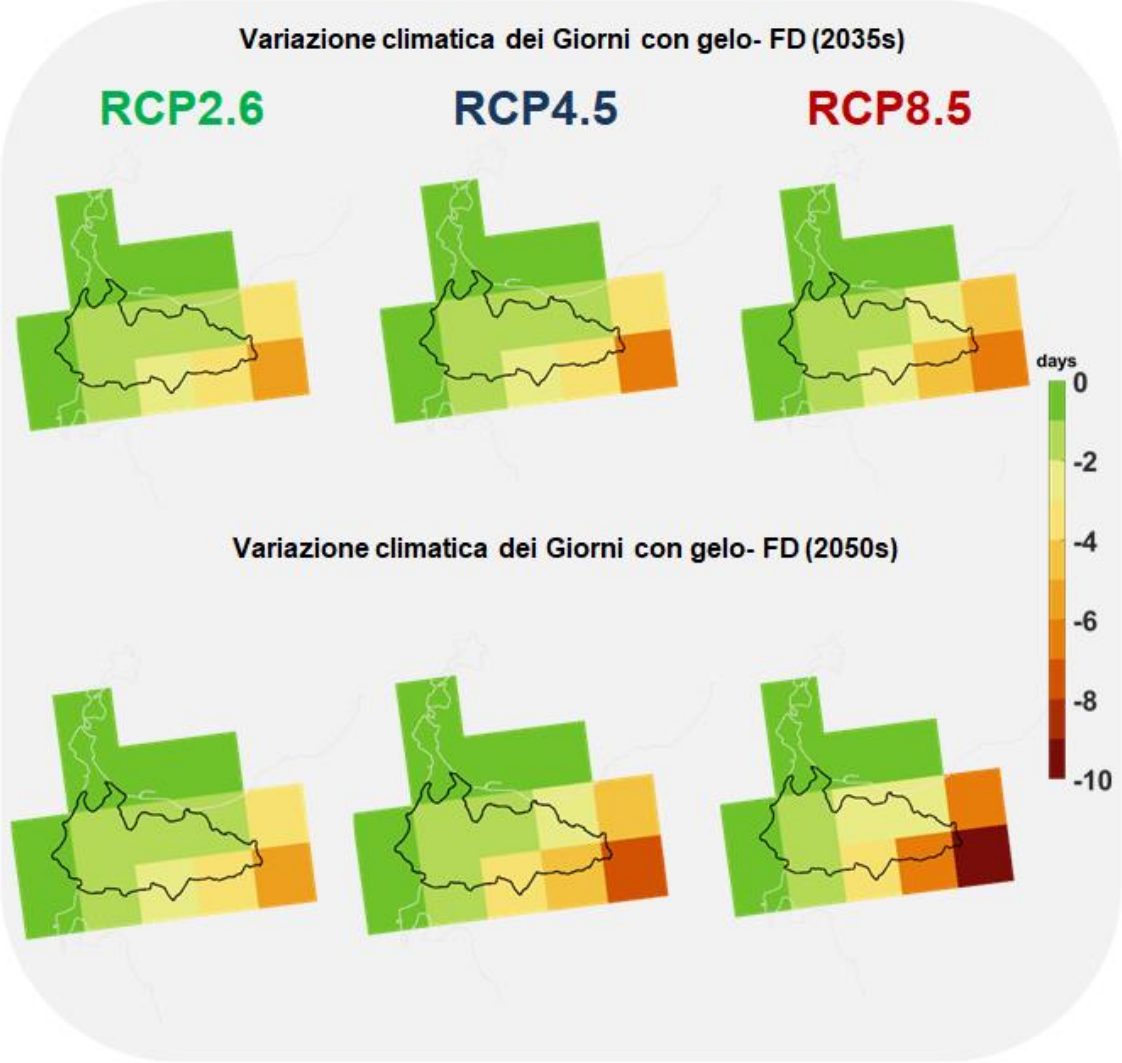

Figura A4: Variazione (ensemble mean) dei Giorni con gelo (FD) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

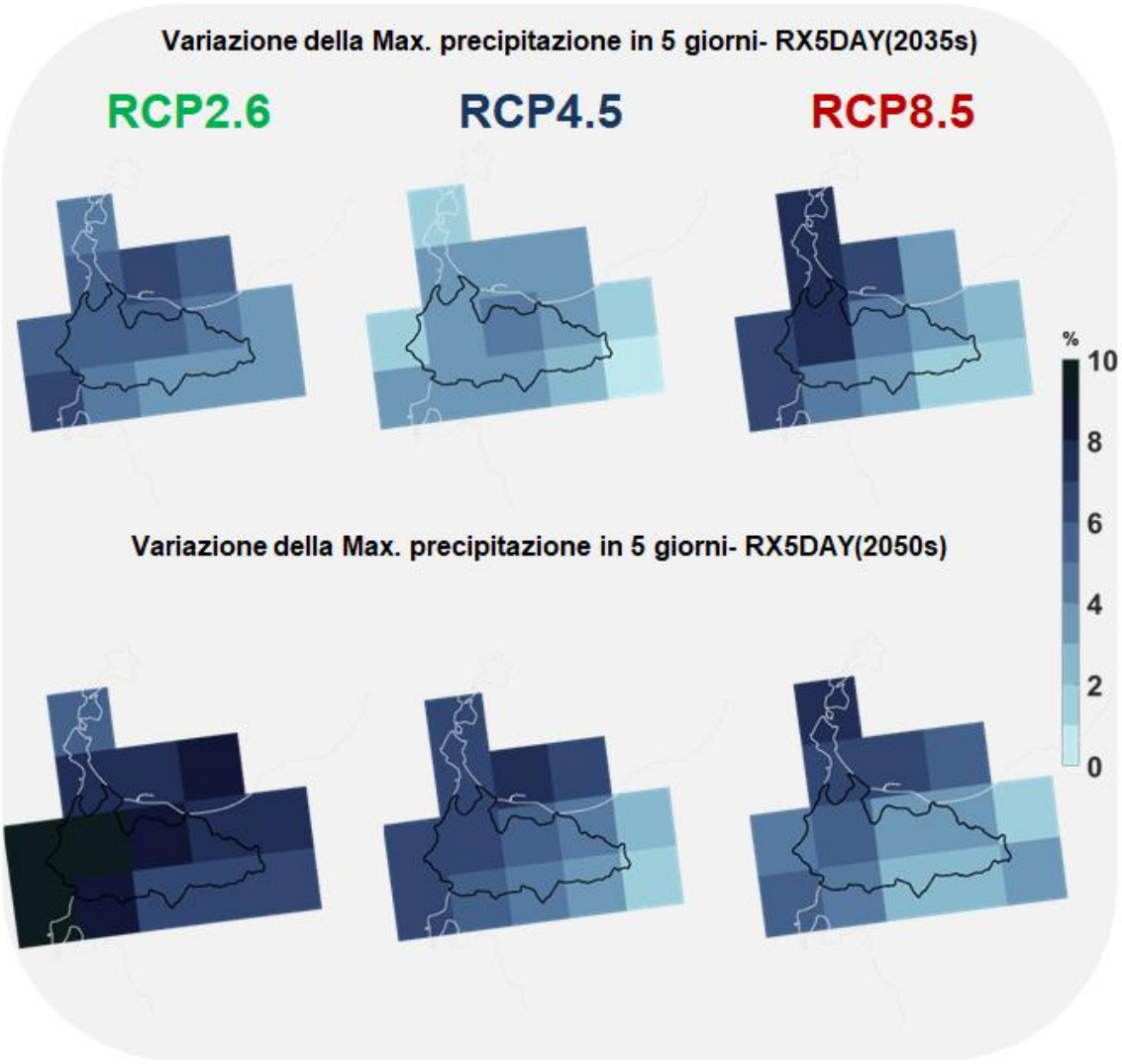

Figura A5: Variazione (ensemble mean) della massima precipitazione in 5 giorni(RX5DAY) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

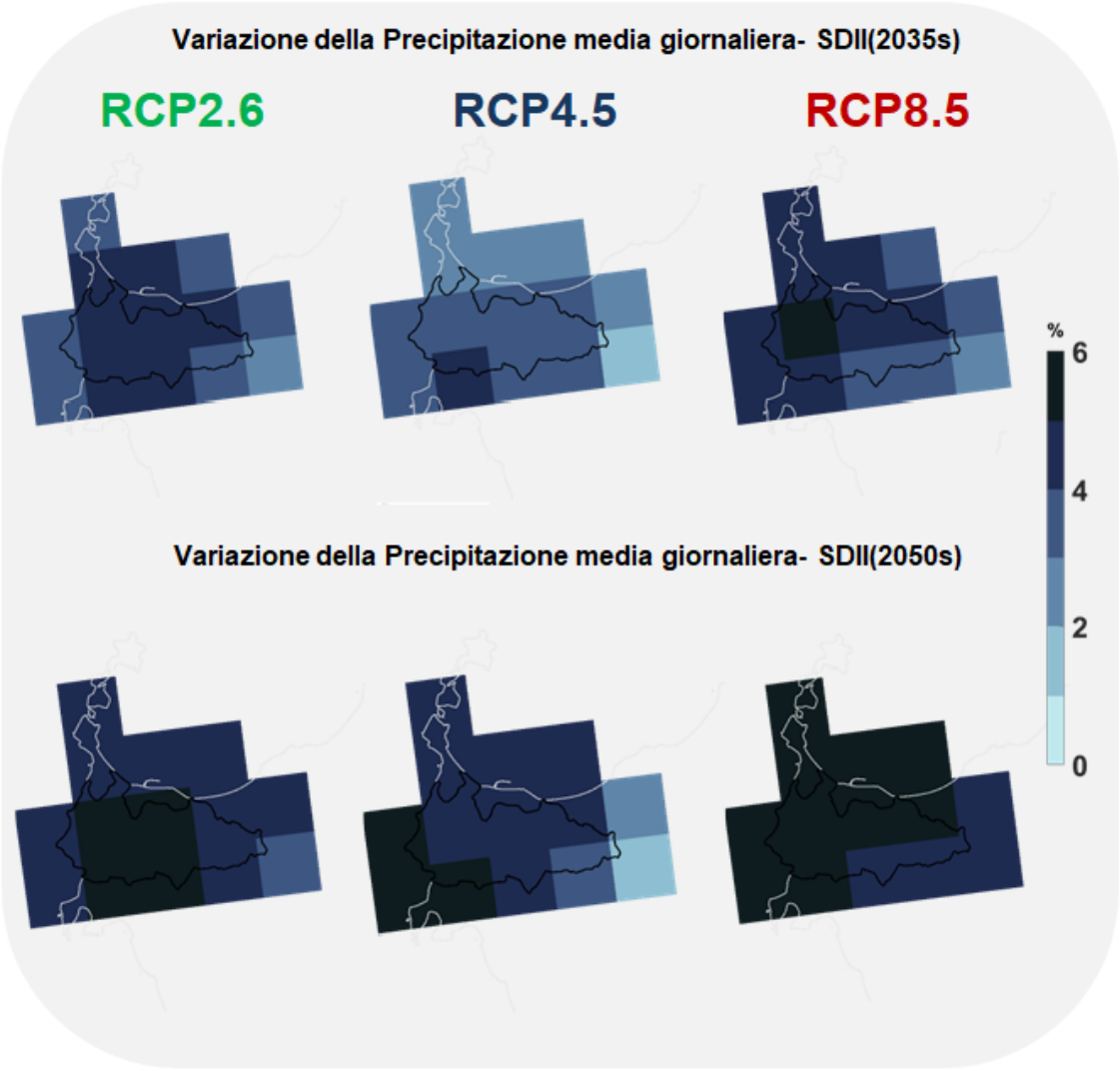

Figura A6: Variazione (ensemble mean) della precipitazione media giornaliera (SDII) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

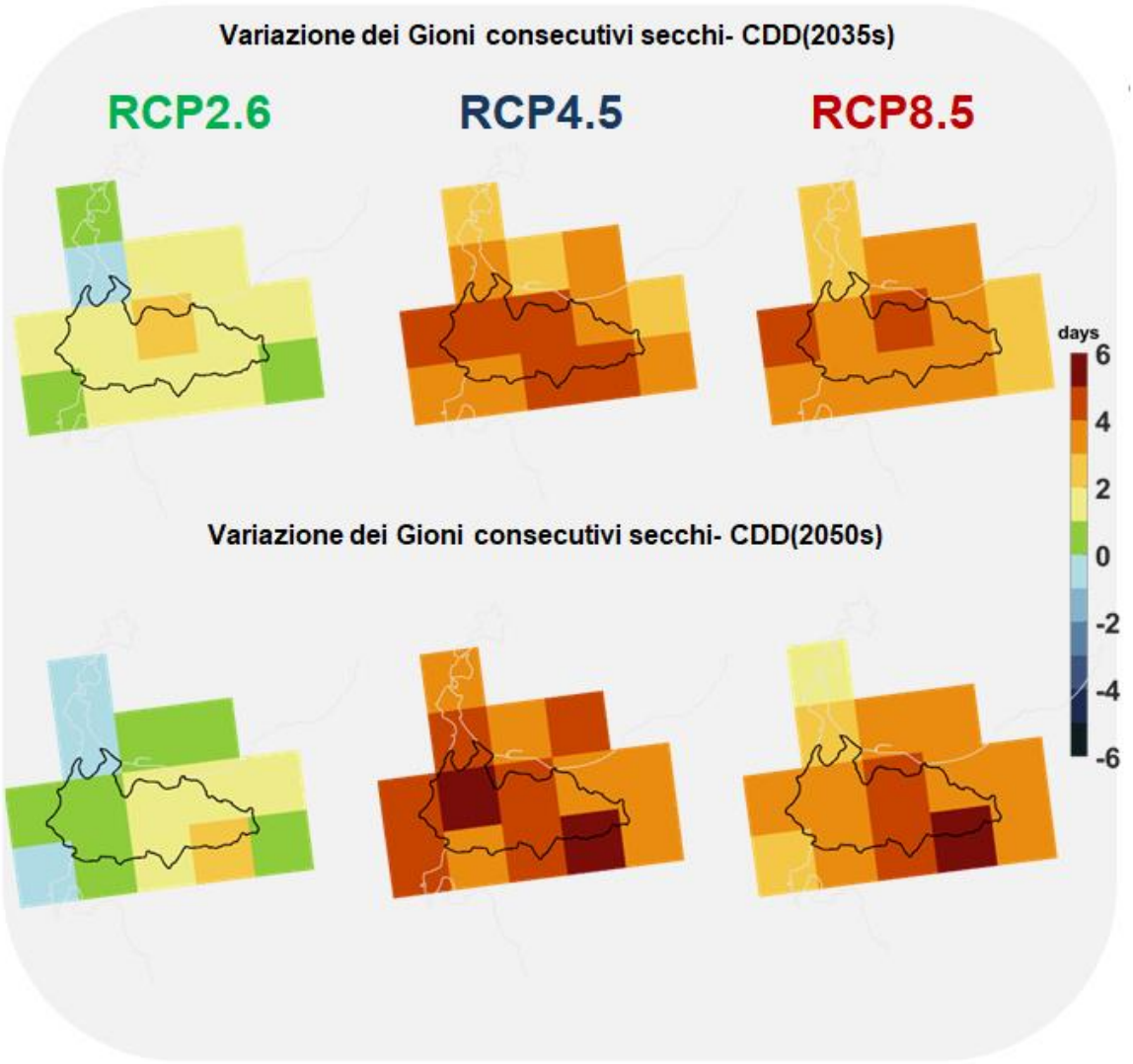

Figura A7: Variazione (ensemble mean) dei giorni consecutivi secchi (CDD) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

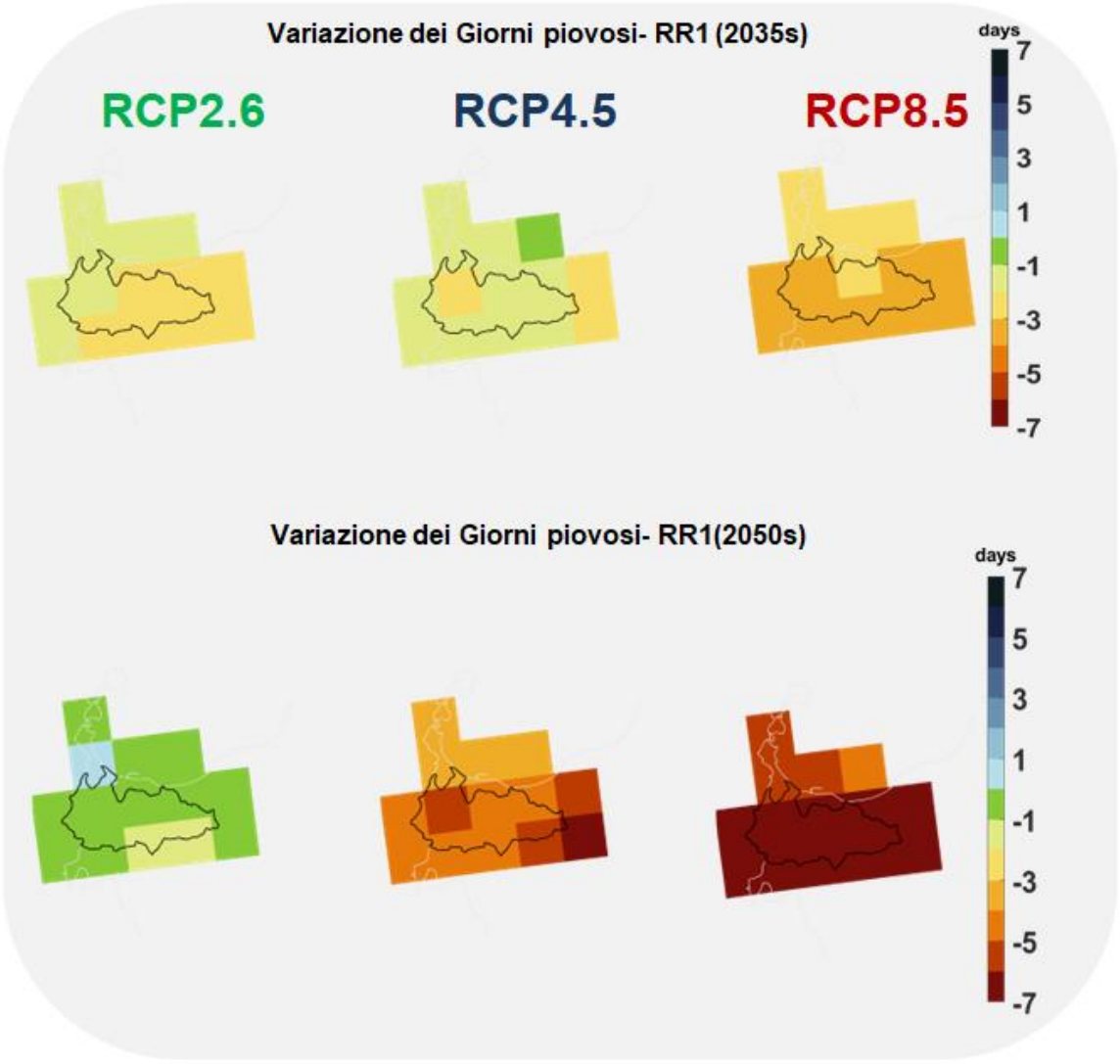

Figura A8: Variazione (ensemble mean) dei giorni piovosi (RR1) su base annuale per il periodo 2021-2050 e 2036-2065, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

Nelle **Figure A1-A4** sono riportate a titolo esemplificativo alcune delle mappe più rilevanti (in termini di variazione attesa) di una selezione di indicatori per alcuni pericoli climatici che possono interessare l'area investigata. Dalle mappe si evince un aumento del numero di ondate di caldo (HW). Si attende, quindi, un aumento generalizzato del pericolo legato alle **ondate di caldo**, contrariamente ad una sostanziale riduzione dei giorni con gelo (FD) soprattutto sull'area est del territorio analizzato e in condizioni di "nessuna mitigazione" (scenario RCP8.5). In tal contesto, anche altri indici strettamente legati alla temperatura (già definiti nel paragrafo precedente relativo all'analisi del clima attuale), mostrano un netto aumento. In particolare, l'indice di disagio termico (Humidex4 e Humidex5) presenta incrementi sostanziali soprattutto sulle zone orientali del Comune di Sassari, passando da condizioni di "mitigazione aggressiva" a condizioni di "nessuna mitigazione". Si noti che tutte le variazioni attese, risultano maggiori per il trentennio 2036-2065.

Per quanto riguarda i pericoli strettamente legati alla precipitazione (**Figure A5-A8**), ovvero gli eventi di **dissesto geo-idrologico**, sono state valutate diverse caratteristiche delle precipitazioni intense e dalle analisi si evince un generale
incremento sia dei cumuli giornalieri (Massimo di precipitazione giornaliera, RX5DAY) sia dell'intensità (indice di intensità di precipitazione giornaliera, SDII) e della frequenza degli eventi estremi di precipitazione, soprattutto

sulle zone occidentali del Comune di Sassari. Questo aspetto denota un potenziale aumento del pericolo per fenomeni di frane meteo-indotte e fenomeni di alluvioni che tuttavia necessita di essere studiato con maggior dettaglio mediante l'utilizzo di modelli di impatto accoppiati a modelli di pericolo.

Gli indicatori precedentemente analizzati con i modelli EURO-CORDEX, sono stati ricalcolati utilizzando la simulazione VHR-PRO_IT e, per un sottoinsieme di indicatori, tale analisi, è riportata nelle Figure **A9-A12**.

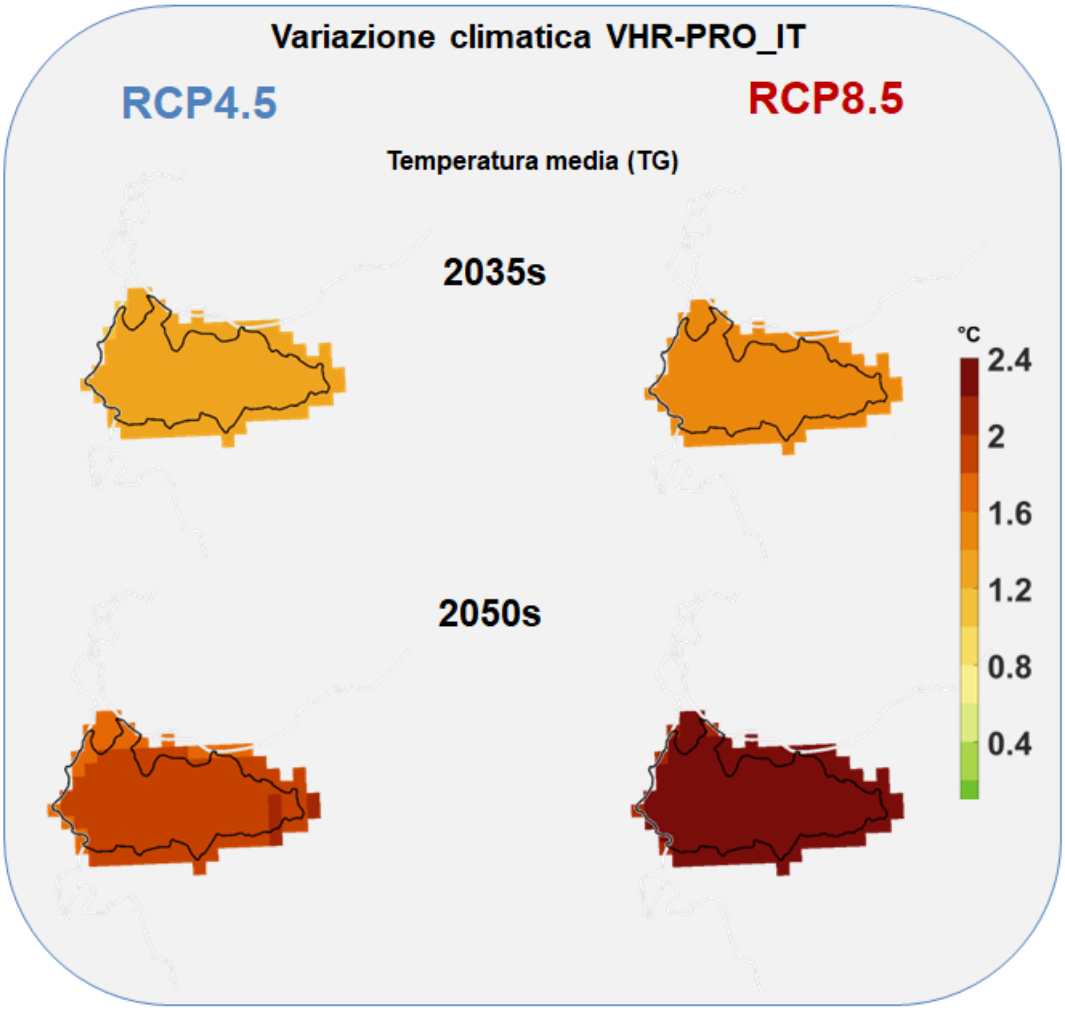

Figura A9: Variazione (ensemble mean) della temperatura media analizzata per il periodo 2021-2050 (2035s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 4.5 e RCP8.5.

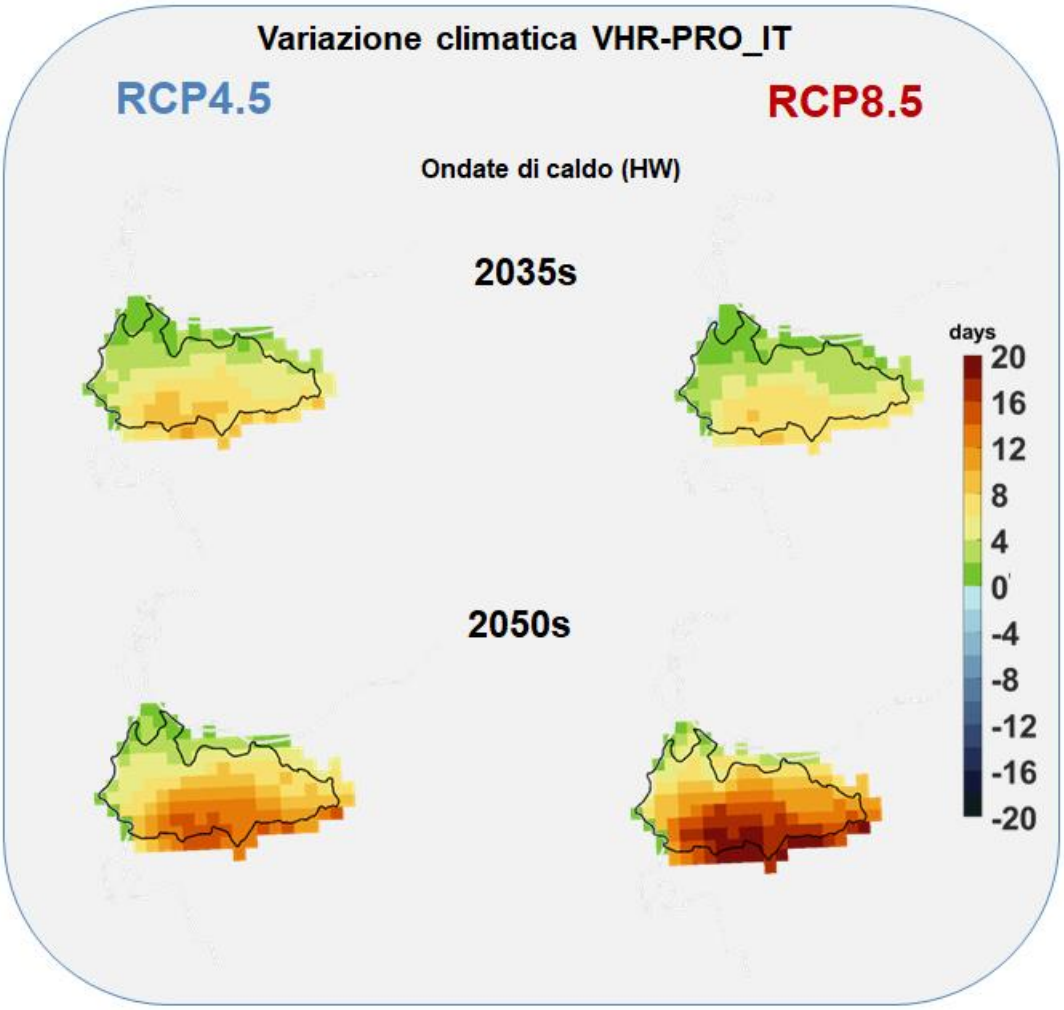

Figura A10: Variazione (ensemble mean) delle ondate di calore (HW) analizzata per il periodo 2021-2050 (2035s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 4.5 e RCP8.5.

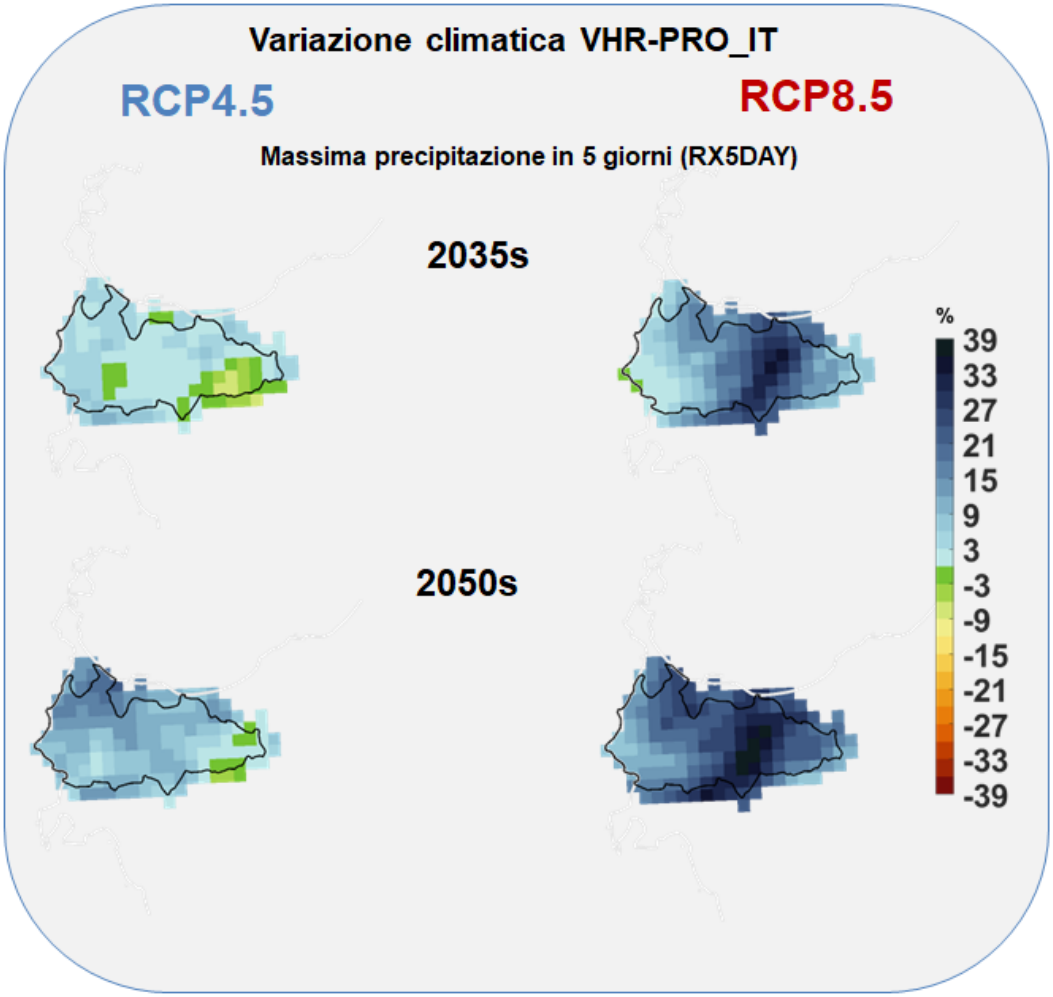

Figura A11: Variazione (ensemble mean) della massima precipitazione in 5 giorni (RX5DAY) analizzata per il periodo 2021-2050 (2035s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 4.5 e RCP8.5.

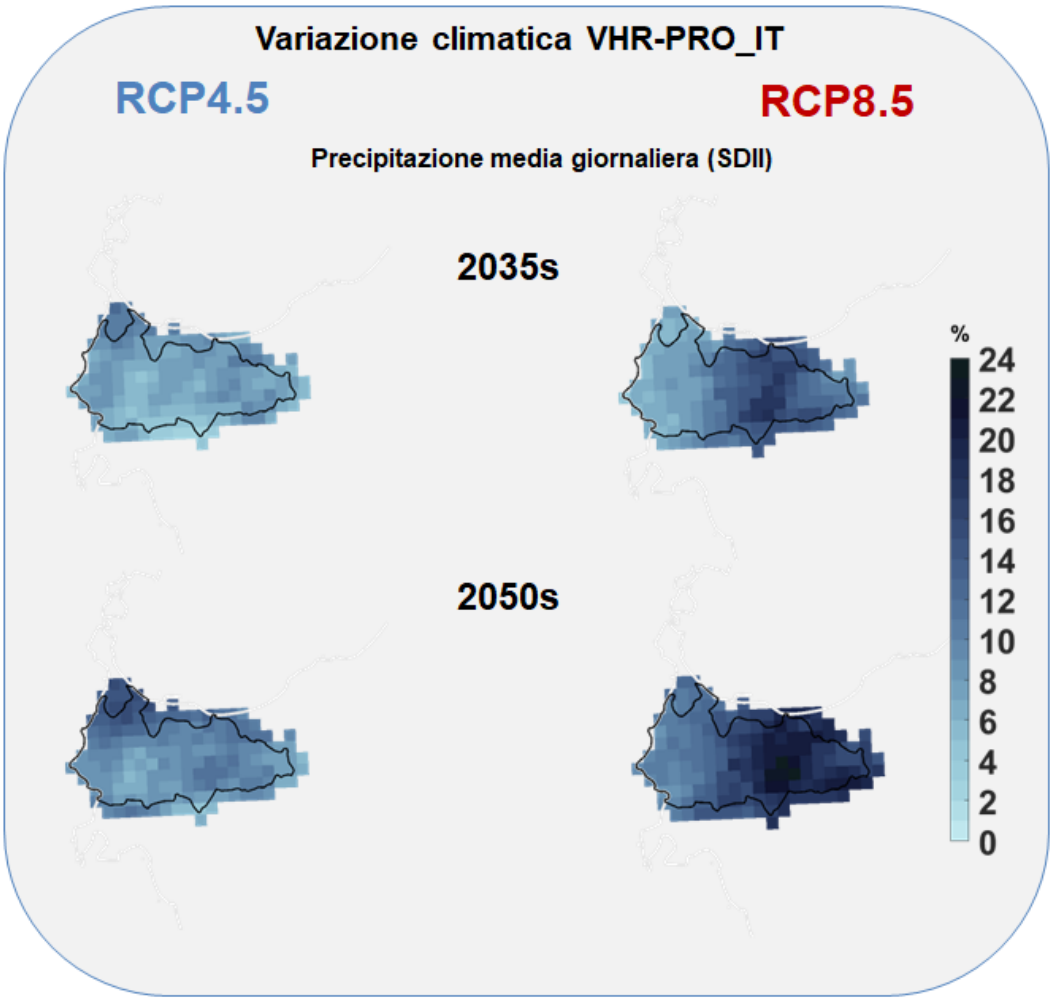

Figura A12: Variazione (ensemble mean) della precipitazione media giornaliera (SDII) analizzata per il periodo 2021-2050 (2035s) e 2036-2065 (2050s), rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP 4.5 e RCP8.5.

I risultati riproducono andamenti simili a quelli presenti nei modelli a più bassa risoluzione ma permettono di avere un maggior dettaglio. In particolare, l'indicatore HW (Hot Waves) mostra un incremento del numero di giorni di ondate di caldo a Sud ed a Est del territorio analizzato.

Per quanto attiene invece gli indicatori di precipitazione, entrambi evidenziano incrementi sull'area Centro-Orientale del territorio analizzato. Tali incrementi, risultano maggiori in condizioni di nessuna mitigazione soprattutto per il trentennio 2036-2065. Per maggiori dettagli si rimanda all'Allegato 2 che contiene l'analisi di consistenza tra VHR-PRO_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici presi in considerazione in questo lavoro.

Per quanto riguarda l'analisi tramite un modello ad altissima risoluzione, è essenziale notare che non è ancora possibile valutarne l'incertezza (rispetto al modello), come invece si può fare con un insieme di modelli, come nel caso di EURO-CORDEX. Ciò limita la sua utilità per il supporto ai processi di adattamento, in cui questa informazione risulta fondamentale. Nell'Allegato 2 è riportato, per una migliore comprensione dei risultati, un confronto tra i risultati ottenuti con il modello VHR_PRO_IT e quelli prodotti dall'ensemble dei modelli EURO-CORDEX.

Allegato 2: Analisi di consistenza tra VHR-PRO_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX attraverso indicatori climatici

I risultati ottenuti a partire dalla proiezione climatica, denominata VHR-PRO_IT, che utilizzano gli scenari RCP4.5 e RCP8.5 sono confrontati con quelli relativi al valore medio (noto come *ensemble mean* e ottenuto a partire dai valori dei singoli modelli che rappresentano l'ensemble) del sotto-insieme di proiezioni EURO-CORDEX ad una risoluzione orizzontale di circa 12 km. In particolare, l'utilizzo di queste proiezioni consente di valutare la dispersione (incertezza) dei singoli modelli intorno al loro valore medio. La stima dell'incertezza è ottenuta utilizzando come valore di sintesi la deviazione standard inter-modello: quanto più è basso il valore di deviazione standard tanto più sarà elevato il grado di accordo tra i modelli climatici dell'ensemble EURO-CORDEX, e viceversa.

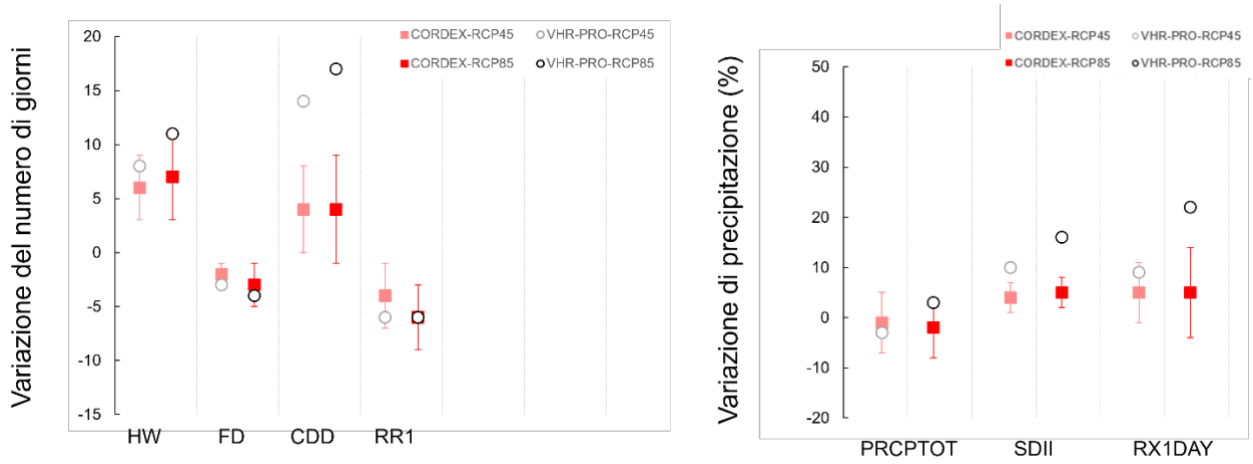

Figura A2.1: Variazione degli Indicatori climatici calcolati sul periodo 2036-2065 rispetto al 1981-2010 attraverso la proiezione VHR-PRO_IT e l'ensemble mean EURO-CORDEX sotto gli scenari RCP4.5 e RCP8.5: (a sinistra) indicatori di temperatura e di precipitazione espressi in numeri di giorni (HW, FD, CDD, RR1); (a destra) indicatori di precipitazione espressi in mm (PRCPTOT, SDII, RX1DAY). Per ciascun indicatore, il simbolo indica la media spaziale mentre, per i modelli EURO-CORDEX; la barra denota la variabilità inter-modello calcolata in termini di deviazione standard.

Il suddetto confronto tra indicatori mostra che:

- Per quanto riguarda le variazioni degli indicatori di precipitazione in mm, VHR-PRO_IT restituisce valori che ricadono nella variabilità inter-modello del sotto-insieme di modelli EURO-CORDEX per la precipitazione annuale cumulata (PRCPTOT). Per gli altri indicatori, la maggiore risoluzione spaziale e l'esplicita modellazione dei processi convettivi tende ad estremizzare le variazioni.
- Per quanto riguarda le variazioni degli indicatori di temperatura e di precipitazione espressi come numero di giorni, VHR-PRO_IT restituisce valori che ricadono nella variabilità inter-modello del sotto-insieme di modelli EURO-CORDEX esaminati, ad esclusione del numero di giorni consecutivi senza pioggia.

Glossario

Anomalia/variazione climatica: È la comparazione matematica (usualmente espressa in termini di differenza per la temperatura, e di rapporto per la precipitazione) tra una caratteristica statistica di interesse di una variabile fisica valutata nell'orizzonte futuro rispetto al periodo di riferimento. Tale comparazione prescinde, per definizione, da quanto simile alle osservazioni sia la grandezza di interesse fornita dal modello nel periodo di riferimento, e può quindi essere ritenuta una informazione particolarmente robusta. Inoltre, il calcolo delle anomalie climatiche non richiede l'applicazione di tecniche di *bias correction*.

Antropogenico: Causato dagli esseri umani.

Cambiamento climatico: con il termine cambiamento climatico ci si riferisce a un cambiamento dello stato del clima che persiste per un periodo di tempo prolungato (solitamente di decadi o più), e identificabile (per esempio, attraverso l'uso di test statistici) da cambiamenti della media e/o della variabilità delle sue proprietà. Il cambiamento climatico può essere dovuto a processi naturali interni, o a forzanti esterni, come le modulazioni dei cicli solari, le eruzioni vulcaniche, e i ripetuti cambiamenti antropogenici della composizione dell'atmosfera o dell'uso del suolo. Si noti che la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change), nel suo articolo 1, definisce il cambiamento climatico come: "un cambiamento del clima, attribuibile direttamente o indirettamente all'attività umana, che altera la composizione dell'atmosfera globale e che si somma alla variabilità climatica naturale osservata nel corso di periodi di tempo confrontabili". Pertanto, l'UNFCCC fa una distinzione tra il cambiamento climatico imputabile alle attività umane che alterano la composizione dell'atmosfera, e la variabilità climatica attribuibile a cause naturali.

Ciclo stagionale: media mensile, sul trentennio considerato, della variabile di interesse. Denominato anche ciclo annuale.

Clima: Il clima in senso stretto è solitamente definito come il tempo meteorologico medio o, in maniera più rigorosa, come la descrizione statistica in termini di media e variabilità di grandezze rilevanti, nel corso di un periodo di tempo che va da mesi a migliaia o milioni di anni. Il periodo classico per calcolare la media di queste variabili è trent'anni, secondo la definizione dell'Organizzazione meteorologica mondiale (WMO - World Meteorological Organization). Le grandezze rilevanti sono nella maggior parte dei casi variabili superficiali, come temperatura, precipitazioni e venti. In senso più ampio e generale, il clima è lo stato, con l'inclusione di una descrizione statistica, del sistema climatico.

Estremi climatici: Il verificarsi del valore di una variabile atmosferica al di sopra (o sotto) di un valore di soglia vicino all'estremità superiore (o inferiore) della gamma di valori osservati della variabile. Sono intesi come sinonimi eventi estremi, eventi meteorologici estremi.

Impatti (conseguenze, esiti): gli effetti sui sistemi naturali e umani. Nel Rapporto WGII AR5 dell'IPCC, il termine impatti è usato principalmente per riferirsi agli effetti degli eventi meteorologici e climatici estremi e dei cambiamenti climatici, sui sistemi naturali e umani. Gli impatti generalmente si riferiscono agli effetti su persone, abitazioni, salute, ecosistemi, beni e risorse economiche, sociali e culturali, servizi (inclusi quelli ambientali) e infrastrutture dovuti all'interazione dei cambiamenti climatici o degli eventi climatici pericolosi che si presentano entro uno specifico periodo di tempo, e alla vulnerabilità di una società o di un sistema esposti ai cambiamenti climatici stessi. Ci si riferisce inoltre agli impatti come a conseguenze ed esiti. Gli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi geofisici, compresi alluvioni, siccità e innalzamento del livello del mare, rappresentano un sottoinsieme di impatti denominati impatti fisici.

Indicatore climatico: È l'espressione matematica della grandezza ovvero della variabile climatica di interesse. Il framework ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*, http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml) identifica una serie di indicatori climatici di particolare interesse rappresentativi di un vasto ventaglio di impatti. Naturalmente, indicatori sempre nuovi possono essere

definiti per descrivere specifiche problematiche o impatti. Gli indicatori climatici sono spesso utilizzati per effettuare valutazioni di anomalie, in modo da descrivere, in maniera efficace e sintetica, i pericoli principali di aree anche vaste. In altre parole, gli indicatori climatici possono essere considerati utili *proxy* di un particolare impatto.

Livello medio dei mari: Il livello della superficie degli oceani in uno specifico punto, mediato su un periodo di tempo prolungato, come un mese o un anno. Il livello medio del mare è spesso utilizzato come datum nazionale cui sono riferite le altezze terrestri.

Modello climatico: Per modello climatico si intende, in generale, uno strumento che consenta di avere informazioni circa le principali variabili fisiche che regolano i processi atmosferici e l'interazione suolo-atmosfera. Più correttamente, gli standard attuali della comunità climatica fanno riferimento alla cosiddetta "catena di simulazione climatica" (*Climate Simulation Chain*, CSC), che è articolata nei seguenti step:

1. Scelta dello scenario RCP di riferimento;

2. Simulazione alla scala globale che considera lo scenario RCP come condizione iniziale e al contorno. Tale simulazione può essere fatta attraverso i *Global Climate Models* (GCM), costituiti da un sistema di equazioni che descrivono le principali dinamiche atmosferiche e oceaniche, oppure mediante i più sofisticati *Earth System Models* (ESM), che includono la modellazione dei più rilevanti processi fisici, chimici e biologici. In entrambi i casi, tali simulazioni forniscono risultati con una copertura globale e, conseguentemente, una risoluzione orizzontale bassa, dell'ordine dei 50-80 km. Risoluzioni più spinte sono usualmente più difficili da ottenere a causa delle notevoli risorse computazionali necessarie per processare e archiviare le informazioni.

3. *Downscaling* della simulazione globale. Il downscaling può essere statistico oppure dinamico. Il secondo caso, più frequente, consta di un modello climatico regionale (*Regional Climate Model*, RCM), che risolve i processi fisici e atmosferici che occorrono a scale spazio-temporali più risolute. Gli RCM vengono eseguiti utilizzando i risultati della simulazione globale come condizione al contorno, e forniscono risultati su domini più ristretti (ma comunque transnazionali) con una risoluzione orizzontale dell'ordine di "qualche" km. Ad esempio, per l'Italia sono disponibili simulazioni con risoluzione di circa 12, circa 8 e circa 2 km. Per maggiori approfondimenti si veda la voce "proiezioni climatiche".

Percentile: All'interno di un campione statistico formato da realizzazioni di una variabile casuale, il percentile corrispondente a un livello di probabilità pari a X% è il valore al di sotto del quale si trova il X% degli elementi del campione (compreso il valore stesso). Il percentile è spesso utilizzato per stimare gli estremi della distribuzione. Ad esempio, il 90-simo (10-mo) percentile può essere utilizzato come riferimento per la soglia dei valori più alti (bassi).

Pericolo e rischio climatico: Per "pericolo" si intende la quantificazione del fenomeno fisico dal quale ci si vuole cautelare, riferito ad una data area geografica e una data finestra temporale. In relazione al cambiamento climatico, la definizione è ristretta alle variabili climatiche "sorgente", quali ad esempio temperatura e precipitazione. Con riferimento al settore delle risorse idriche, un possibile pericolo climatico è rappresentato dalla variazione dei volumi stagionali di precipitazione su di un'area di ricarica di falda, i cui possibili impatti sono la diminuzione dei volumi idrici prelevabili dalla sorgente, l'abbassamento del livello di falda e/o l'intrusione del cuneo salino, a seconda delle caratteristiche locali. Tali impatti hanno conseguenze in cascata, ad esempio, sul fabbisogno irriguo e la possibilità di soddisfarlo, nonché sulla competizione con gli usi idropotabili. Per "rischio" si intende invece il danno atteso (in termini economici oppure quantificato da una variabile di interesse), in una data area geografica e una data finestra temporale, per effetto del fenomeno fisico di interesse. Il rischio climatico si sprigiona quindi da un pericolo climatico: esso potrebbe rappresentare l'inasprimento di un rischio già esistente oppure l'innescarsi di un nuovo rischio. Il framework dell'IPCC vede il rischio (in generale, e quello climatico in particolare) come prodotto di pericolo, vulnerabilità ed esposizione. L'esposizione rappresenta l'asset fisico (infrastrutture, costruzioni, persone, attività economiche, punti di interesse) che potrebbe essere danneggiato dal pericolo, ovvero dal fenomeno fisico. La vulnerabilità rappresenta invece la propensione dell'asset ad essere danneggiato.

Periodo di riferimento: L'arco temporale descrittivo del clima corrente rispetto al quale si vogliono analizzare gli eventuali cambiamenti nelle caratteristiche climatiche di un orizzonte temporale futuro. Per la sua selezione, bisogna considerare almeno due esigenze: da un lato, la sua ampiezza deve essere sufficientemente, ma non eccessivamente, estesa, in modo da ritenere, all'interno del periodo, il clima omogeneo e valutabile in modo robusto; dall'altro, si deve trattare di un arco temporale all'interno del quale siano disponibili dati sufficienti (in termini di copertura e risoluzione spaziale e temporale) per le variabili fisiche che si intende analizzare, come ad esempio precipitazione e temperatura.

Proiezione climatica: Si tratta dei risultati delle simulazioni effettuate a mezzo di modelli climatici. Solitamente, si fa riferimento alle "proiezioni" per sottolineare i risultati riguardanti un orizzonte temporale futuro; tuttavia, le simulazioni climatiche coprono un arco temporale più vasto, che comprende il periodo di riferimento, per il quale si abbiano osservazioni delle variabili fisiche modellate. Ciò allo scopo sia di inizializzare correttamente il modello, sia di costituire un riferimento rispetto al quale valutare un eventuale cambiamento. È bene ricordare in questa sede che le proiezioni, anche se caratterizzate da una risoluzione temporale giornaliera (o in alcuni casi oraria) si distinguono dalle "previsioni" poiché non possono essere considerate utili in una prospettiva *day-by-day*. In altre parole, le proiezioni non forniscono informazioni circa il valore che una variabile assumerà in una specifica data, ma è più corretto invece valutare la distribuzione statistica e le sue proprietà (media, varianza, etc.).

Scenario climatico: la rappresentazione plausibile e spesso semplificata del clima futuro, basata su un insieme internamente coerente di relazioni climatologiche, costruita per un suo uso esplicito nell'indagine delle potenziali conseguenze del cambiamento climatico antropogenico, e che serve spesso come input ai modelli sugli impatti. Le proiezioni climatiche spesso servono da materiale grezzo per costruire scenari climatici, ma gli scenari climatici di solito richiedono ulteriori informazioni, come per esempio sul clima attuale osservato.

Scenario di concentrazione: Secondo il 5° Rapporto IPCC, un parametro fisico che ben descrive la presenza di attività antropiche è la concentrazione di gas clima-alteranti (GHG) in atmosfera. Per prevedere come si evolverà il clima nel prossimo futuro, si richiede la contestuale previsione dell'evoluzione della concentrazione di GHG in atmosfera, la quale dipende, a sua volta, da molteplici fattori economici e sociali, quali la crescita della popolazione, lo sviluppo tecnologico e industriale, la tipologia di combustibili utilizzati, e simili. Data la complessità inerente tali valutazioni, la letteratura fornisce solo delle possibili ipotesi, definite appunto "scenari climatici". Il 5° Rapporto IPCC seleziona, ritenendoli di particolare interesse, un numero ristretto di tali scenari, i cosiddetti *Representative Concentration Pathways* (RCP). Tali scenari fattivamente sono costituiti da serie temporali di emissioni e concentrazioni di tutti i gas clima-alteranti, gli aerosol e i gas chimicamente attivi, nonché i cambiamenti attesi di suolo e relative coperture (*land use land cover*, LULC), che portano, all'anno 2100, ad uno specifico valore di *forcing* radiativo, cioè di cambiamento nel flusso radiativo nella parte più esterna dell'atmosfera. L'attributo "*representative*" sta ad indicare che un RCP è soltanto una singola realizzazione tra i molteplici possibili percorsi che possono portare allo stesso valore di *forcing*. L'attributo "*pathway*" ricorda invece che ad essere determinante, per l'evoluzione del clima, non è soltanto il valore finale di *forcing* ma anche la traiettoria con cui lo si raggiunge. Il 5° Rapporto IPCC identifica quattro RCP significativi (Figura 1), ciascuno caratterizzato da un andamento coerente con l'implementazione, o la non implementazione, di politiche di mitigazione ovvero di riduzione delle emissioni, corrispondenti all'adempimento, o meno, degli accordi internazionali (in particolare il *Paris agreement*, stipulato nel 2015):

- RCP 2.6. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +2.6 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali. La traiettoria è caratterizzata dalla presenza di un picco di concentrazione (corrispondente a un forcing di circa +3 W/mq) intorno al 2050 e poi una stabile diminuzione, determinata dal perseguimento di una massiccia strategia di mitigazione.

- RCP 4.5. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +4.5 W/mq entro il 2100, rispetto ai livelli preindustriali, in modo pressoché asintotico, e scaturisce dall'ipotesi di implementazione di politiche di mitigazione efficaci, ma non tanto quanto accade per RCP 2.6.

- RCP 6.0. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +6.0 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali, valore che tuttavia è destinato ad incrementare ulteriormente oltre il 2100. Rispetto allo scenario RCP 4.5, RCP 6.0 prevede politiche di mitigazione ancora più blande.

- RCP 8.5. Tale scenario prevede il raggiungimento di un *forcing* radiativo pari a +8.5 W/mq entro il 2100 rispetto ai livelli preindustriali, destinato ad incrementarsi ulteriormente nei secoli successivi. Tale scenario è definito *worst case* poiché corrispondente all'ipotesi di sviluppo economico, tecnologico e sociale basato interamente sull'utilizzo di combustibili fossili non rinnovabili.

Temperatura superficiale media globale: una stima della temperatura superficiale media globale dell'aria. Tuttavia, per variazioni nel corso del tempo, si utilizzano solo le anomalie, come le deviazioni da una climatologia, più comunemente basate sulla media globale pesata sull'area dell'anomalia di temperatura superficiale del mare, e dell'anomalia della temperatura dell'aria sulla superficie terrestre.

Variabilità climatica: con il termine variabilità climatica ci si riferisce alle variazioni dello stato medio e di altre statistiche (come la deviazione standard, l'occorrenza di eventi estremi, etc.) del clima a tutte le scale spaziali e temporali oltre a quella dei singoli eventi meteorologici. La variabilità può essere dovuta a processi interni naturali, all'interno del sistema climatico (variabilità interna), o a variazioni del forzante esterno naturale o antropogenico (variabilità esterna).

PROFILO CLIMATICO

cmcc