

Metodologia di Clusterizzazione climatica per le Aree Italiane basata sui dati di un modello Climatico ad Alta Risoluzione

Technical Notes

March 2024
Issue TN0299

*REMHI REgional
Models and
geoHydrological
Impacts*

By **Paola Mercogliano,**
Giuliana Barbato,
Mattia Scalas
Fondazione CMCC
Centro Euro-
Mediterraneo sui
Cambiamenti Climatici
giuliana.barbato@cmcc.it
paola.mercogliano@cmcc.it
mattia.scalas@cmcc.it

SUMMARY Questo report descrive la metodologia utilizzata per definire delle macroregioni climatiche omogenee in Italia sulla base dell'analisi delle condizioni climatiche storiche e attuali. All'interno di queste aree sono state identificate le aree climatiche omogenee, caratterizzate da future anomalie climatiche simili. Utilizzando un set di indicatori climatici rappresentativi degli impatti meteo-indotti, calcolati dai dati del dataset E-OBS per il periodo 1981-2010, si è proceduto con una cluster analysis che ha portato all'identificazione di 6 macroregioni omogenee. Successivamente, sono state analizzate le proiezioni climatiche future utilizzando il modello COSMO-CLM forzato da CMCC-CM, guidato dagli scenari RCP 4.5 e RCP 8.5, per calcolare le anomalie degli indicatori nel futuro (2021-2050 e 2071-2100). La sovrapposizione delle macroregioni con queste anomalie ha definito 13 aree principali di aree climatiche omogenee, che sono state georeferenziate e caratterizzate. Queste aree possono servire come riferimento per analisi settoriali e per l'individuazione di strategie di adattamento climatico.

Keywords Clusterizzazione, Proiezioni climatiche, Italia



1. INTRODUZIONE

Questo *technical report* espone la metodologia adottata per definire delle **macroregioni climatiche omogenee del territorio italiano**, ossia per l'individuazione di porzioni di territorio aventi analoghe condizioni climatiche durante un periodo di riferimento. La prima fase di lavoro per l'individuazione delle macroregioni climatiche omogenee consiste nell'effettuare una **zonazione in base all'analisi del clima di riferimento**. L'analisi è stata fondata su un set di indicatori climatici (Schmidt-Thomé and Greiving, 2013) rappresentativi dei principali impatti meteo-indotti su ambiente naturale, ambiente costruito, patrimonio culturale, sfera sociale ed economica. Tali indicatori sono stati calcolati utilizzando i dati climatici del dataset E-OBS (Haylock et al., 2008) e raggruppati per il periodo di riferimento 1981-2010 attraverso metodologie di *cluster analysis*. L'analisi ha evidenziato 6 macroregioni climatiche omogenee, ciascuna delle quali caratterizzata da valori simili degli indicatori selezionati e rappresentativi di una porzione di territorio che **vive ed ha vissuto condizioni climatiche simili negli ultimi trent'anni**. Successivamente, si è proceduto alla zonazione delle variazioni climatiche. A tal fine è stato utilizzato il modello climatico **COSMO-CLM forzato dal modello climatico CMCC-CM a 80 km di risoluzione** (Scoccimarro et al., 2011) guidato dagli **scenari RCP 4.5 e RCP 8.5** (Meinshausen et al. 2011; Moss et al. 2008) che corrispondono a due dei quattro *Representative Concentration Pathways* (RCP) che la comunità scientifica internazionale (IPCC 2013a) ha selezionato per rappresentare l'evoluzione delle concentrazioni future di gas ad effetto serra del nostro pianeta. Gli scenari selezionati sono i due più comunemente utilizzati in quanto rappresentano rispettivamente livelli di emissioni intermedi e alti cui corrispondono incrementi di temperatura medi globali a fine secolo al di sotto dei 2 °C e dei 4 °C rispettivamente. Le proiezioni climatiche future del modello selezionato, , sono state utilizzate per il calcolo delle variazioni climatiche degli stessi indicatori utilizzati in precedenza per la zonazione

Title of the Technical Notes

sul clima di riferimento. I valori delle variazioni climatiche degli indicatori sono stati quindi raggruppati in categorie omogenee attraverso la *cluster analysis*. **In particolare, vengono definite “aree climatiche omogenee” le zone che derivano dalla sovrapposizione delle macroregioni con i cluster delle variazioni climatiche.** Le macroregioni e le aree climatiche omogenee, terrestri, sono state georeferenziate e caratterizzate da un punto di vista amministrativo. Esse possono essere utilizzate come riferimento per lo svolgimento di analisi a livello settoriale e per l’individuazione di azioni di adattamento rappresentando.

2. NOTA METODOLOGICA

La presente sezione si propone di individuare, tramite la tecnica statistica della *cluster analysis* - una zonazione sul periodo di riferimento e una zonazione delle variazioni climatiche. La prima zonazione tende a raggruppare macroregioni che, attualmente, si presentano simili dal punto di vista del clima di riferimento mentre la seconda mira ad individuare le aree che potrebbero essere esposte a simili variazioni in riferimento ad alcuni specifici indicatori climatici. Entrambe le zonazioni hanno lo scopo di supportare la successiva analisi multisetoriale sugli impatti. Il metodo proposto si è sviluppato attraverso i seguenti passaggi metodologici:

1. Individuazione di sei **macroregioni climatiche omogenee** per cui i dati osservati utilizzati riportano condizioni climatiche simili negli ultimi trent’anni (1981-2010) (zonazione climatica) attraverso la metodologia della *cluster analysis* applicata ad un set di indicatori climatici (individuato seguendo Schmidt-Thomé and Greiving 2013) utilizzando il dataset **E-OBS versione 13** (Haylock et al. 2008);
2. **Analisi delle variazioni climatiche attese per il XXI secolo** in termini di **proiezioni di temperature e precipitazioni medie stagionali**, considerando due trentenni (2021-2050 e 2071-2100) e due diversi scenari climatici RCP



CMCC Technical Notes

(Representative Concentration Pathway 4.5 e 8.5, IPCC 2013a) a partire dai dati simulati dal modello climatico regionale COSMO-CLM;

3. **Zonazione delle variazioni climatiche sulla base delle variazioni climatiche attese per il periodo 2021-2050** (RCP 4.5 e RCP 8.5) per gli indicatori selezionati;
4. **Individuazione di aree climatiche omogenee**, attraverso la sovrapposizione delle macroregioni climatiche omogenee e della zonazione delle variazioni.

L'individuazione delle **macroregioni climatiche omogenee**, proposta in questo studio, rappresenta la base per lo studio delle variazioni climatiche future e per la definizione delle aree climatiche omogenee nazionali. Il set di indicatori climatici su cui si basa l'analisi (Tabella 1) è stato individuato nell'ESPON CLIMATE project (Schmidt-Thomé and Greiving, 2013) e include indicatori che rappresentano (in qualità di proxy) i principali impatti meteo-indotti, a scala europea, su ambiente naturale, costruito, patrimonio culturale, sfera sociale ed economica (si veda a tal proposito la Tabella 2.2 in Schmidt-Thomé and Greiving, 2013).

Tabella 1. Indicatori considerati

INDICATORE	ABBREVIAZIONE	DESCRIZIONE	UNITÀ DI MISURA
TEMPERATURA MEDIA ANNUALE	Tmean	Media annuale della temperatura media giornaliera	(°C)
GIORNI DI PRECIPITAZIONI INTENSE	R20	Media annuale del numero di giorni con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm	(giorni/anno)
FROST DAYS	FD	Media annuale del numero di giorni con temperatura minima al di sotto dei 0°C	(giorni/anno)
SUMMER DAYS	SU95p	Media annuale del numero di giorni con temperatura massima maggiore di 29.2 °C (valore medio del 95° percentile della distribuzione delle temperature massime osservate tramite E-OBS)	(giorni/anno)
CUMULATA DELLE PRECIPITAZIONI INVERNALI	WP	Cumulata delle precipitazioni nei mesi invernali (Dicembre, Gennaio, Febbraio)	(mm)
CUMULATA DELLE PRECIPITAZIONI ESTIVE	SP	Cumulata delle precipitazioni nei mesi estivi (Giugno, Luglio, Agosto)	(mm)
COPERTURA NEVOSA	SC	Media annuale del numero di giorni per cui l'ammontare di neve superficiale è maggiore di un 1 cm	(giorni/anno)
EVAPORAZIONE	Evap	Evaporazione cumulata annuale	(mm/anno)
CONSECUTIVE DRY DAYS	CDD	Media annuale del massimo numero di giorni consecutivi con pioggia inferiore a 1 mm/giorno	(giorni/anno)

95° PERCENTILE DELLA PRECIPITAZIONE	R95p	95° percentile della precipitazione	(mm)
-------------------------------------	------	-------------------------------------	------

Fonte: elaborazione CMCC.



3. ZONAZIONE CLIMATICA SUL PERIODO DI RIFERIMENTO 1981-2010

La *cluster analysis* della condizione climatica attuale per il periodo di riferimento 1981-2010 è stata effettuata a partire dal dataset E-OBS (Haylock et al. 2008). Gli indicatori sono stati raggruppati attraverso metodologie di clusterizzazione. Per determinare un numero consistente di *cluster*, sono stati usati gli indici introdotti di Silhouette, di Calinski Harabasz e David-Bouldin (maggiori dettagli sono disponibili nell'Allegato Tecnico-Scientifico "Analisi della condizione climatica attuale e futura"). Dai risultati delle analisi condotte **è stato identificato un numero di cluster pari a 6**. I risultati della zonazione climatica sono riportati in **Figura 1**. Nella **Tabella 2** sono invece riportati, per tutti gli indicatori i valori medi e tra parentesi tonde, per ciascuna macroregione, una stima della variabilità degli indicatori selezionati in termini di deviazione standard. Tale stima è stata ricavata a partire dalle serie temporali annuali degli indicatori all'interno di ciascuna macroregione sul periodo di riferimento 1981-2010. Si noti che per la zonazione climatica sul periodo di riferimento sono utilizzati solo otto dei dieci indicatori definiti nella **Tabella 1**, in quanto *la copertura nevosa* (SC) e *l'evaporazione* (Evap) non sono disponibili nel *dataset* E-OBS. Mentre per la zonazione delle variazioni climatiche, rispetto all'analisi del clima attuale, sono stati aggiunti entrambi gli indicatori: l'indicatore relativo alla copertura nevosa e l'indicatore di evaporazione. **È stato inoltre eliminato l'indicatore dei CDD in quanto correlato all'indicatore di Evap.**

Di seguito è riportata una breve descrizione delle sei macroregioni climatiche:

Macroregione 1 - Prealpi e Appennino Settentrionale. L'area è caratterizzata da valori intermedi per quanto riguarda i valori cumulati delle precipitazioni invernali ed estive e da valori elevati, rispetto alle altre aree, per i fenomeni di precipitazione estremi

CMCC Technical Notes

(R20 e R95p). Dopo la macroregione 2 risulta essere la zona del Nord Italia con il numero maggiore di *summer days* ovvero con il numero di giorni in cui la temperatura massima ha un valore superiore al valore di soglia considerato (29,2°C). La macroregione 1 comprende molte regioni del Centro-Nord Italia: il 55% della superficie del Piemonte, il 38% della superficie della Lombardia, il 54% della Liguria, il 36% dell'Emilia-Romagna, 46% della superficie del Veneto, il 32% del Friuli-Venezia Giulia, il 42% delle Marche, il 40% della superficie dell'Umbria, il 62% della Toscana e infine il 3% della superficie del Lazio;

Macroregione 2 - Pianura Padana, alto versante adriatico e aree costiere dell'Italia centro-meridionale. La macroregione è caratterizzata dal maggior numero, rispetto a tutte le altre zone, di giorni, in media, al di sopra della soglia selezionata per classificare i *summer days* (29,2°C) e al contempo da temperature medie elevate; anche il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia risulta essere elevato (CDD) in confronto alle altre zone dell'Italia centro settentrionale; il regime pluviometrico, in termini di valori stagionali (WP ed SP) ed estremi (R20 e R95p) mostra invece caratteristiche intermedie. La macroregione 2 si estende su quasi tutta la penisola, interessando il 28% della superficie della Lombardia, il 25% del Veneto, il 47% dell'Emilia-Romagna, il 31% delle Marche, il 39% dell'Umbria, il 23% della superficie della Toscana, il 69% del Lazio, il 28% dell'Abruzzo, il 50% della superficie del Molise, il 54% della Campania, il 76% della Puglia, il 40% della Basilicata e infine l'8% della superficie della Calabria;

Macroregione 3 - Appennino centro-meridionale e alcune zone limitate dell'Italia nord occidentale. Essa è caratterizzata da ridotte precipitazioni estive e da eventi estremi di precipitazione per frequenza e magnitudo, sebbene le precipitazioni invernali presentino valori medio alti rispetto alle altre macroregioni; anche il numero massimo di giorni consecutivi senza pioggia risulta essere intermedio (CDD), ovvero analogo a quanto osservato nella limitrofa macroregione 2 ma più basso per quanto riguarda la macroregione 6, caratterizzato dal valore di tale indicatore più elevato. La macroregione 3 interessa una porzione del Piemonte (9% della superficie regionale), il 13% della

Title of the Technical Notes

Liguria e le regioni centro-meridionali, nello specifico il 27% delle Marche, 20% dell'Umbria, il 27% della superficie del Lazio, il 72% dell'Abruzzo, il 50% del Molise, il 46% della Campania, il 3% della Puglia, il 60% della superficie della Basilicata e infine il 32% della Calabria;

Macroregione 4 - Area alpina. In questa macroregione si riscontra il minimo valore di temperatura media (5.7°C) e il massimo numero di *frost days*; le precipitazioni invernali sono meno abbondanti (143 mm), rispetto alla macroregione climatica 5, che è la più piovosa, ma in assoluto si registra un valore medio-alto, mentre le precipitazioni estive sono le più significative (286 mm) rispetto a tutte le altre macroregioni. La macroregione 4 si estende sull'arco alpino, comprendendo il 19% della superficie della Valle d'Aosta, il 18% del Piemonte, il 29% della Lombardia, la totalità del Trentino-Alto Adige, il 27% del Veneto e infine il 4% del Friuli-Venezia Giulia;

Macroregione 5 - Italia settentrionale. L'area è caratterizzata da valori più elevati di precipitazione sia in termini di valori medi invernali (321 mm) che di estremi (R20 e R95p); anche le precipitazioni estive risultano mediamente alte, seconde solo alla zona alpina (macroregione 4). Per quanto riguarda i giorni massimi consecutivi (CDD) asciutti in questa macroregione si trova il valore più basso. Per quanto riguarda i *summer days* il valore che caratterizza tale area è mediamente basso (secondo solo alla zona alpina dove si registra il valore minimo di tale indicatore). La macroregione 5 include l'81% della superficie valdostana, il 18% del Piemonte, il 33% della Liguria, il 5% della Lombardia, il 2% del Veneto, il 64% del Friuli-Venezia Giulia, il 17% della superficie dell'Emilia-Romagna e infine il 14% della Toscana;

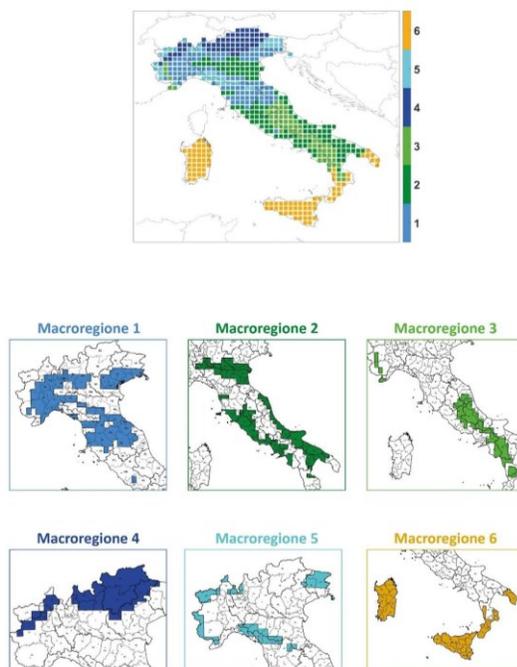
Macroregione 6 - Aree insulari e l'estremo sud dell'Italia. Questa macroregione è quella mediamente più calda e secca, contraddistinta dalla temperatura media più alta (16 °C) e dal più alto numero medio di giorni annui consecutivi senza pioggia (70 giorni/anno); inoltre, tale macroregione è caratterizzata dalle precipitazioni estive mediamente più basse (21 mm) e in generale da eventi estremi di precipitazione ridotti



CMCC Technical Notes

per frequenza e magnitudo. La macroregione 6 interessa le regioni dell'estremo sud del Paese, nello specifico il 20% della Puglia, il 60% della superficie della Calabria e la totalità della Sicilia e della Sardegna.

Figura 1. Zonazione climatica sul periodo climatico di riferimento (1981-2010).



Fonte: elaborazione CMCC.

Tabella 2. Valori medi e deviazione standard degli indicatori per ciascuna macroregione individuata.

	Temperatura media annuale - T _{mean} (°C)	Giorni con precipitazioni intense - R20 (giorni/anno)	Frost days - FD (giorni/anno)	Summer days - SU95p (giorni/anno)	Precipitazioni invernali cumulate - WP (mm)	Precipitazioni cumulate estive - SP (mm)	95° percentile precipitazioni - R95p (mm)	Consecutive dry days - CDD (giorni)
								
Macroregione 1 Prealpi e Appennino settentrionale	13 (±0.6)	10 (±2)	51 (±13)	34 (±12)	187 (±61)	168 (±47)	28	33 (±6)
Macroregione 2 Pianura Padana, alto versante adriatico e aree costiere dell'Italia centro-meridionale	14.6 (±0.7)	4 (±1)	25 (±9)	50 (±13)	148 (±55)	85 (±30)	20	40 (±8)
Macroregione 3 Appennino centro-meridionale	12.2 (±0.5)	4 (±1)	35 (±12)	15 (±8)	182 (±55)	76 (±28)	19	38 (±9)
Macroregione 4 Area alpine	5.7 (±0.6)	10 (±3)	152 (±9)	1 (±1)	143 (±47)	286 (±56)	25	32 (±8)
Macroregione 5 Italia centro-settentrionale	8.3 (±0.6)	21 (±3)	112 (±12)	8 (±5)	321 (±89)	279 (±56)	40	28 (±5)
Macroregione 6 Aree insulari ed estremo sud Italia	16 (±0.6)	3 (±1)	2 (±2)	35 (±11)	179 (±61)	21 (±13)	19	70 (±16)

Fonte: elaborazione CMCC.

4. ZONAZIONE CLIMATICA DELLE VARIAZIONI PER LE PROIEZIONI CLIMATICHE FUTURE (2021-2050)

Lo scopo della zonazione è quello di individuare, tramite l'applicazione di una procedura di *cluster analysis* analoga a quella impiegata nel precedente paragrafo, aree del territorio italiano omogenee in termini di variazioni climatiche. Come riferimento allo stato dell'arte sulle proiezioni climatiche in Europa, si faccia riferimento all'iniziativa **Euro-Cordex**. Per le finalità del presente documento, le proiezioni climatiche impiegate, finalizzate alla individuazione delle variazioni, sono state realizzate con il modello RCM COSMO CLM (Rockel and Geyer 2008) nella configurazione ottimizzata dal CMCC sull'Italia (Bucchignani et al. 2016; Zollo et al. 2016). Le proiezioni climatiche future sono state ottenute considerando due diversi scenari IPCC: RCP4.5 e RCP8.5 al fine di valutare l'incertezza delle proiezioni climatiche rispetto ai due scenari considerati. Prima di analizzare i risultati della zonazione climatica delle variazioni, nella seguente sezione, vengono presentate, per completezza, le **proiezioni climatiche su base stagionale**,



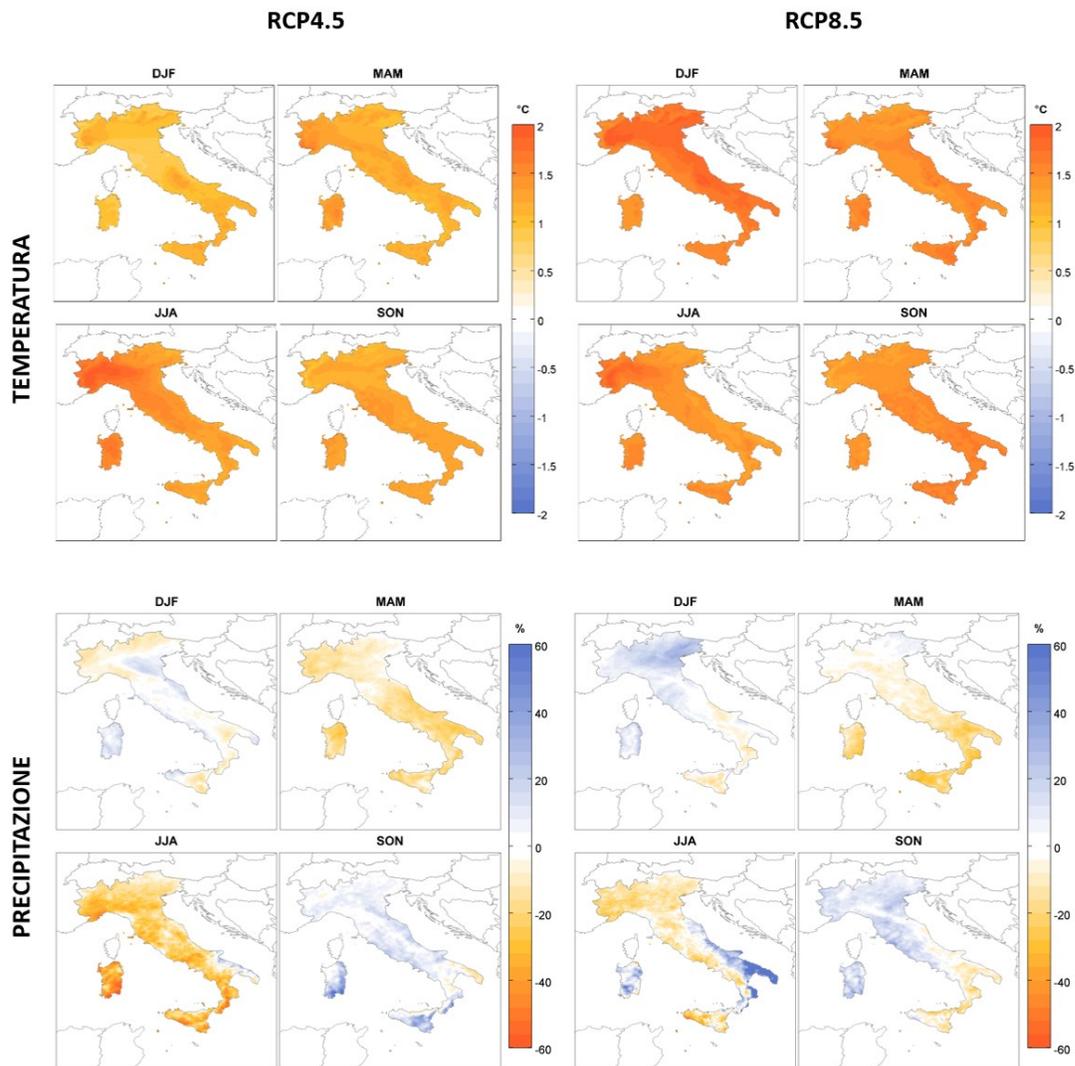
CMCC Technical Notes

del modello selezionato per il periodo (2021-2050) per temperatura e precipitazione. Per le analisi relative al lungo periodo si faccia riferimento a Bucchignani et al. 2016. Al fine di effettuare la zonazione climatica delle variazioni, per gli indicatori selezionati sono riportate infine le **variazioni climatiche trentennali** (2021-2050 vs 1981-2010). Le variazioni climatiche si basano sulla **differenza tra due periodi**, uno futuro e uno **di riferimento, entrambi della durata di 30 anni**. Tale lunghezza è ritenuta adeguata per la caratterizzazione sia dei valori medi che degli estremi delle variabili atmosferiche di interesse (IPCC 2013a). La **Figura 2** mostra le proiezioni climatiche stagionali di variazione della temperatura media e delle precipitazioni medie per il periodo 2021-2050, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. La Figura 2 evidenzia un **generale aumento delle temperature** per entrambi gli scenari, più marcato nell'RCP8.5, con un incremento fino a 2 °C. Per quanto riguarda le precipitazioni, invece, lo scenario RCP4.5 proietta **una generale riduzione in primavera e un calo più accentuato in estate**, soprattutto nel sud Italia e in Sardegna (fino al 60%). L'inverno invece, è caratterizzato da una lieve riduzione di precipitazioni che interessa le Alpi e il sud Italia e un leggero aumento in Sardegna e nella Pianura Padana. Infine in autunno si osserva un generale lieve aumento delle precipitazioni, ad eccezione della Puglia. Lo scenario RCP8.5, invece, proietta un **aumento delle precipitazioni invernali e autunnali sul nord Italia e una lieve riduzione al sud**. Le precipitazioni primaverili presentano una diminuzione sul sud Italia, mentre l'estate è caratterizzata da un accentuato aumento delle precipitazioni in Puglia (oltre il 60%) e una riduzione altrove. Successivamente alla valutazione del quadro climatico basata sulle proiezioni climatiche stagionali di variazione della temperatura media e delle precipitazioni cumulate medie, gli indicatori selezionati per l'analisi della condizione climatica futura sono stati calcolati con i dati simulati dal modello climatico regionale COSMO-CLM per il periodo di riferimento (1981-2010) e per il periodo intermedio 2021-2050 con gli scenari RCP4.5 e RCP8.5. In questo caso, rispetto all'analisi del clima

attuale, è stato considerato l'indicatore Evap al posto dell'indicatore CDD ed è stato aggiunto l'indicatore relativo alla copertura nevosa, SC.



Figura 2. Proiezioni climatiche stagionali di variazione delle temperature medie e delle precipitazioni cumulate medie per il periodo 2021-2050, rispetto al periodo di riferimento 1981-2010, per gli scenari RCP4.5 ed RCP8.5.



Fonte: elaborazione CMCC.

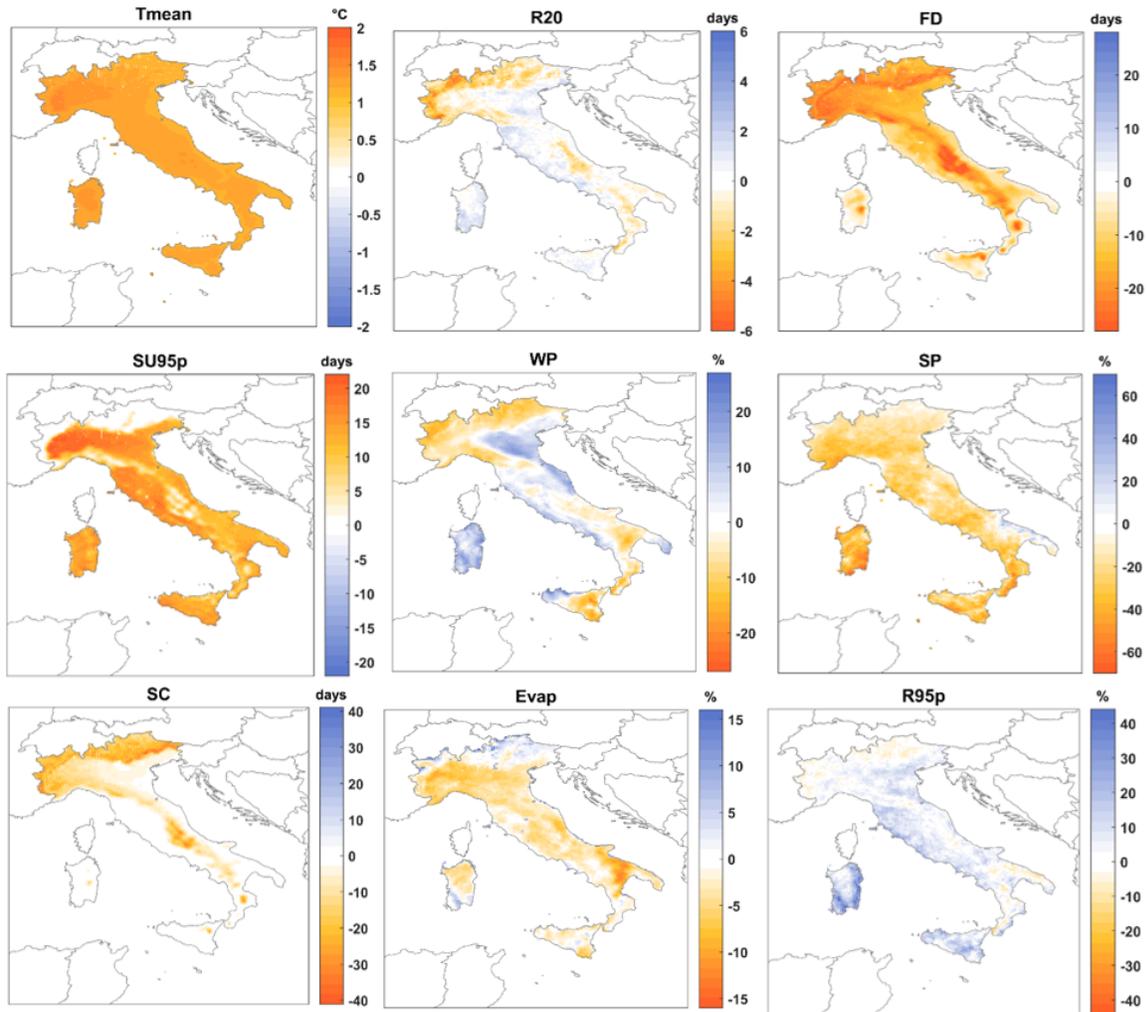


CMCC Technical Notes

Le variazioni climatiche sono ottenute come differenza tra i valori medi degli indicatori nel periodo futuro 2021-2050 e quelli di riferimento 1981-2010. Le variazioni climatiche sono espresse in parte in valori assoluti (*temperatura media annuale, giorni di precipitazione intensa, frost days, summer days, copertura nevosa*) e in parte in valori relativi (cumulata delle precipitazioni invernali, cumulata delle precipitazioni estive, evaporazione cumulata annuale, 95° percentile della precipitazione). Le distribuzioni spaziali delle variazioni impiegate per la zonazione climatica rispetto allo scenario RCP4.5 vengono illustrate nella **Figura 3**, mentre rispetto allo scenario RCP8.5 sono riportate nella **Figura 4**. In entrambi gli scenari, gli indicatori associati alla temperatura indicano un generalizzato incremento dei valori: aumento nei valori medi e dei summer days (SU95p). Con lo scenario RCP4.5 si osserva una riduzione generale delle precipitazioni estive (SP) ad esclusione del basso versante adriatico, una riduzione delle precipitazioni invernali sulle Alpi, sugli Appennini, in Calabria e nell'area centro-orientale della Sicilia, e una riduzione complessiva dell'evaporazione su tutto il territorio, specie in parte della Puglia e in Basilicata, escludendo le Alpi (probabilmente associato all'incremento di temperatura e variazione della copertura nevosa). Per quanto riguarda l'indicatore R20 si registrano variazioni contenute nell'intero territorio nazionale ad eccezione delle Alpi, con dei picchi su quelle occidentali. Per quanto riguarda la copertura nevosa e i frost days si registra una loro diminuzione generale, specie sulle aree montane prevalentemente interessate da tali fenomeni. **Le proiezioni con lo scenario RCP8.5 mostrano un aumento significativo delle precipitazioni estive sul basso versante adriatico** (rispetto allo scenario di riferimento su questa zona), e un **aumento complessivo nel centro-nord delle precipitazioni invernali e dell'evaporazione, a differenza del sud Italia dove si registra un comportamento opposto**; per quanto concerne gli eventi estremi, è stimato un **aumento generalizzato nella magnitudo** (R95p) mentre le variazioni dell'indicatore R20 ricalcano quelle della precipitazione invernale con un aumento nell'Italia Centro-Settentrionale e una riduzione nelle aree meridionali.



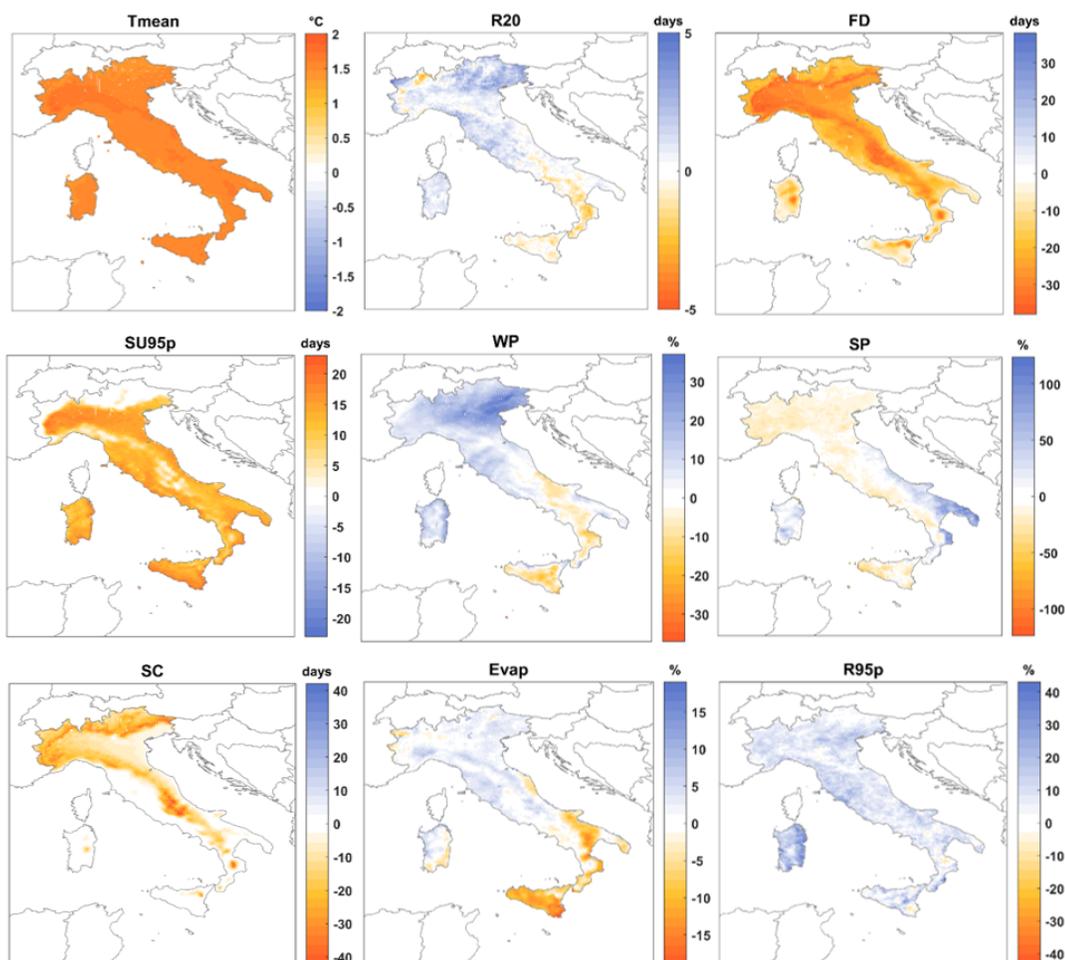
Figura 3. Mappe delle variazioni (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).



Fonte: elaborazione CMCC.



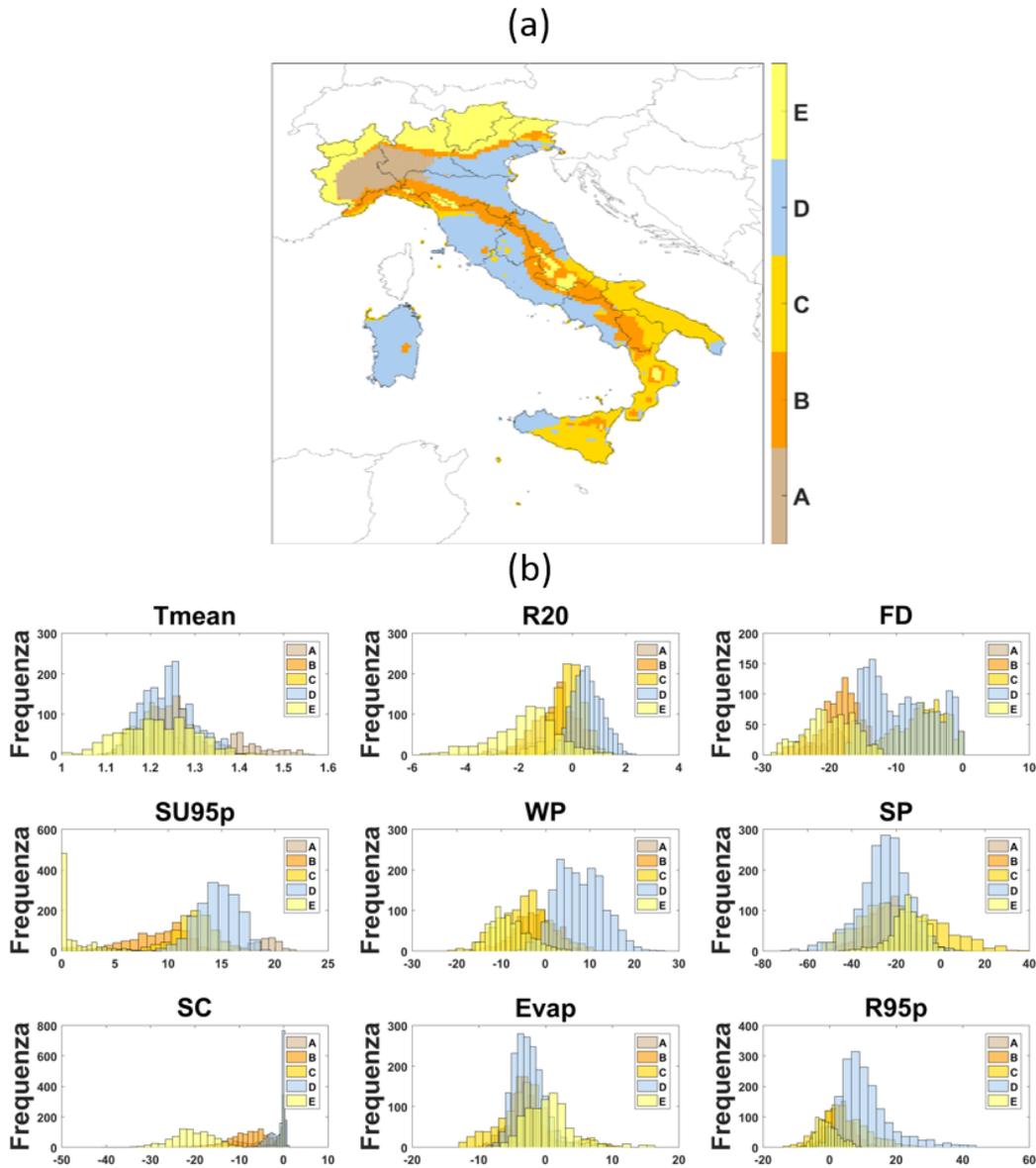
Figura 4. Mappe delle variazioni (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010).



Fonte: elaborazione CMCC.

Al fine di individuare aree climatiche omogenee nazionali per variazioni, i valori degli indicatori sono stati raggruppati in categorie omogenee denominate “*cluster di variazioni*”. La zonazione climatica delle variazioni ha individuato cinque cluster di variazioni (da A a E) mostrate in **Figura 5a** per lo scenario RCP4.5 e in **Figura 6a** per lo scenario RCP8.5. Infine, la **Tabella 3** e la **Tabella 4** restituiscono i valori medi, in termini di variazione, per le singole classi.

Figura 5. Scenario RCP4.5: (a) Mappa dei cluster individuati.



Fonte: elaborazione CMCC.



Tabella 3: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP4.5 2021-2050 vs 1981-2010).

CLUSTER	T _{mean} (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (%)	SP (%)	SC (giorni/anno)	Evap (%)	R95p (%)
A	1.4	-1	-20	18	-4	-27	-12	-6	1
B	1.3	-1	-19	9	-2	-24	-8	-3	3
C	1.2	0	-6	12	-5	-18	-1	-3	4
D	1.2	1	-9	14	8	-25	-1	-2	11
E	1.2	-2	-20	1	-8	-15	-21	1	-1

Fonte: elaborazione CMCC.

Per lo scenario RCP 4.5 l'analisi evidenzia le seguenti caratteristiche:

Cluster A (caldo-secco estivo): il cluster è caratterizzato da un aumento significativo dei *summer days* (di 18 giorni/anno) e da una riduzione delle precipitazioni invernali e, soprattutto, di quelle estive (valore medio della riduzione pari al 27%). Il cluster A presenta una riduzione rilevante anche dei *frost days*, della copertura nevosa e dell'evaporazione;

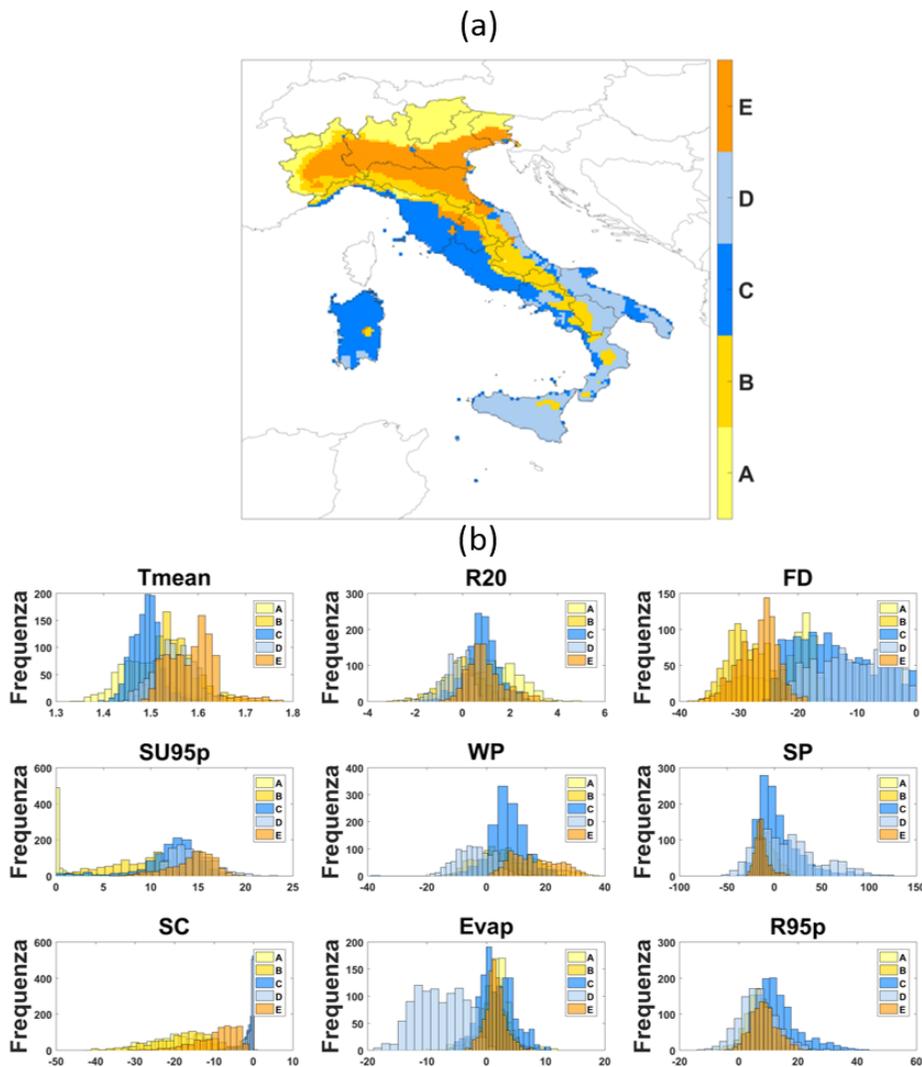
Cluster B (caldo invernale-secco estivo): analogamente al cluster A, è interessato da una riduzione sia delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari al 24%) sia dei *frost days* (di 19 giorni/anno). Si osserva anche una moderata riduzione della copertura nevosa (di 8 giorni/anno);

Cluster C (secco): in questo cluster si osserva una riduzione delle precipitazioni invernali, a cui si aggiunge anche la riduzione, sebbene di minor entità, di quelle estive. Inoltre, si ha un aumento moderato dei *summer days* (di 12 giorni/anno);

Cluster D (piovoso invernale-secco estivo): il cluster D è interessato da un aumento delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari all'8%) e da una riduzione notevole di quelle estive (valore medio della riduzione pari al 25%). In generale si ha un aumento significativo sia dei fenomeni di precipitazione estremi (R95p) sia dei *summer days* (di 14 giorni/anno);

Cluster E (secco-caldo invernale): si osserva una riduzione generale dei fenomeni di precipitazione. Inoltre, si osserva una riduzione significativa dei *frost days* (di 20 giorni/anno) e della copertura nevosa (di 21 giorni/anno).

Figura 6: Scenario RCP8.5: (a) Mappa dei cluster individuati.



Fonte: elaborazione CMCC.



Tabella 4: Valori medi dei cluster individuati (COSMO RCP8.5 2021-2050 vs 1981-2010)

CLUSTER	T _{mean} (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (%)	SP (%)	SC (giorni/anno)	Evap (%)	R95p (%)
A	1.5	1	-23	1	13	-11	-20	2	5
B	1.6	0	-28	8	2	-7	-18	1	6
C	1.5	1	-14	12	7	3	-1	2	13
D	1.5	0	-10	14	-4	14	-1	-8	6
E	1.5	1	-27	14	16	-14	-9	2	9

Fonte: elaborazione CMCC.

Per lo scenario RCP 8.5 l'analisi evidenzia le seguenti caratteristiche:

Cluster A (piovoso invernale-secco estivo): il cluster A è interessato da un aumento delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari al 13%) e da una riduzione di quelle estive (valore medio della riduzione pari all' 11%). Inoltre si osserva una riduzione significativa sia dei *frost days* (di 23 giorni/anno) che della copertura nevosa (di 20 giorni/anno);

Cluster B (caldo invernale): il cluster B è interessato da una riduzione significativa sia dei *frost days* (di 28 giorni/anno) che della copertura nevosa (di 18 giorni/anno). Inoltre si osserva una riduzione moderata delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari al 7%);

Cluster C (piovoso-caldo estivo): il cluster C è interessato da un aumento sia delle precipitazioni invernali che di quelle estive e da un aumento significativo dei fenomeni di precipitazione estremi (valore medio dell'aumento pari al 13%). Infine, si osserva un aumento rilevante dei *summer days* (di 12 giorni/anno).

Cluster D (secco invernale-caldo estivo): per il cluster D si osserva una complessiva riduzione di precipitazioni invernali e un aumento rilevante di quelle estive (si tenga conto che si tratta di valori percentuali calcolati rispetto a valori assoluti di precipitazione estiva caratteristici bassi). Inoltre si ha un aumento notevole dei *summer days* (di 14 giorni/anno) e una riduzione complessiva dell'evaporazione (valore medio della riduzione pari all'8%);

Title of the Technical Notes

Cluster E (caldo-piovosso invernale-secco estivo): il cluster risulta caratterizzato da un aumento significativo sia dei *summer days* (di 14 giorni/anno) che dei fenomeni di precipitazione estremi (valore medio dell'aumento pari al 9%). Inoltre si osserva una rilevante riduzione delle precipitazioni estive (valore medio della riduzione pari **al 14%**) **e un aumento significativo delle precipitazioni invernali (valore medio dell'aumento pari al 16%). Il cluster E presenta anche una notevole riduzione dei frost days (di 27 giorni/anno).**

Tra i due scenari considerati si evidenziano alcune differenze in termini di eventi estremi: per lo scenario RCP8.5 si osserva un aumento significativo del 95° percentile della precipitazione (R95p) rispetto allo scenario RCP4.5. Inoltre, mentre le variazioni WP e SP per lo scenario RCP4.5 mostrano una riduzione (WP aumenta solo per il cluster D, come mostrato in Figura 1.1-5a), nel caso dello scenario RCP8.5 si individuano zone in cui si osserva anche un aumento di precipitazioni estive (cluster C e D, Figura 1.1-6a) e invernali (cluster A, B, C e E, Figura 1.1-6a).

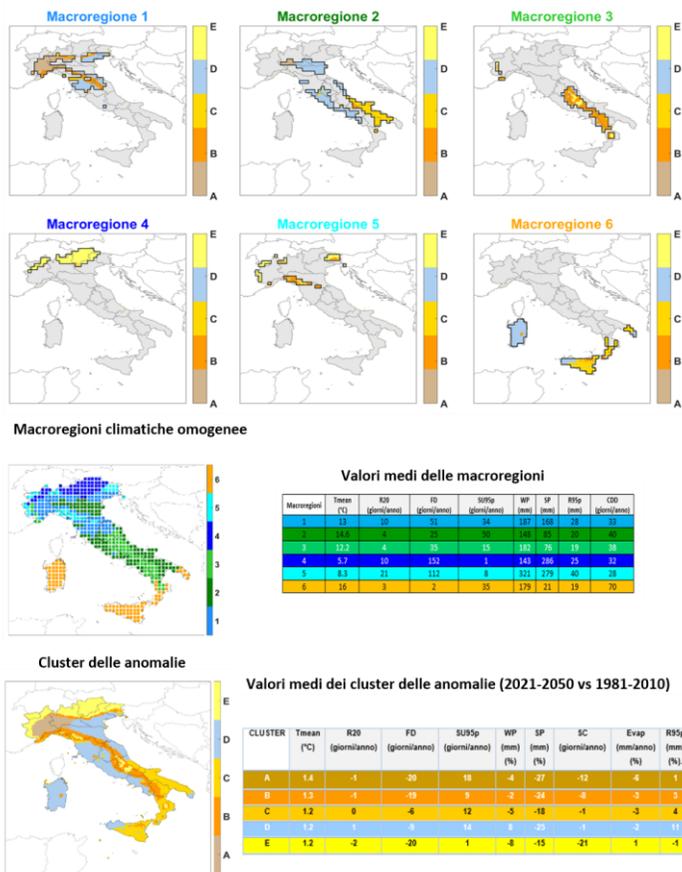
5. INDIVIDUAZIONE DELLE AREE CLIMATICHE OMOGENEE

Dall'intersezione delle 6 macroregioni climatiche omogenee identificate con l'analisi del clima attuale (Figura 1) e i 5 cluster di variazioni (Figura 5 e Figura 6) scaturiscono 13 principali "aree climatiche omogenee" per i due scenari (RCP4.5 e RCP8.5), ossia le aree del territorio nazionale con uguale condizione climatica attuale e stessa proiezione climatica di variazione futura.

Per agevolare i successivi studi settoriali e facilitare il lettore nell'individuazione delle variazioni prevalenti per ciascuna macroregione climatica omogenea, i cluster delle variazioni sono stati visualizzati separatamente per ognuna delle sei macroregioni climatiche omogenee, sia per lo scenario RCP4.5 (**Figura 7**) che per lo scenario RCP8.5 (**Figura 8**).

L'individuazione delle aree climatiche omogenee va intesa come strumento di sintesi, di supporto agli esperti, per la caratterizzazione della condizione climatica attesa e non come unico strumento di valutazione del cambiamento climatico. La Tabella 5 e la Tabella 6 forniscono, rispettivamente per lo scenario RCP4.5 ed RCP8.5, una descrizione sintetica delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni.

Figura 7: Zonazione climatica delle variazioni (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP4.5) per ciascuna delle sei macroregioni¹.



¹ Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.



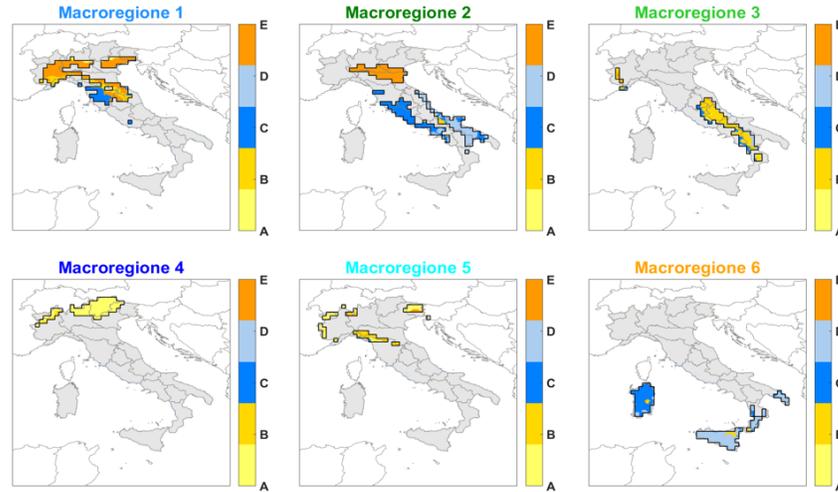
Tabella 5: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP4.5).

21

Macroregioni climatiche omogenee	Descrizione delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni considerando lo scenario RCP4.5
1	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 1A, 1B e 1D. <i>Variazioni principali:</i> in generale, per l'intera macroregione 1, si ha una riduzione rilevante delle precipitazioni estive e dei <i>frost days</i> . In particolare la macroregione 1 risulta piuttosto eterogenea in termini di aree climatiche omogenee presenti.
2	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 2A, 2C, 2D. <i>Variazioni principali:</i> il versante tirrenico e la maggior parte della Pianura Padana sono interessati da un aumento delle precipitazioni invernali e da una riduzione di quelle estive. Invece, per la parte ovest della pianura Padana e il versante adriatico, si osserva una riduzione sia delle precipitazioni estive che di quelle invernali. In generale si ha un aumento significativo dei <i>summer days</i> per l'intera macroregione 2.
3	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 3B, 3E. <i>Variazioni principali:</i> per l'Appennino centro-meridionale si osserva una marcata riduzione delle precipitazioni estive, con l'area più interna caratterizzata da una riduzione delle precipitazioni sia estive che invernali. L'intera macroregione 3 presenta una riduzione complessiva dei <i>frost days</i> .
4	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 4E. <i>Variazioni principali:</i> si osserva una riduzione degli eventi estremi, una riduzione complessiva dei <i>frost days</i> e della copertura nevosa.
5	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 5B, 5E. <i>Variazioni principali:</i> all'interno della macroregione 5, caratterizzata in base al periodo di riferimento dai valori più rilevanti di precipitazione, si assiste ad una riduzione significativa delle precipitazioni e dei <i>frost days</i> .
6	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 6C, 6D. <i>Variazioni principali:</i> per l'intera macroregione 6, area più calda e secca rispetto al periodo di riferimento, si osserva una complessiva riduzione delle precipitazioni estive e un aumento moderato dei <i>summer days</i> . Inoltre la Sardegna e parte della Sicilia sono caratterizzate da un aumento delle precipitazioni invernali.

CMCC Technical Notes

Figura 8: Zonazione climatica delle variazioni (2021-2050 vs 1981-2010, scenario RCP8.5) per ciascuna delle sei macroregioni².



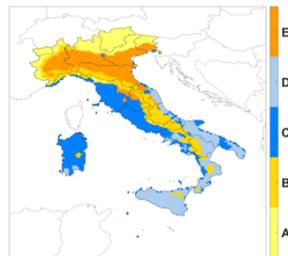
Macroregioni climatiche omogenee



Valori medi delle macroregioni

Macroregioni	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	RS9p (mm)	COO (giorni/anno)
1	13	10	51	34	187	168	28	33
2	14,6	4	25	50	148	85	30	40
3	12,2	4	35	15	182	76	19	38
4	5,7	10	152	1	143	286	25	32
5	8,3	21	112	8	321	279	40	28
6	16	3	2	35	179	21	19	70

Cluster delle anomalie



Valori medi dei cluster delle anomalie (2021-2050 vs 1981-2010)

CLUSTER	Tmean (°C)	R20 (giorni/anno)	FD (giorni/anno)	SU95p (giorni/anno)	WP (mm)	SP (mm)	SC (giorni/anno)	Evap (mm/anno)	R95p (mm)
A	1,5	1	-23	1	13	-11	-20	2	5
B	1,6	0	-28	8	2	-7	-18	1	6
C	1,5	1	-14	12	7	3	-1	2	13
D	1,5	0	-10	14	-4	14	-1	-8	6
E	1,5	1	-27	14	16	-14	-9	2	9

Fonte: elaborazione CMCC.

² Per agevolare la lettura sono state riportate anche le informazioni relative alla zonazione di riferimento (1981-2010) e al quadro complessivo dei cluster delle anomalie.

Tabella 6: Descrizione delle aree climatiche omogenee per macroregione (COSMO RCP8.5).

Macroregioni climatiche omogenee	Descrizione delle aree climatiche omogenee principali che ricadono nelle macroregioni considerando lo scenario RCP8.5
1	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 1B, 1C e 1E. <i>Variazioni principali:</i> Nella parte dell'area che ricade in Toscana si assiste ad un aumento complessivo dei fenomeni di precipitazione e degli estremi. Le restanti aree sono interessate da una riduzione delle precipitazioni estive e aumento di quelle invernali. In generale si ha una riduzione dei <i>frost days</i> , più rilevante rispetto all'RCP4.5.
2	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 2C, 2D, 2E. <i>Variazioni principali:</i> per quanto riguarda la pianura Padana si assiste ad una riduzione delle precipitazioni estive e ad un aumento rilevante di quelle invernali; le restanti aree della macroregione 2 sono caratterizzate da un aumento complessivo dei fenomeni di precipitazione anche estremi. In generale si ha un aumento significativo dei <i>summer days</i> , come per lo scenario RCP4.5.
3	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 3B, 3C, 3D. <i>Variazioni principali:</i> per tutta la macroregione 3 si osserva una riduzione significativa dei <i>frost days</i> (maggiore rispetto all'RCP4.5). Per l'Appennino centro-meridionale si ha in generale una riduzione delle precipitazioni estive, mentre per le aree più esterne si assiste ad un aumento delle precipitazioni estive e dei fenomeni di precipitazione estremi.
4	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 4A. <i>Variazioni principali:</i> si osserva una riduzione delle precipitazioni estive e un aumento di quelle invernali. Inoltre si ha una riduzione generale sia dei <i>frost days</i> che della copertura nevosa, come per lo scenario RCP4.5.
5	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 5A. <i>Variazioni principali:</i> la macroregione 5, caratterizzata in base al periodo di riferimento dai valori più significativi di precipitazione, risulta caratterizzata da un aumento delle precipitazioni invernali e da una riduzione delle precipitazioni estive.
6	<i>Aree climatiche omogenee:</i> 6C, 6D. <i>Variazioni principali:</i> si osserva un aumento significativo degli eventi estremi e in generale delle precipitazioni estive, in opposizione a quanto osservato per lo scenario RCP4.5.





BIBLIOGRAFIA

Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A. L., & Mercogliano, P. (2016). High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *International Journal of Climatology*, 36(2), 735-756. doi:10.1002/joc.4379

Calinski, T., & Harabasz, J. (1974). A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics Theory and Methods*, 3, 1-27. doi:10.1080/03610927408827101

Haylock, M., Hofstra, N., Klein Tank, A., Klok, E., Jones, P., & New, M. (2008). A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006. *J. Geophys.* doi:10.1029/2008JD010201

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (United Kingdom) and New York (NY, USA), [Stocker, T.F. *Cambridge University Press*, 29.

Meinshausen, M., Smith, S., Calvin, K., Daniel, J., Kainuma, M., Lamarque, J., . . . Van Vuuren, D. (2011). The RCP greenhouse gas: concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Clim. Change*, 109, 213–241. doi:10.1007/s10584-011-0156-z

Rockel, B., & Geyer, B. (2008). The performance of the regional climate model CLM in different Climate regions, based on the example of precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 487-498.

Schmidt-Thomé, P., & Greiving, S. (2013). *European Climate Vulnerabilities and Adaptation: A Spatial Planning Perspective*. Wiley-Blackwell.

Title of the Technical Notes

Scoccimarro, E., Gualdi, A., Bellucci, A., Sanna, P., Fogli, E., Manzini, M., . . . Navarra, A. (n.d.). Effects of Tropical Cyclones on Ocean Heat Transport in a High Resolution Coupled General Circulation Model. *Journal of Climate*, 24, 4368-4384.

Zollo, A. L., Rillo, V., Bucchignani, E., Montesarchio, M., & Mercogliano, P. (2016). Extreme temperature and precipitation events over Italy: assessment of high resolution simulations with COSMO-CLM and future scenarios. *International Journal of Climatology*, 36(2), 987-1004. doi:10.1002/joc.4401

