

Rapporto sull'andamento climatico e sugli scenari collegati

Aggiornamento annuale

Teolo, dicembre 2025



ARPAV - Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio
- Ufficio Climatologia

Francesco Rech, Fabio Zecchini, Giovanni Massaro

1.	Climatologia attuale in Veneto	4
1.1	Analisi dei dati meteoroclimatici	4
1.2	Inquadramento climatico del Veneto	5
1.2.1	I mesoclimi del Veneto.....	7
1.3	Caratteristiche termo-pluviometriche e di ventosità regionali.....	10
1.3.1	La precipitazione.....	10
1.3.2	La temperatura	13
1.3.3	Intensità e direzione del vento	16
1.4	Peculiarità del clima Veneto.....	18
1.5	I trend climatici sul Veneto	19
1.5.1	Trend della temperatura media.....	20
1.5.2	Andamento della precipitazione cumulata	25
1.5.3	Anomalie dell'ultimo decennio rispetto al periodo 1991-2020	29
2.	Proiezioni regionali climatiche nel Nord-Est Italia.....	31
2.1	Sommario.....	31
2.2	Introduzione.....	31
2.3	Dataset	32
2.4	Metodologia.....	33
2.4.1	Analisi dati	33
2.4.2	Incertezza delle proiezioni	34
2.4.3	Indici climatici	34
2.4.4	Downscaling statistico	34
2.5	Risultati	35
2.5.1	Temperatura	35
2.5.2	Precipitazione.....	38
2.5.3	Eventi estremi	40
2.6	Conclusioni.....	44
3.	Piattaforma Clima Nord-Est.....	45
3.1	Barometro del clima.....	47
3.2	Climatologia storica.....	47
3.2.1	Indicatori climatici	47
3.2.2	Aggregazione temporale	48
3.2.3	Dati osservati.....	48
3.2.4	Risoluzione geografica.....	48
3.2.5	Avvertenze.....	48

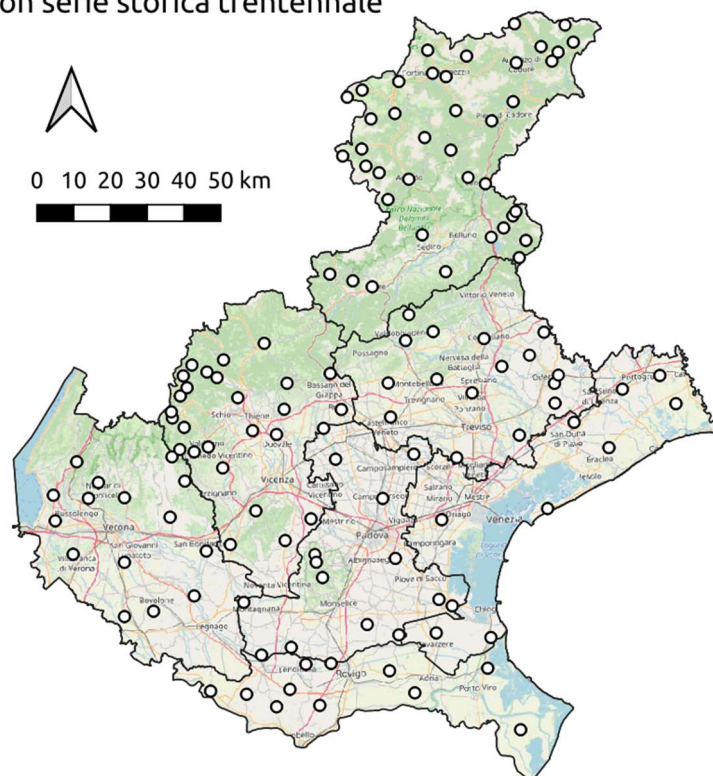
3.3	Proiezioni climatiche	49
3.3.1	Indicatori climatici	49
3.3.2	Aggregazione temporale	50
3.3.3	Scenari e modelli climatici.....	50
3.3.4	Risoluzione geografica.....	51
3.3.5	Avvertenze.....	51
4.	Bibliografia	53

1. Climatologia attuale in Veneto

1.1 Analisi dei dati meteoclimatici

Per caratterizzare il clima regionale ed individuarne eventuali trend in atto si analizzano i dati delle circa 130 stazioni meteorologiche automatiche di ARPAV che ad oggi dispongono di un trentennio di dati, necessari per l'individuazione delle normali climatiche. Le stazioni automatiche hanno sostituito o affiancato le stazioni meccaniche dell'ex Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia a partire dalla fine degli anni '80 dapprima sulla fascia alpina e prealpina e successivamente, nei primi anni '90, anche sulla pianura.

Stazioni automatiche ARPAV
con serie storica trentennale



Le stazioni termo-pluviometriche attualmente attive in Regione sono circa 210. Tale rete effettua il monitoraggio continuo delle variabili meteorologiche allo scopo di caratterizzare il territorio dal punto di vista climatico; supportare l'attività meteorologica, nivologica, idrologica ed agrometeorologica nelle sue azioni quotidiane; supportare le scelte decisionali degli enti preposti alla gestione ed all'utilizzo del territorio e supportare le operazioni di pronto intervento nella gestione delle situazioni di allerta meteorologica, idrologica ed ambientale. La rete pertanto è stata sviluppata con finalità multiuso al fine di soddisfare molteplici esigenze operative di utenti istituzionali e non.

1.2 Inquadramento climatico del Veneto

Il Veneto presenta peculiari caratteristiche climatiche che sono il risultato dell'azione combinata di un insieme di fattori che agiscono a diverse scale. Un ruolo chiave lo gioca anzitutto la collocazione della nostra regione alle medie latitudini, da cui derivano caratteristici effetti stagionali.

A ciò si aggiunga il fatto che il Veneto si pone in una zona di transizione fra:

- areale centro-europeo in cui predomina l'influsso delle grandi correnti occidentali e dell'Oceano Atlantico (clima "Cfb" di Köppen),
- areale sud-europeo ove domina l'influsso degli anticicloni subtropicali e del mare Mediterraneo (clima "Csa" di Köppen).

A tali influssi fondamentali si associano importanti fattori che condizionano in modo significativo il clima regionale fino a definire specifiche sottozone climatiche:

- l'appartenenza al bacino padano - veneto, delimitato a nord dalla catena alpina, a sud da quella appenninica e con un'apertura principale verso est;
- la presenza lungo il lato sud-orientale della regione dell'estesa fascia adriatica;
- la presenza di un vasto areale montano alpino e prealpino ad orografia complessa;
- la presenza del Lago di Garda a ovest.

Di seguito la sintesi dei diversi fattori che determinano il clima del Veneto

i. MACROSCALA

Posizione geografica a livello continentale: il Veneto si trova in posizione di transizione tra l'area continentale centro-europea e quella mediterranea ed è influenzato da:

- vicinanza di "regioni sorgenti" di masse d'aria (aria continentale, marittima e sue varianti a seconda della zona di origine);
- strutture circolatorie atmosferiche (grandi correnti occidentali, grandi anticicloni subtropicali, ecc.).

ii. MESOSCALA E MICROSCALA

Appartenenza alla regione Padano-Alpina:

il Veneto è inserito nel settore orientale del grande bacino padano, delimitato a nord dalla catena alpina e a sud da quella appenninica con un'apertura principale e uno sbocco sul Mare Adriatico, a est.

Presenza dei rilievi alpini e prealpini:

Il settore settentrionale del Veneto è montano, ad orografia complessa in cui i diversi fattori topografici (altitudine, giacitura, pendenza, esposizione) giocano un ruolo importante modificando la circolazione atmosferica e influenzando le diverse variabili atmosferiche ed in particolare:

- **la radiazione solare** (effetti di pendenza ed esposizione, effetti dell'orizzonte orografico);
- **la temperatura** (es: aree di compluvio di fondovalle con accumulo notturno di aria fredda da cui derivano inversioni termiche con nebbie, gelate e brinate; pendici caratterizzate da maggiore mitezza, che si accentua per le pendici esposte a meridione);
- **l'umidità relativa** (es: aree di fondovalle con valori più elevati);
- **le precipitazioni** (es: intensificazioni orografiche);
- **il vento** (brezze di monte e valle, föhn, ecc.).

Presenza di grandi masse d'acqua:

L'Alto Adriatico e il Lago di Garda danno luogo ad alcuni effetti caratteristici fra cui:

- la mitigazione delle temperature (gli estremi si smorzano, con aree litoranee che rispetto alla pianura interna presentano temperature medie più elevate in inverno e più basse in estate);
- la cessione di umidità all'atmosfera, favorevole ad esempio all'attività temporalesca;
- la genesi di venti caratteristici (brezze).

Da notare tuttavia che l'Alto Adriatico è un bacino interno poco profondo e relativamente freddo rispetto ad esempio al Mar Tirreno, per cui l'effetto mitigante sul clima risulta attenuato.

Copertura del suolo e uso del suolo:

La variabilità spaziale della copertura e dell'uso del suolo ha significativi effetti sul clima e da tali effetti deriva la genesi dei diversi microclimi; ad esempio un suolo nudo rispetto a uno coperto da vegetazione si scalda molto di più durante il giorno e si raffredda più velocemente di notte, le città ed il loro immediato circondario presentano caratteristiche isole di calore, ecc.

Cruciali sono gli effetti sul clima legati all'influenza che sono in grado di esercitare importanti regioni sorgenti di masse d'aria con caratteri peculiari, ed in particolare:

- il Mediterraneo, fonte di masse d'aria umida e mite in tutte le stagioni, in grado di mitigare le masse d'aria più fredde provenienti dall'esterno del bacino e di umidificare quelle di provenienza continentale;
- l'Oceano Atlantico, fonte di masse d'aria umida e relativamente mite (aria marittima polare più fredda proveniente dal Nord Atlantico o dalle medie latitudini, più mite originaria del Medio Atlantico) che tuttavia risulta solitamente più fredda rispetto a quella mediterranea; ciò si rivela fondamentale per la formazione di perturbazioni, in forma di sistemi frontali e vortici, particolarmente frequenti nel periodo che va dall'autunno alla primavera; inoltre nel periodo che va da marzo a novembre l'aria atlantica che irrompe sull'area dopo aver attraversato le Alpi si rivela fattore d'innescio di una vivace attività temporalesca;
- la vasta area continentale eurasiatica, sorgente di masse d'aria polare continentale (aria siberiana) provenienti dalla Russia settentrionale particolarmente fredde ed asciutte in inverno ed il cui ingresso in Italia attraverso la "porta di Trieste" dà luogo al fenomeno della Bora (chiamata per questo anche "porta della Bora");
- la zona oltre il circolo Polare che in tutte le stagioni è fonte di masse d'aria fredda (aria artica, marittima o continentale) talvolta in grado di raggiungere l'area mediterranea aggirando le grandi catene montuose (Pirenei ed Alpi);
- la fascia intertropicale, fonte di masse d'aria torrida (aria subtropicale, marittima o continentale) e che tende a umidificarsi passando sul Mediterraneo.

Le sopra elencate masse d'aria possono influenzare sensibilmente il clima del Veneto in virtù delle strutture circolatorie atmosferiche che ne determinano gli spostamenti e fra le quali ricordiamo come più importanti:

- gli anticicloni dinamici, come ad esempio l'anticiclone delle Azzorre, il cui stabile ingresso sul Mediterraneo segna l'affermarsi di condizioni estive, ed i promontori anticiclonici africani, responsabili della maggior parte delle ondate di caldo che interessano l'area italiana;
- gli anticicloni termici ed in particolare l'anticiclone russo-siberiano, la cui espansione verso il Mediterraneo nel periodo invernale coincide con le grandi irruzioni di gelida aria polare continentale (monsone invernale europeo);
- le saccature atlantiche, depressioni a forma di V il cui transito è più frequente nei mesi autunnali, invernali e primaverili e che sono all'origine di precipitazioni anche abbondanti sulla regione. La disposizione delle saccature (orientamento dell'asse, estensione verso sud, ecc.) determina le aree e i versanti più esposti alle precipitazioni;
- le depressioni mobili del Mediterraneo, in genere innescate dall'irruzione di masse d'aria fredda da aree esterne al bacino. Fra queste ricordiamo, per il contributo al quadro precipitativo della nostra regione, le depressioni del Golfo di Genova innescate dall'interazione con la barriera alpina di saccature atlantiche in transito. La traiettoria delle depressioni di Genova le porta nella maggior parte dei casi a transitare sulla Val Padana con traiettoria verso est-sudest.

In tale contesto dinamico gioca un ruolo fondamentale la catena alpina che agisce sulla circolazione atmosferica alterandola profondamente. Ad esempio le Alpi intercettano l'umidità dalla circolazione dando luogo ad intensificazioni orografiche sui versanti sopravvento (effetto "stau") e ad attenuazione delle precipitazioni sottovento (effetto "föhn"). Per questo motivo le zone montane della Regione, in particolare quelle prealpine, rappresentano le aree mediamente più piovose del Veneto nelle quali, soprattutto in occasione di forti flussi perturbati di provenienza meridionale, le precipitazioni si intensificano e divengono più persistenti dando luogo, specie nel periodo autunnale, a eventi pluviometrici particolarmente abbondanti.

Al contrario, specie durante la stagione invernale, in caso di correnti perturbate provenienti da nord, la catena alpina rappresenta un'efficace barriera per i versanti meridionali e le pianure limitrofe che, risultando sottovento, spesso registrano condizioni di tempo stabile e senza precipitazioni anche per lunghi periodi di tempo. Anche per tali motivi la stagione invernale in Veneto, a differenza del clima tipicamente mediterraneo, rappresenta la stagione mediamente meno piovosa. In estate invece lunghi periodi secchi risultano più rari a causa delle precipitazioni a prevalente carattere convettivo che, seppur distribuite in modo molto irregolare sul territorio, possono risultare abbastanza frequenti durante la stagione calda, anche in condizioni anticicloniche o in occasione di deboli fronti perturbati in quota (origine termo-convettiva delle precipitazioni dovuta al forte riscaldamento diurno della superficie terrestre o aumento dell'instabilità atmosferica dovuto al sopraggiungere di correnti in quota leggermente più fresche).

1.2.1 I mesoclimi del Veneto

Come risultato dei fattori generatori prima descritti, nel Veneto si possono distinguere tre mesoclimi fondamentali:

- il mesoclima della pianura
- il mesoclima prealpino
- il mesoclima alpino interno

Il mesoclima della pianura

caratterizza l'area pianeggiante della regione, compresa tra la fascia litoranea e l'areale pedemontano, comprendendo anche i Colli Euganei e i Colli Berici. Prevale in quest'area un certo grado di continentalità con inverni relativamente rigidi ed estati calde. Le temperature medie annue sono comprese fra i 13 °C delle zone più interne e i 14 °C della fascia litoranea. Secondo la classificazione climatica di Köppen elaborata per i climi italiani da Pinna in funzione della temperatura (Pinna, 1978), il mesoclima della pianura appartiene al clima temperato sub-continentale.

In condizioni di tempo anticiclonico la massa d'aria che sovrasta la Pianura Veneta manifesta condizioni di elevata stabilità o di inversione termica al suolo che si traducono in fenomeni a stagionalità spiccata quali le foschie, le nebbie, le gelate, l'afa e l'accumulo di inquinanti in vicinanza del suolo.

Al verificarsi di tali fenomeni cooperano:

- la presenza di importanti fonti di umidità (areali irrigui, superficie marina, Lago di Garda) in grado di rifornire di vapore acqueo la massa d'aria in vicinanza del suolo;
- la presenza di circolazioni di origine termica caratteristiche, le brezze, che interessano poche centinaia di metri al di sopra del suolo e si distinguono in brezze di monte – valle (con risalita diurna dalla pianura verso i rilievi e drenaggi notturni di aria fredda dai rilievi alla pianura), brezze di lago e brezze di mare.

Da rilevare che le brezze sono spinte dalla radiazione (suolo che si riscalda di giorno per effetto del soleggiamento e si raffredda di notte per irraggiamento verso lo spazio) e pertanto tendono a scomparire in presenza di nuvolosità accentuata o di ventosità accentuata indotta da grandi strutture circolatorie.

Nell'area della pianura viene compresa anche la fascia costiera, caratterizzata dalla vicinanza del mare, dal quale le brezze penetrano con efficacia nell'entroterra. L'azione mitigatrice delle acque è comunque limitata, sia perché si è in presenza di un mare interno, stretto e poco profondo, sia perché la dislocazione dell'areale marino lo pone in grado di mitigare solo le masse d'aria provenienti da settori sud-orientali o orientali. Da ciò discende che le temperature invernali, seppur mitigate, risultano comunque basse, in particolare per le incursioni della bora, fredda e asciutta, da nordest.

Gli effetti di brezza nella fascia litoranea sono più spiccati nel periodo primaverile-estivo ed in situazioni anticicloniche, allorché la debolezza della circolazione generale consente il pieno sviluppo di circolazioni locali dovute alle discontinuità termiche fra mare e terra. Durante il giorno si sviluppa la brezza di mare che raggiunge la massima intensità nelle ore pomeridiane e soffia generalmente da sudest. La brezza notturna, che generalmente soffia da nordest, non è perpendicolare alla costa come normalmente accade, ma ad essa parallela, poiché il fenomeno vede il prevalere di interazioni più ampie fra la catena alpina e il Mare Adriatico.

Le precipitazioni a livello mensile e stagionale in pianura sono distribuite abbastanza uniformemente durante l'anno raggiungendo totali annui in genere compresi tra 700 e 1000 mm; l'inverno è la stagione mediamente più secca mentre nelle stagioni intermedie prevalgono le perturbazioni atlantiche e mediterranee, con eventi pluviometrici a volte importanti; in estate i fenomeni temporaleschi risultano abbastanza frequenti seppur distribuiti in modo molto irregolare, non di rado associati a grandine e, più raramente, a trombe d'aria.

Anche in tarda estate o inizio autunno non sono comunque rari in pianura eventi pluviometrici a forte componente convettiva che talvolta possono risultare particolarmente intensi e abbondanti specie in prossimità della zona costiera, dove l'influsso del mare ancora relativamente caldo e l'azione dei venti a scala locale giocano un ruolo essenziale nel favorire lo sviluppo e la persistenza di tali fenomeni intensi. Anche per tali motivi spesso la pianura, ma in particolare la zona più prossima alla costa, dimostra rispetto ad altre aree mediamente più piovose della regione, un grado di concentrazione delle precipitazioni più elevato, ossia a fronte di una cumulata di pioggia annua non molto elevata, i totali annui sono determinati in maggior misura da pochi eventi particolarmente intensi ed abbondanti.

Il mesoclima prealpino

caratterizza l'area prealpina della regione e le parti più settentrionali della fascia pedemontana, a ridosso dei rilievi. L'elemento più caratteristico di tale mesoclima è dato dall'abbondanza delle precipitazioni che presentano valori medi intorno ai 1200–1500 mm annui, con massimi che possono raggiungere anche i 2000 mm circa. Più spiccato vi si fa il carattere equinoziale del regime pluviometrico con massimi pluviometrici in primavera e soprattutto in autunno, (tale andamento è presente anche in pianura seppur in modo più attenuato). In questa zona gli eventi pluviometrici più importanti si registrano solitamente durante la stagione autunnale in concomitanza ai forti flussi perturbati meridionali che impattando con la barriera prealpina favoriscono forti e persistenti precipitazioni che non di rado possono assumere carattere anche alluvionale. Come per il resto della regione, la stagione mediamente più secca è invece l'inverno ma che qui, a differenza invece della pianura, si caratterizza anche per una maggiore serenità del cielo. Durante il periodo estivo in prossimità dei rilievi si attivano invece svariati fenomeni favorevoli alla convezione, il che si traduce in una maggiore nuvolosità rispetto alla pianura e a frequenti precipitazioni in forma di rovesci locali, specie nelle ore pomeridiane.

Sul fronte delle temperature si registrano valori medi annui di poco inferiori a quelli della pianura (12 °C circa) ma la continentalità diviene più rilevante così come rilevanti si fanno gli effetti del rilievo sulle temperature, legati all'estrema variabilità assunta da:

- altitudine (le temperature in genere diminuiscono al crescere della quota);
- giacitura (l'aria più fredda e quindi più pesante tende a raccogliersi a fondovalle);
- esposizione (i pendii esposti a mezzogiorno sono più caldi di quelli esposti a settentrione; i pendii esposti a ovest sono termicamente più favoriti di quelli esposti a est).

Secondo la classificazione climatica di Köppen elaborata per i climi italiani da Pinna in funzione della temperatura (Pinna, 1978), il mesoclima prealpino appartiene in prevalenza al clima temperato fresco o temperato freddo alle quote più alte.

Il mesoclima alpino

interessa le aree montane più interne e settentrionali, ovvero la parte centro-settentrionale della provincia di Belluno (Dolomiti).

Rispetto a quello della fascia prealpina, tale clima si caratterizza per precipitazioni ancora relativamente elevate ma leggermente inferiori e distribuite più uniformemente nel corso dell'anno, con massimi stagionali spesso riferibili a tarda primavera, inizio estate ed autunno. Anche in questo caso l'inverno è mediamente la stagione meno piovosa con precipitazioni spesso a carattere nevoso

anche fino a fondovalle. Durante l'estate, in modo molto simile alle zone prealpine, la presenza dei rilievi favorisce la convezione diurna che porta quindi a frequenti annuvolamenti di tipo cumuliforme con associati locali rovesci, specie nelle ore pomeridiane.

Le temperature invece presentano valori nettamente inferiori rispetto a quelli delle Prealpi, con medie annue di circa 7-8 °C e valori medi mensili che scendono sotto lo zero nei mesi invernali.

Secondo la classificazione climatica di Köppen elaborata per i climi italiani da Pinna in funzione della temperatura (Pinna, 1978), il mesoclima alpino appartiene in prevalenza al clima temperato fresco alle quote più basse e al temperato freddo o al clima freddo alle quote più alte.

Anche in quest'area l'orografia complessa gioca un ruolo chiave nel determinare l'accentuata variabilità spaziale non solo delle temperature ma anche di altre variabili meteorologiche quali le precipitazioni, i venti, l'umidità relativa e la radiazione solare. Il lungo permanere di copertura nevosa, specie alle quote più elevate e nei versanti esposti a nord, si traduce in un prolungamento della fase invernale ed in un conseguente ritardo nell'affermarsi di condizioni primaverili.

1.3 Caratteristiche termo-pluviometriche e di ventosità regionali

Il clima del Veneto, pur rientrando nella tipologia mediterranea, presenta proprie peculiarità dovute principalmente al fatto di trovarsi in una posizione di transizione tra il Mediterraneo e l'Europa centrale e quindi subire varie influenze: l'azione mitigatrice delle acque mediterranee, l'effetto orografico della catena alpina e la continentalità dell'area centro-europea. Il Veneto quindi si può suddividere principalmente in una regione alpina con clima montano di tipo centro-europeo e un'area di pianura con clima continentale caratterizzato da estati calde afose e inverni rigidi. Fanno eccezione due sub-regioni a clima più mite: quella lacustre nei pressi del Lago di Garda, più limitata, e quella litoranea della fascia costiera adriatica.

1.3.1 La precipitazione

La mappa della precipitazione cumulata media annua (Figura 1), valutata considerando i dati del trentennio 1991-2020, convenzionalmente preso come periodo normale, mostra la distribuzione spaziale degli apporti pluviometrici sull'intera Regione.

Vi è una notevole diversità tra gli appena 700 mm annui del basso Polesine, e i 2250 mm delle Prealpi Vicentine.

L'andamento spaziale delle precipitazioni è quindi crescente andando dalla costa e pianura meridionali fino all'alta pianura orientale; si incontra un primo picco sulle Prealpi ed un secondo picco, meno pronunciato, sulle Dolomiti meridionali. È questa la fascia più piovosa in quanto rappresenta il primo ostacolo orografico alle perturbazioni in arrivo da meridione; proseguendo verso le Dolomiti settentrionali gli apporti tendono poi a calare.

Precipitazione, media sul periodo 1991-2020

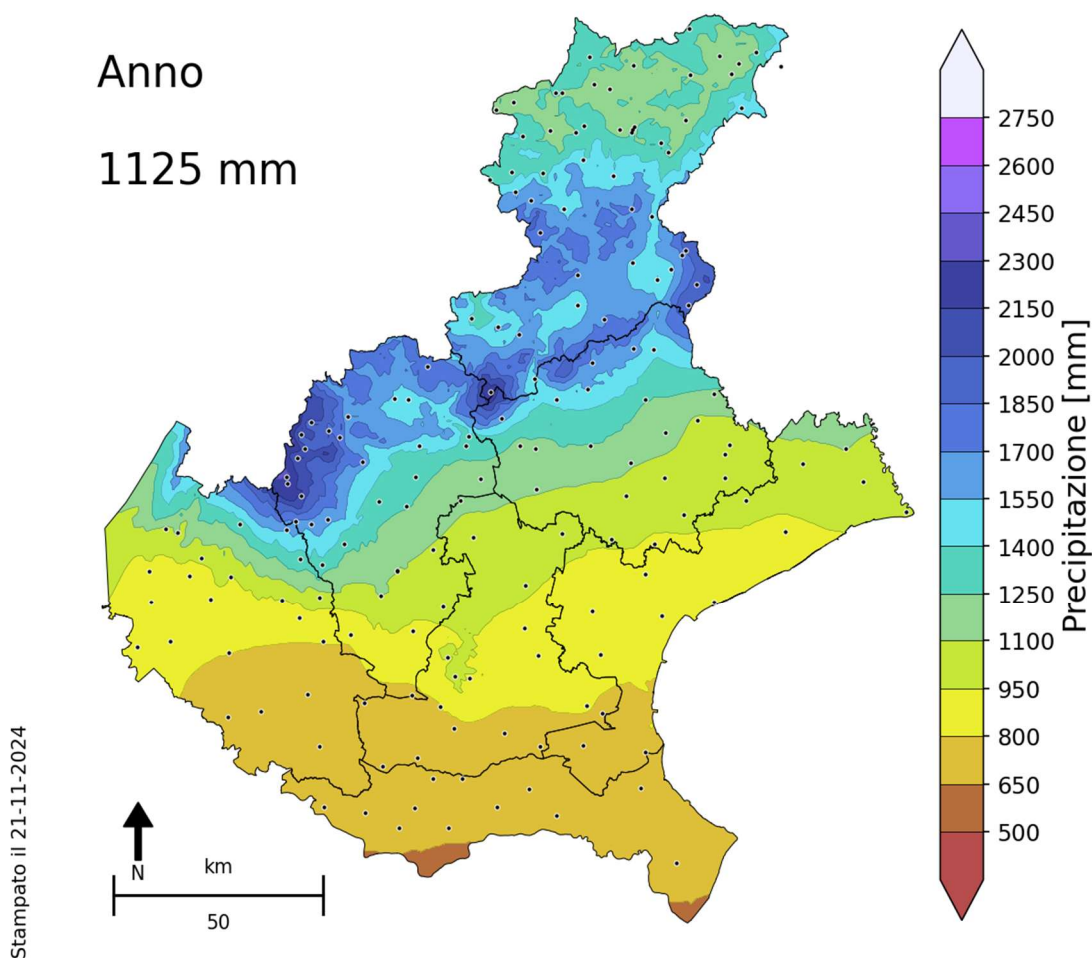


Figura 1: Precipitazione cumulata media annua sul Veneto valutata sul periodo 1991-2020. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, spazializzati annualmente con Universal Kriging e raggruppati sul trentennio.

A livello di stagioni meteorologiche (Figura 2) il regime pluviometrico viene definito da due principali fattori: la penetrazione delle perturbazioni atlantiche in primavera e in autunno e i temporali di origine termoconvettiva in estate.

La stagione invernale nel trentennio di riferimento, dal 1991 al 2020, registra mediamente i minori apporti pluviometrici se confrontata con le altre stagioni. La fascia prealpina si mantiene la più piovosa, con punte oltre i 400 mm, allo stesso modo il Polesine e le Dolomiti settentrionali risultano le fasce meno piovose, con precipitazioni inferiori a 130 mm. Nonostante queste differenze, è possibile notare una certa uniformità nelle diverse fasce climatiche Regionali. Bassa pianura e Dolomiti settentrionali hanno valori appartenenti alla stessa classe, e la stessa cosa si può dire, in larga parte, per Dolomiti meridionali e Prealpi, pur essendo le seconde più piovose delle prime.

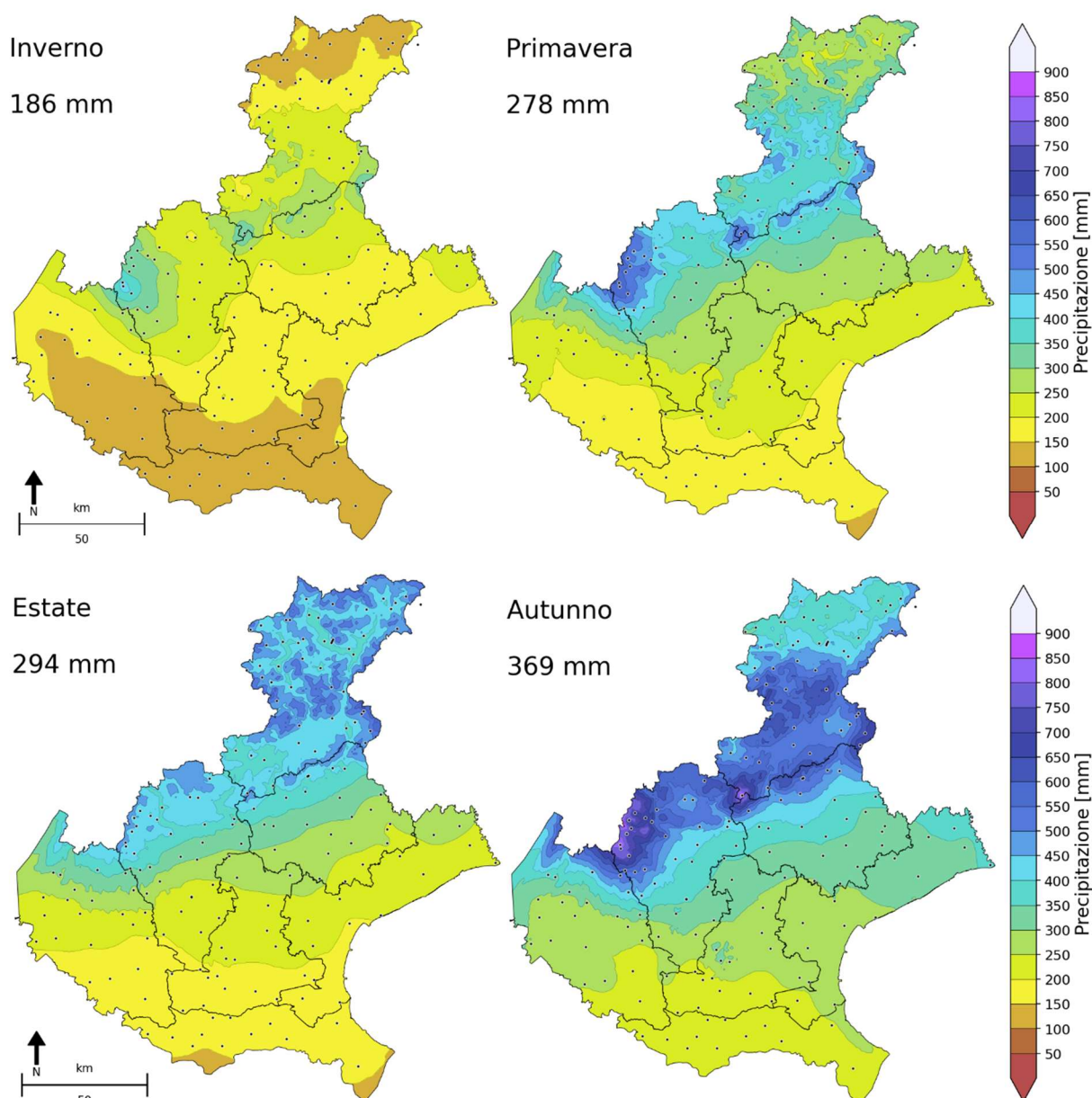


Figura 2: Precipitazione cumulata media stagionale sul Veneto valutata sul trentennio 1991-2020.

La primavera, stagione solitamente interessata dal ritorno delle perturbazioni atlantiche, fa registrare un aumento degli apporti su tutta la regione, più marcato sulla barriera orografica prealpina dove si raggiungono punte attorno ai 570 mm. Guardando alla pianura, si va dai 180 mm della parte più a sud della Regione, ai 320 mm mediamente cumulati nella pedemontana orientale.

La distribuzione delle precipitazioni medie nella stagione estiva deriva dalla prevalenza dei temporali di origine termoconvettiva che, sull'area dolomitica, sono agevolati dall'orografia. Per le Dolomiti settentrionali, in particolare, quella estiva è la stagione con i maggiori apporti pluviometrici e si raggiungono valori superiori ai 470 mm. Ingenti precipitazioni si hanno anche su Dolomiti meridionali e Cansiglio, dove si superano i 500 mm. Solitamente favorita dal transito dei temporali che si originano sui rilievi, l'alta pianura orientale non registra grosse variazioni rispetto al periodo

primaverile. Si riduce, seppur di poco, l'apporto pluviometrico della bassa pianura che tocca dei minimi vicini a 150 mm.

L'autunno si conferma essere la stagione con gli apporti maggiori e con le maggiori differenze tra pianura e Prealpi. Per la prima le precipitazioni mediamente registrate vanno da un minimo di 220 mm, a sud, ad un massimo attorno ai 380 mm sulla pedemontana orientale, valore paragonabile a quanto cumulato sulle Dolomiti settentrionali. Gli apporti maggiori, fino a 800 mm, si raggiungono sulla barriera prealpina.

1.3.2 La temperatura

La mappa della temperatura media annua (Figura 3) sul Veneto è ottenuta considerando i dati del trentennio 1991-2020 delle stazioni automatiche con sensore di temperatura posto a 2 m di altezza dal suolo.

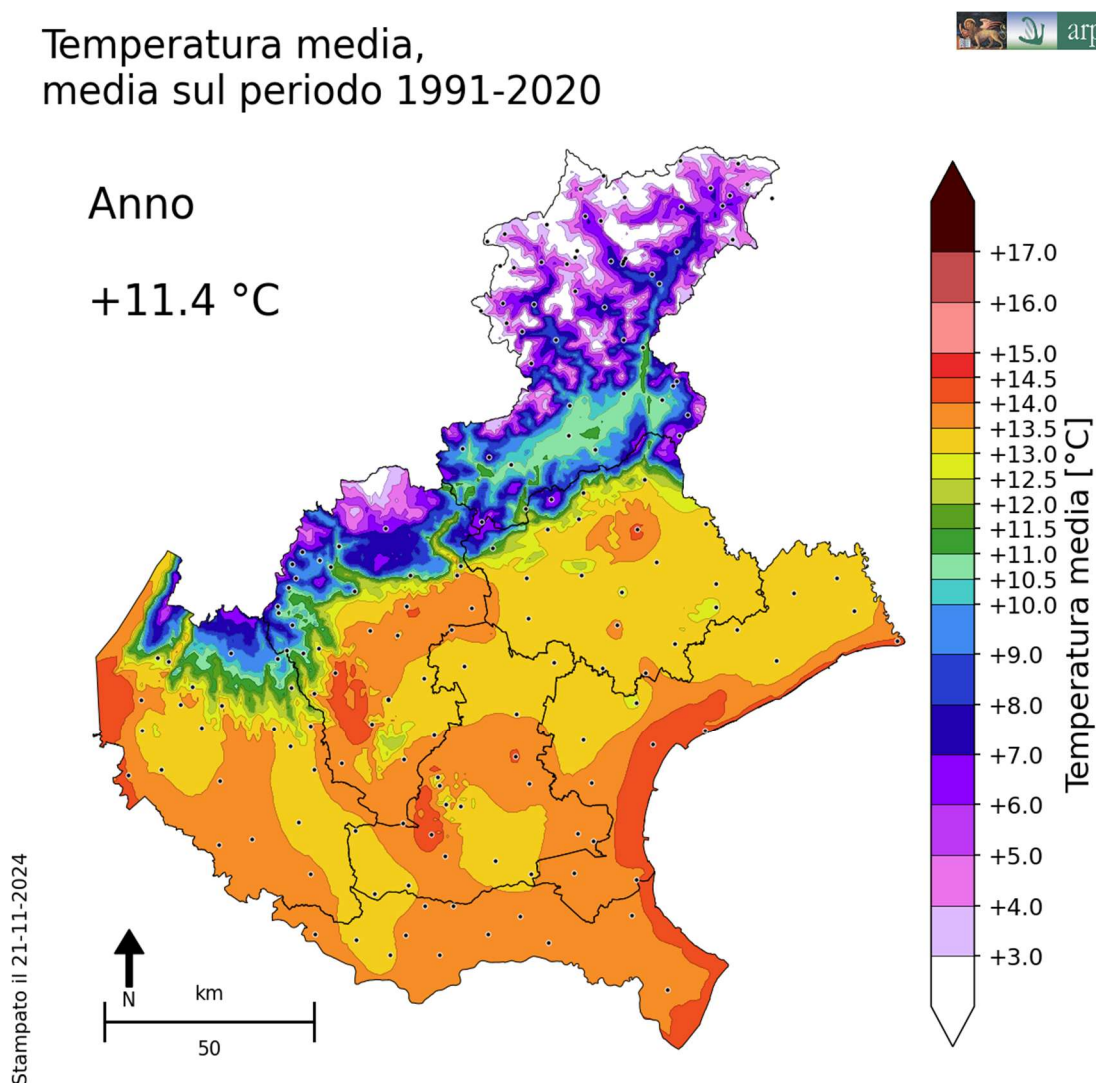


Figura 3: Temperatura media annua sul Veneto valutata sul periodo 1991-2020. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, spazializzati annualmente con Universal Kriging, utilizzando come predittore il valore della quota dato dal modello digitale del terreno, e raggruppati sul trentennio.

Per quanto riguarda i dati di temperatura, sul Veneto si riscontra un trend positivo e statisticamente significativo, superiore al riscaldamento osservabile a livello globale provocato principalmente dall'aumento in atmosfera dei gas ad effetto climalterante, ed in linea con quello delle regioni confinanti, appartenenti all'*hot spot* dell'area mediterranea.

Le normali climatiche per la temperatura riportate in mappa per le diverse zone, non appaiono più, quindi, pienamente rappresentative delle temperature registrate negli ultimi cinque o dieci anni o a quelle attese nel prossimo futuro.

Al netto dell'aumento delle temperature, però, resta comunque valido quanto descritto dalla mappa, che individua tra le aree più calde la laguna con l'area costiera meridionale (attorno a +14.0 °C), la zona del Lago di Garda, la pedemontana orientale e la pianura interna centro-meridionale (poco superiori a +13.5 °C); leggermente più fresca, invece, la pianura orientale (+13.0/13.5 °C); più in quota, la Valbelluna presenta valori medi annui vicini a +10.5/11.0 °C.

Temperatura media,
media sul periodo 1991-2020

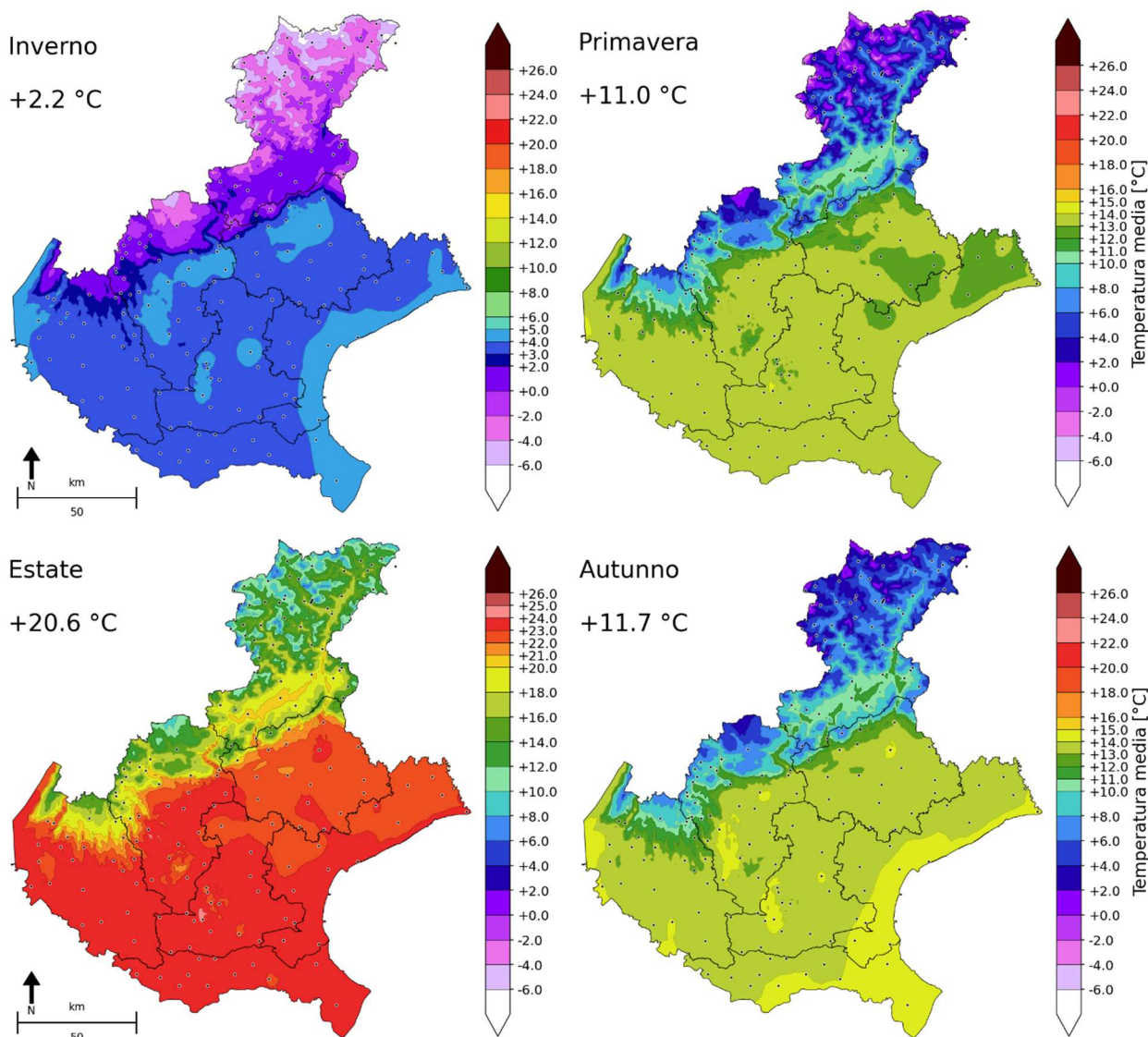


Figura 4: Temperatura media stagionale sul Veneto valutata sul trentennio 1991-2020.

Osservando le mappe della temperatura media suddivisa in base alle stagioni meteorologiche (Figura 4) si nota una forte escursione termica annuale tra estate e inverno, vicina ai 20 °C per la pianura.

Nella stagione invernale, sempre considerando le zone pianeggianti, i valori mediamente più bassi si registrano, oltre che in Valbelluna (+0.5/1.5 °C), sulla pianura occidentale (poco sotto a +3.5 °C), sulle zone di entroterra della pianura orientale (+3.6 °C) e sulle aree interne della pianura centro-meridionale; temperature meno rigide si registrano lungo la fascia costiera (+4.1/4.7 °C), nell'area dei Colli (+4.0/4.3 °C) e su pedemontana orientale e Lago di Garda (+ 4.0/4.8 °C). Considerando sempre la stagione invernale ma osservando la mappa delle temperature minime (Figura 5), mediate sulla stagione e per il trentennio 1991-2020, si intuisce un'analogia distribuzione delle temperature, seppur con qualche differenza.

Temperatura minima, media sul periodo 1991-2020

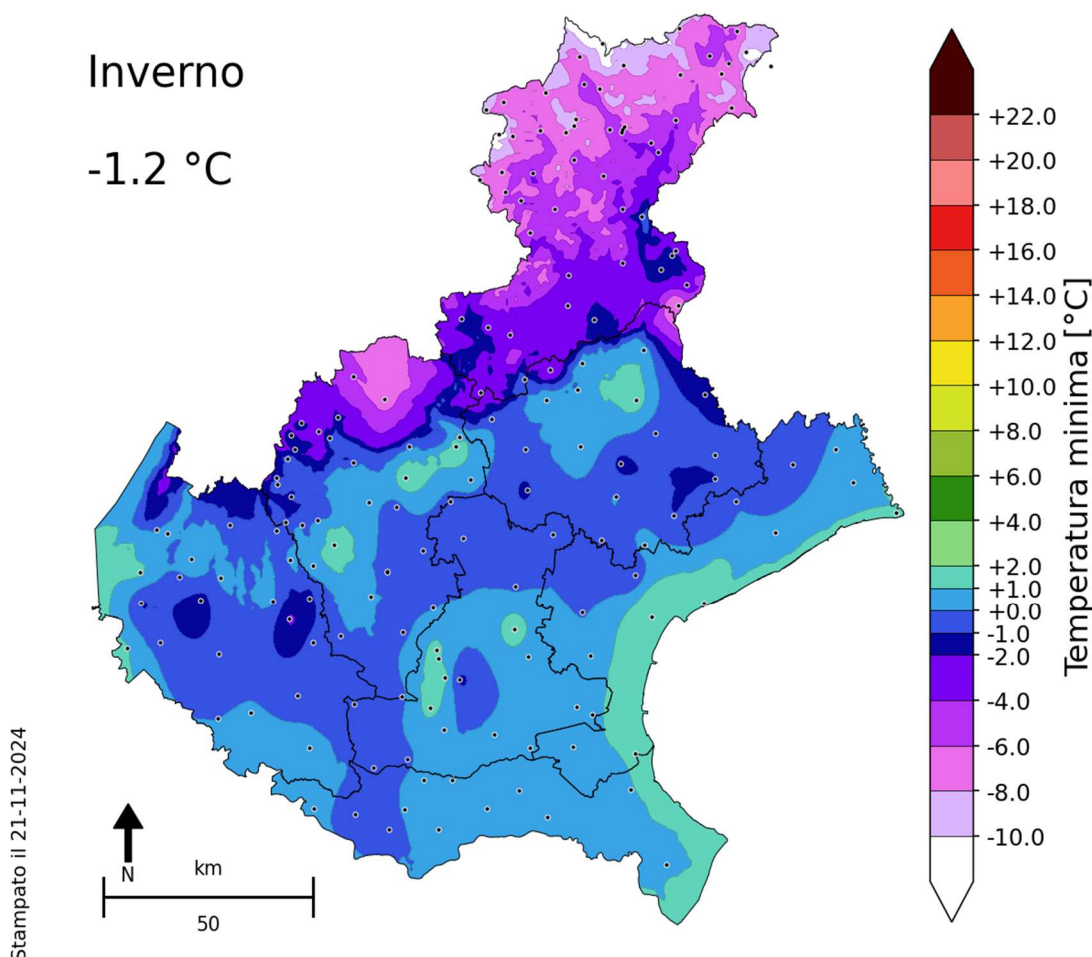


Figura 5: Temperatura minima invernale (dicembre, gennaio e febbraio) mediata stagionalmente sul Veneto e valutata sul periodo 1991-2020.

L'area costiera, la pedemontana orientale, il Lago di Garda ed i Colli restano le aree con le temperature minime mediamente più elevate, attorno o superiori a +0.5 °C; il resto della pianura interna, più fredda, si differenzia in una zona di pianura meridionale e parte di quella centrale con

valori positivi, seppur di poco superiori allo zero, e la restante fascia, comprendente l'alta pianura occidentale e la pianura orientale, che presenta valori di temperatura minima mediamente negativi, di poco inferiori a 0 °C.

Temperatura massima, media sul periodo 1991-2020

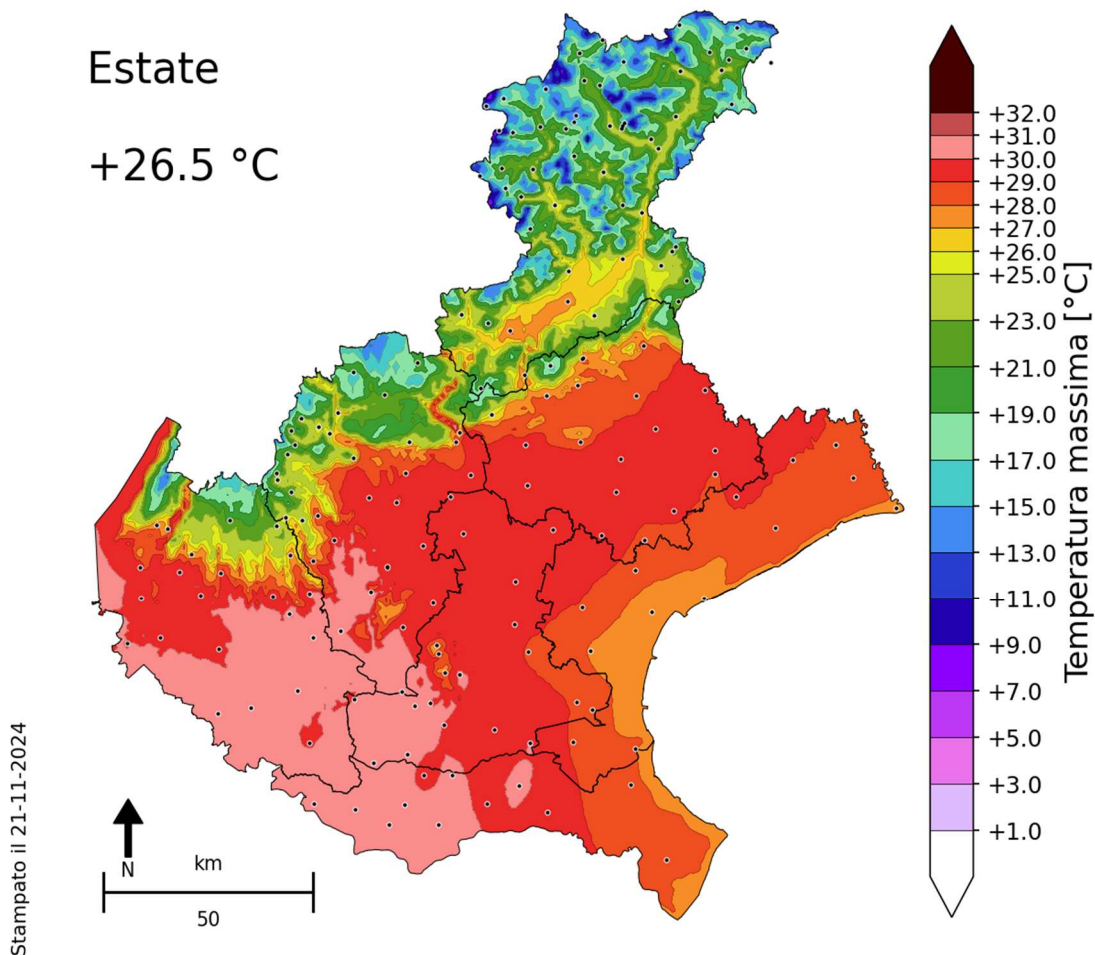


Figura 6: Temperatura massima estiva (giugno, luglio e agosto) mediata stagionalmente sul Veneto e valutata sul periodo 1991-2020.

Durante il trimestre estivo con i mesi di giugno, luglio ed agosto, la mappa della temperatura media trentennale mostra sulla Pianura Veneta una distribuzione differente a quanto si era osservato in inverno: l'area con le temperature più elevate comprende l'intera pianura sud-occidentale e parte di quella centrale (+23.0/24.0 °C); seguono l'area costiera (+23.0/23.7 °C) e la restante parte di pianura centrale (attorno a +23.0 °C); più fresca invece la pianura orientale (+22.5/23.0 °C). Analogamente le temperature massime estive (Figura 6) mediate sul trentennio 1991-2020 segnalano i valori più alti, oltre 30 °C, sulla pianura sud-occidentale; tra 29 e 30 °C sulla pianura centro-orientale e tra 27.5 e 29 °C sulla costa, mitigata dalla presenza del mare.

1.3.3 Intensità e direzione del vento

La mappa dell'intensità media scalare della velocità del vento (Figura 7) è stata calcolata utilizzando i dati degli ultimi 10 anni delle stazioni con sensori posti a 2, 5 o 10 m rispetto al piano campagna.

La scelta di limitare l'analisi agli anni dal 2015 al 2024 è dovuta alla carenza di dati nel passato, in particolare per le misure a 5 e 10 m. Le misure del vento medio campionate a 2 e 5 m dal suolo sono state convertite in valori riferiti a 10 m utilizzando una legge logaritmica e impostando la rugosità al valore adimensionale indicato per la transizione tra prato e terreno agricolo con edifici ed alberi sparsi. Si sono trascurati i dati registrati da sensori posti in prossimità di ostacoli che alterano la misura della velocità del vento.

Velocità media del vento annua Media 2015-2024

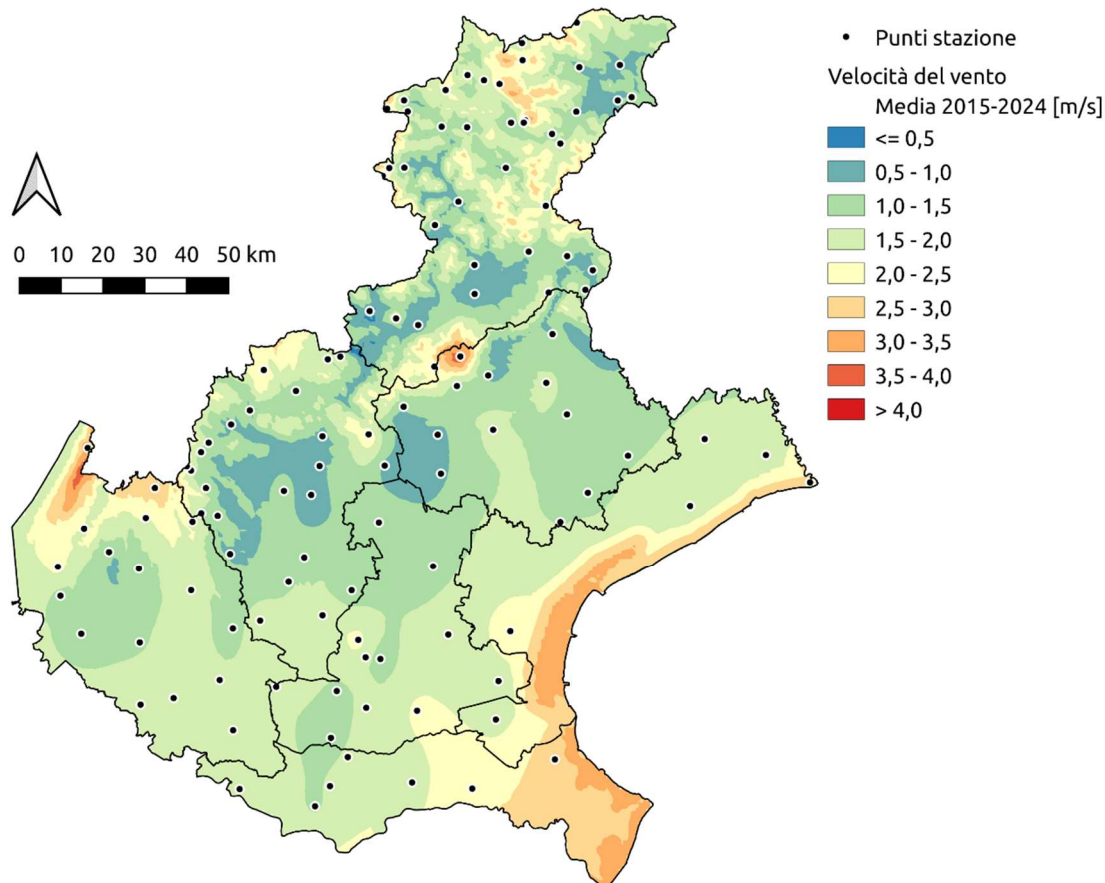


Figura 7: Intensità del vento media scalare annua sul Veneto valutata sul periodo 2015-2024. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, con sensori posti a 2, 5 e 10 m.

I valori più elevati del vento medio annuo si riscontrano sulla costa, sull'entroterra costiero meridionale e sulla pianura sud-occidentale; meno ventilate sono invece la Valbelluna e la pedemontana e pianura orientali, salvo presentare valori più elevati allo sbocco delle valli prealpine. La direzione del vento prevalente proviene da nordest sull'entroterra, dove non vi sono ostacoli orografici nelle vicinanze; proviene dal mare sulla linea costiera se in regime di brezza; e da sudovest sulle stazioni poste in vetta.

A livello stagionale è la primavera il periodo normalmente più ventoso, anche se i valori più elevati sulle vette si raggiungono nel periodo invernale. La stagione meno ventosa è invece quella estiva, in particolare per il settore costiero e montano.

1.4 Peculiarità del clima Veneto

Abbondanti precipitazioni della fascia prealpina

La distribuzione delle precipitazioni nel territorio Veneto è in gran parte determinata dalla particolare configurazione orografica che influenza il regime delle precipitazioni, anche per quanto riguarda la loro intensità.

Dal punto di vista meteorologico la situazione che dà origine agli eventi di maggiore precipitazione è la presenza, a scala sinottica, di un fronte di origine atlantica che, ostacolato dall'arco alpino, rallenta nella sua parte settentrionale, mentre quella meridionale continua ad avanzare dando origine ad una ciclogenesi sul golfo Ligure.

La regione in questi casi è di norma investita da correnti umide a componente meridionale o sud-orientale che, incontrando i rilievi montuosi, sono costrette a sollevarsi e nella maggior parte dei casi ad originare precipitazioni più intense nella zona prealpina, specie in quella vicentina dove il vento si incanala a causa della particolare disposizione delle vallate. In pianura le precipitazioni sono meno intense o addirittura assenti.

Nebbie e inversione termica durante l'inverno

La nebbia è un fenomeno tipico della pianura Padano-Veneta soprattutto durante il semestre freddo da ottobre a marzo. Le cause del fenomeno sono da ricondurre alla particolare configurazione geografica, al grado di umidità dei bassi strati e alle tipiche configurazioni bariche su scala sinottica. Le situazioni anticicloniche, tipiche del periodo invernale e caratterizzate in genere da cielo sereno e da debole circolazione, favoriscono un intenso irraggiamento notturno accompagnato dalla formazione di inversioni termiche con base al suolo sotto le quali tende a ristagnare e ad accumularsi progressivamente il vapore acqueo ed eventuali inquinanti atmosferici.

L'abbondanza di acque superficiali, le condizioni di ristagno dell'aria ed il raffreddamento notturno favoriscono il raggiungimento di condizioni di saturazione che portano alla formazione di goccioline aero disperse nei bassi strati ed alla conseguente diminuzione della visibilità e aumento della concentrazione di inquinanti.

La notevole durata della notte nel periodo invernale favorisce la formazione della nebbia (visibilità inferiore a 1 km) che può estendersi con spessori variabili da qualche decina a qualche centinaia di metri di altezza. Tale strato viene eroso per l'evaporazione indotta dalla radiazione solare diurna e spesso la nebbia, specie se sottile, scompare nelle ore centrali della giornata. Non mancano tuttavia occasioni in cui la nebbia persiste per l'intera giornata, ed anzi la notevole persistenza è una delle caratteristiche peculiari dell'area Padano Veneta.

Anche i fondovalle montani appaiono interessati dal fenomeno, che talvolta viene accentuato dall'inversione termica dovuta all'accumulo di aria più fredda e pesante al fondo delle vallate, ma la persistenza per l'intera giornata è fenomeno abbastanza raro.

Elevate temperature estive e afa

Le barriere naturali dell'arco alpino a nord e a ovest e della catena appenninica a sud difendono in generale la pianura dai venti della circolazione generale e nelle aree di pianura più continentali si registra una predominanza della calma di vento e dei venti deboli. Se nel periodo invernale la debolezza dei venti e il grado di umidità delle masse d'aria presenti nei bassi strati delle aree di pianura favoriscono la formazione della nebbia e l'aumento della concentrazione di sostanze

inquinanti nei bassi strati dell'atmosfera, nel periodo estivo favoriscono condizioni di afa (atmosfera calda e umida) e di conseguente disagio fisico.

L'aumento delle temperature e dell'insolazione favorisce inoltre la formazione di inquinanti secondari quali l'ozono.

Attività temporalesca estiva, grandine e trombe d'aria

La pianura veneta è particolarmente umida e in grado di umidificare abbondantemente le masse d'aria che transitano in essa. Nel periodo estivo, inoltre, i bassi strati ricevono un notevole riscaldamento da parte del suolo surriscaldato, a sua volta, dalla radiazione solare, e diventano instabili dando spesso luogo a celle temporalesche.

L'attività temporalesca più intensa viene osservata quando masse d'aria fredda irrompono da nord al di sopra delle Alpi e incontrando l'aria calda e umida della Pianura Padana accentuano l'instabilità dell'atmosfera, sviluppando celle temporalesche di notevole spessore e dando luogo a temporali accompagnati spesso da grandine.

Con i moti verticali connessi ai forti temporali e con l'azione di richiamo dell'aria dalla regione circostante la nube verso la base della nube stessa, possono prodursi fenomeni di tipo vorticoso come le trombe d'aria, che non sono da considerarsi rare nella nostra pianura. Queste ultime sono caratterizzate in generale da un'azione ristretta, ma risultano di notevole importanza per la loro violenza.

1.5 I trend climatici sul Veneto

Per un'opportuna pianificazione degli interventi sul territorio e in diversi settori dell'economia regionale è necessario declinare a scala regionale e locale le informazioni relative al cambiamento climatico in corso a scala globale, studiando gli andamenti meteo-climatici in atto ed i potenziali rischi futuri ad essi correlati.

Per l'individuazione dell'andamento climatico sul territorio diventa importante disporre di serie storiche di lunghezza non inferiore a 30 anni che vengono trattate con analisi statistiche di interpolazione lineare per mostrare l'entità e la significatività statistica dei trend in atto e attesi nell'immediato futuro, e analisi di discontinuità per mettere in evidenza i bruschi cambiamenti e le diverse fasi climatiche omogenee.

Lo studio di discontinuità effettuato sui dati di temperatura delle stazioni meccaniche dell'ex Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque di Venezia, che coprono cinquanta anni dal secondo dopoguerra ai primi anni del 2000, ha evidenziato un punto di rottura intorno alla fine degli anni '80 che separa un primo periodo di temperature pressoché stabili, ed un secondo periodo di graduale crescita delle temperature.

I dati di temperatura delle stazioni automatiche di ARPAV, che hanno affiancato e sostituito i dati delle stazioni meccaniche, confermano il trend di crescita che viene stimato di +0.65 °C per decennio dal 1995 al 2024. Trend maggiore ai +0.40 °C per decennio stimati, sullo stesso periodo, dal NOAA per le terre emerse a livello globale.

Temperatura media annua Trend decennale nel periodo 1995-2024

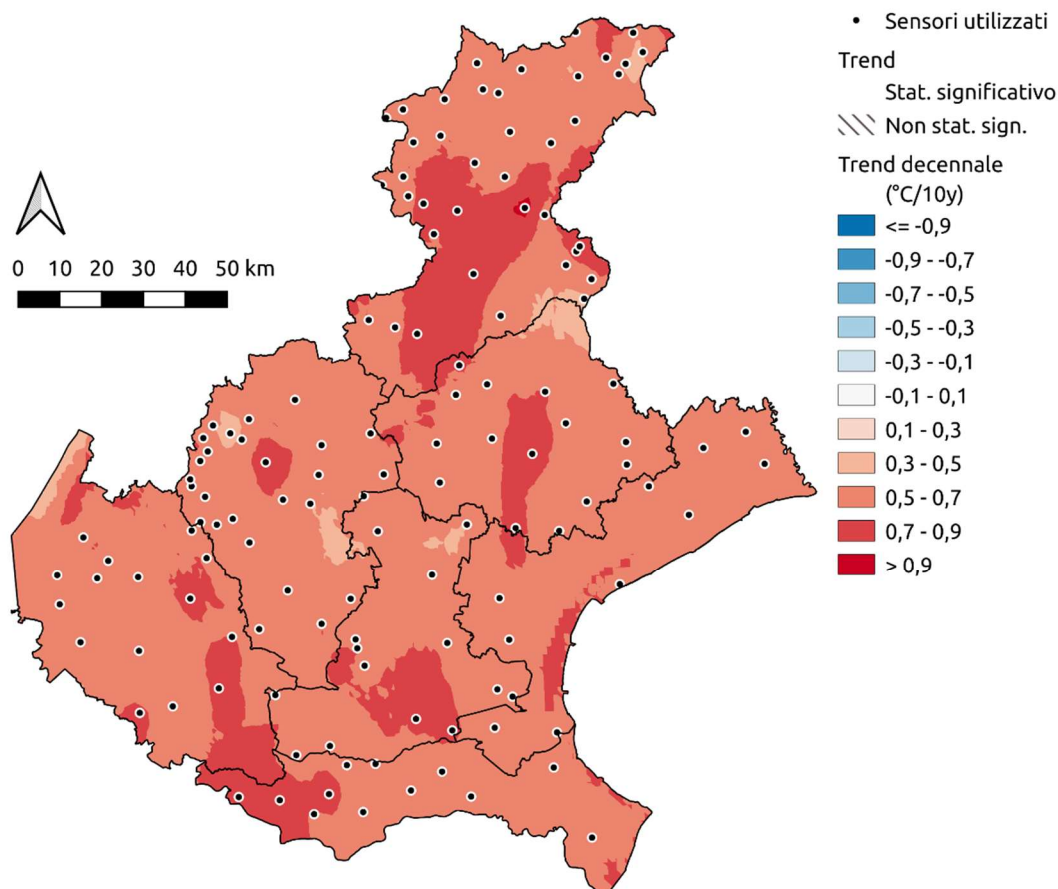


Figura 8: Trend decennale della temperatura media annua in Veneto, valutato dal 1995 al 2024.

1.5.1 Trend della temperatura media

La mappa in Figura 8 mostra la distribuzione spaziale sul Veneto del trend delle temperature medie annue, valutato dal 1995 al 2024. La mappa è stata ottenuta valutando il trend lineare per ogni punto di griglia, a partire dalle mappe annuali della temperatura media. Per il calcolo del trend si è adottato lo stimatore di Theil-Sen, metodo più robusto rispetto alla regressione lineare; la significatività statistica del trend viene poi valutata con il test di Mann-Kendall.

In Veneto il trend trentennale di crescita della temperatura media annua è grossomodo omogeneo su tutta la Regione, vale mediamente $+0.65$ °C per decennio, ed è statisticamente significativo per la totalità delle diverse aree del nostro territorio. Il grafico (Figura 9) che esplicita l'andamento temporale della temperatura media, aggregato a livello regionale, mostra chiaramente come il trend sia effettivamente supportato da un continuo aumento delle temperature, seppur con la presenza di variabilità interannuale.

Temperatura media in Veneto

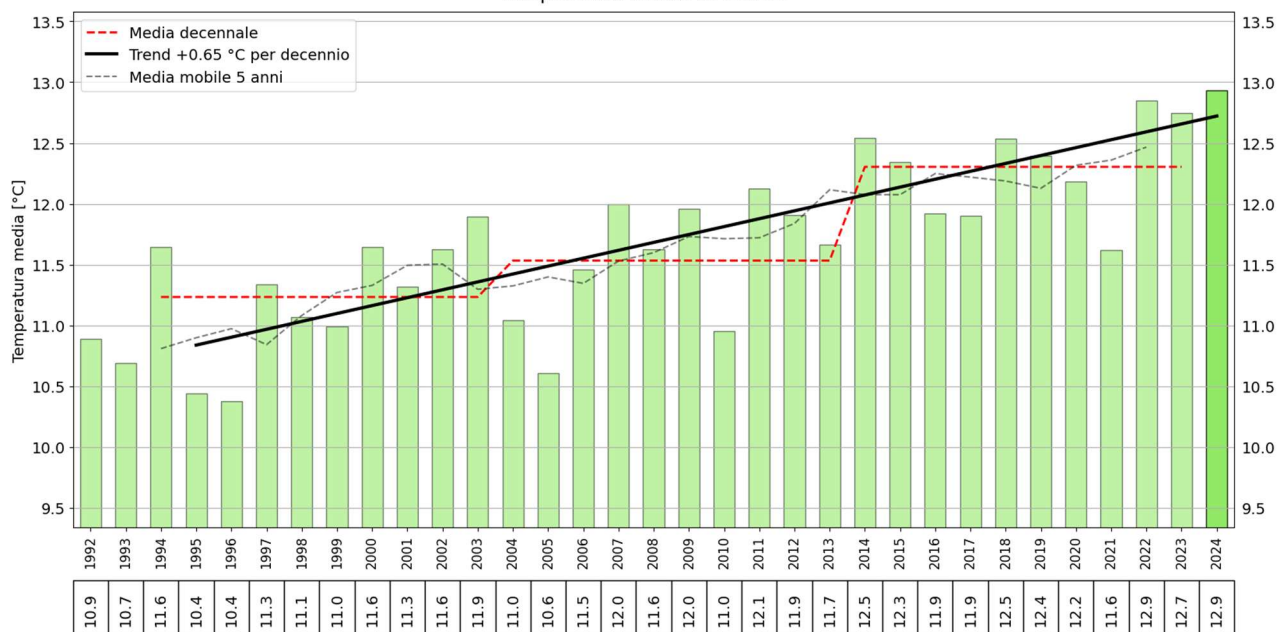


Figura 9: Andamento della temperatura media annua in Veneto dal 1992 al 2024. La linea nera spessa individua il trend dell'ultimo trentennio, quella tratteggiata la media mobile quinquennale e la linea rossa la media decennale.

Ampliando la medesima analisi anche alla scala stagionale si ottengono le mappe di trend come riportate in Figura 10. L'aumento più importante e statisticamente significativo si verifica in estate (+0.83 °C per decennio), seguito a ruota da inverno e autunno con rispettivamente +0.73 °C e +0.66 °C per decennio.

Minore e non statisticamente significativo è invece il trend della primavera, che comunque registra un aumento delle temperature di +0.31 °C per decennio.

I trend sono omogenei su tutta la Regione.

Temperatura media stagionale
Trend decennale e significatività statistica 1996-2025

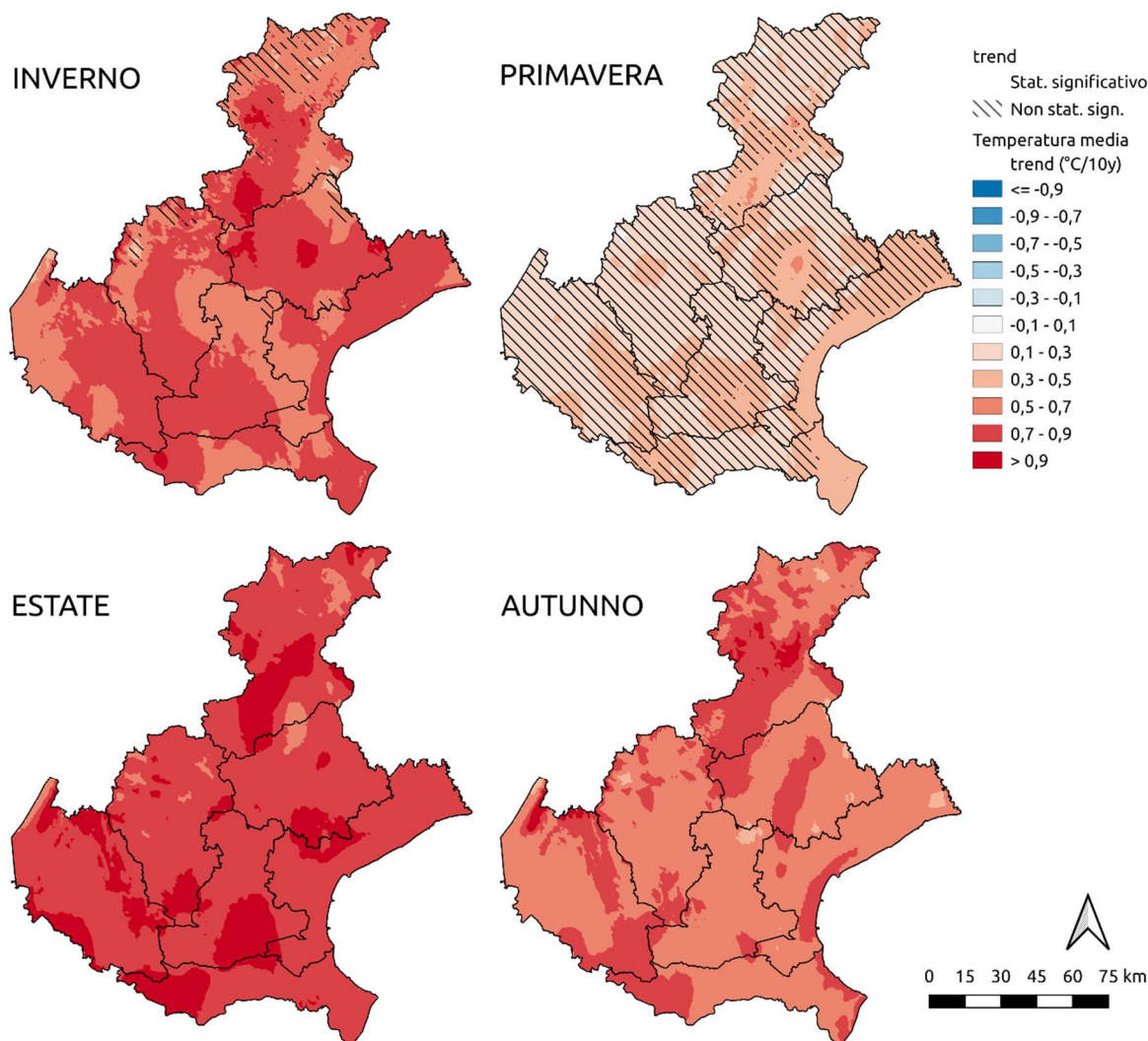
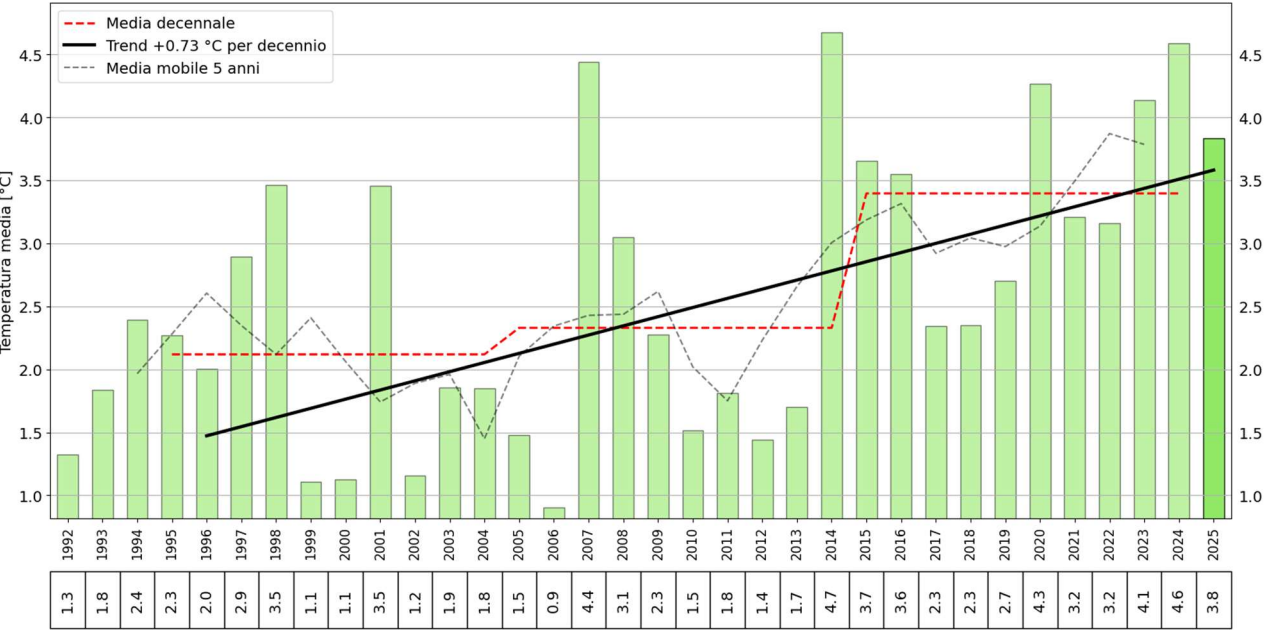


Figura 10: Trend decennale della temperatura media stagionale in Veneto, valutato dal 1996 al 2025. Le aree ombreggiate indicano presenza di trend non statisticamente significativo.

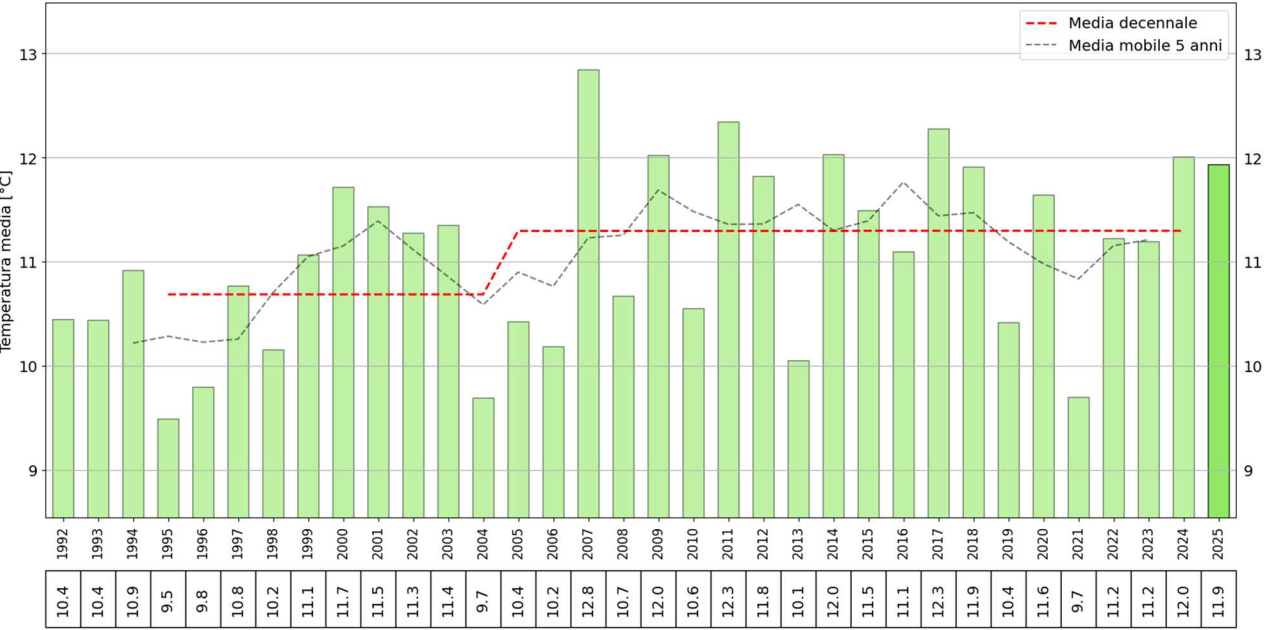
I grafici a barre riportati in Figura 11 per ogni stagione meteorologica dettagliano l'andamento della temperatura media aggregata a livello Regionale.

I valori di estate ed autunno seguono fedelmente il trend lineare, pur con variazioni interannuali; le medie decennali delle temperature primaverili, invece, mostrano un leggero aumento, pur senza evidenziare un trend statisticamente significativo; il grafico delle temperature invernali, nell'ultimo decennio, mostra un salto di oltre +1.0 °C rispetto ai due decenni precedenti, mediamente in linea tra di loro.

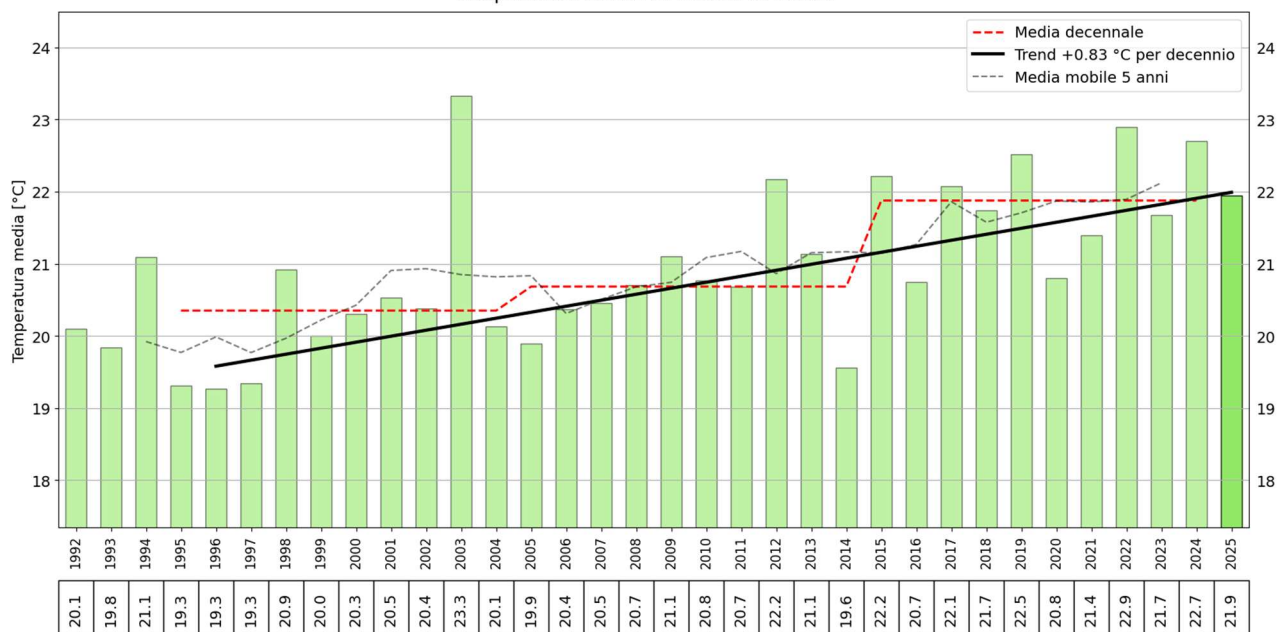
Temperatura media in Veneto in inverno



Temperatura media in Veneto in primavera



Temperatura media in Veneto in estate



Temperatura media in Veneto in autunno

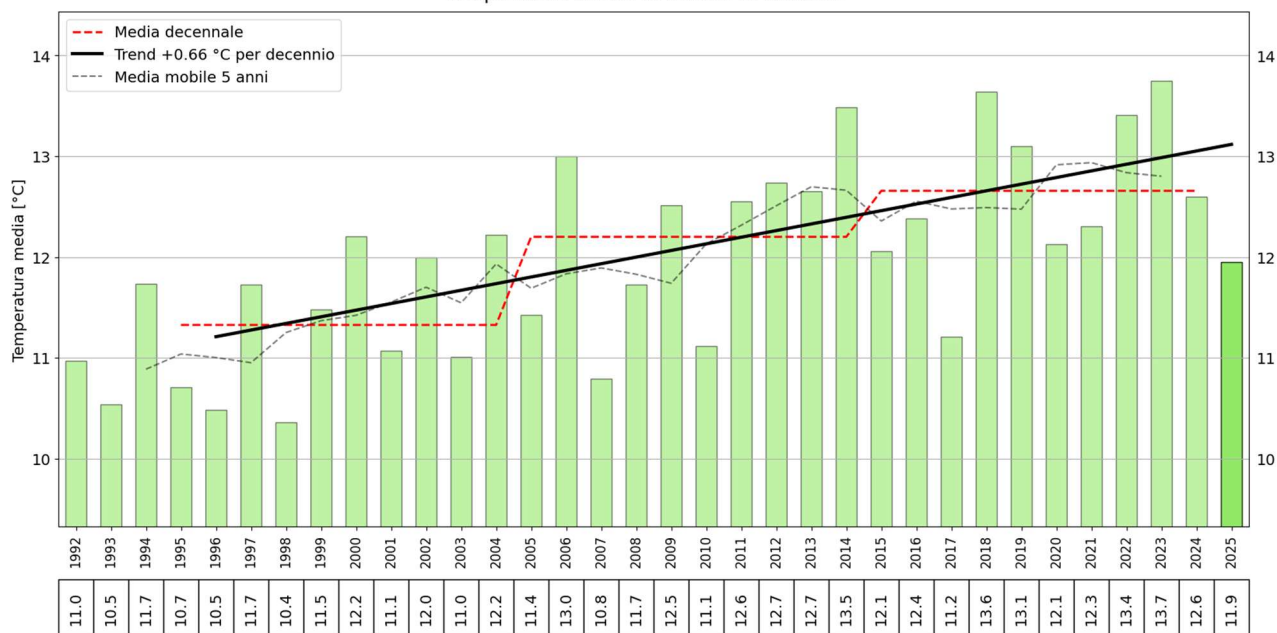


Figura 11: Andamento della temperatura media stagionale in Veneto dal 1992 al 2025. La linea nera spessa individua il trend, quella tratteggiata la media mobile quinquennale e la linea rossa la media decennale.

1.5.2 Andamento della precipitazione cumulata

Passando dalle temperature alle precipitazioni non si trovano per quest’ultime dei trend statisticamente significativi. Le cumulate di precipitazione, mediate a scala regionale, sia a livello annuo che a livello stagionale (Figura 12 e Figura 13a) non hanno fatto registrare variazioni di rilievo nell’ultimo trentennio. Anche estendendo l’analisi alla seconda metà del secolo scorso, grazie ai dati delle stazioni meccaniche dell’ex Ufficio Idrografico, non è possibile individuare trend significativi.

Si riportano di seguito i grafici annuali delle cumulate medie regionali, che evidenziano l’ultimo anno disponibile confrontandolo con la media decennale e la media mobile quinquennale.

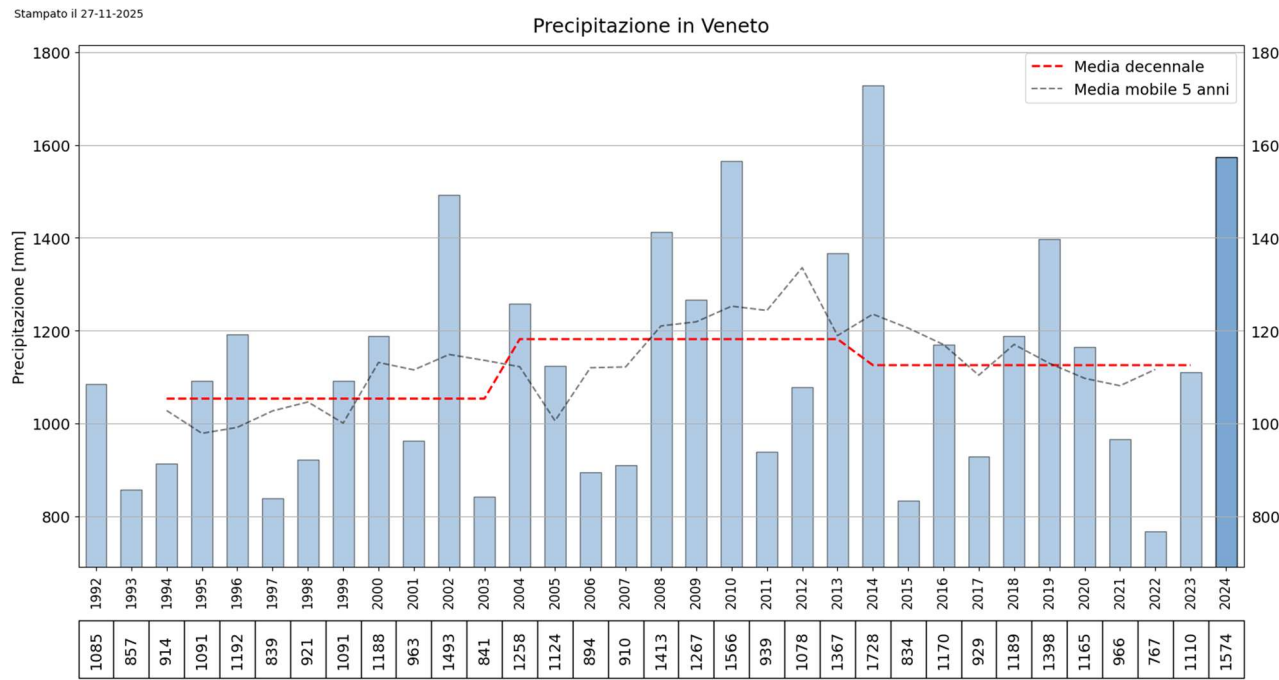
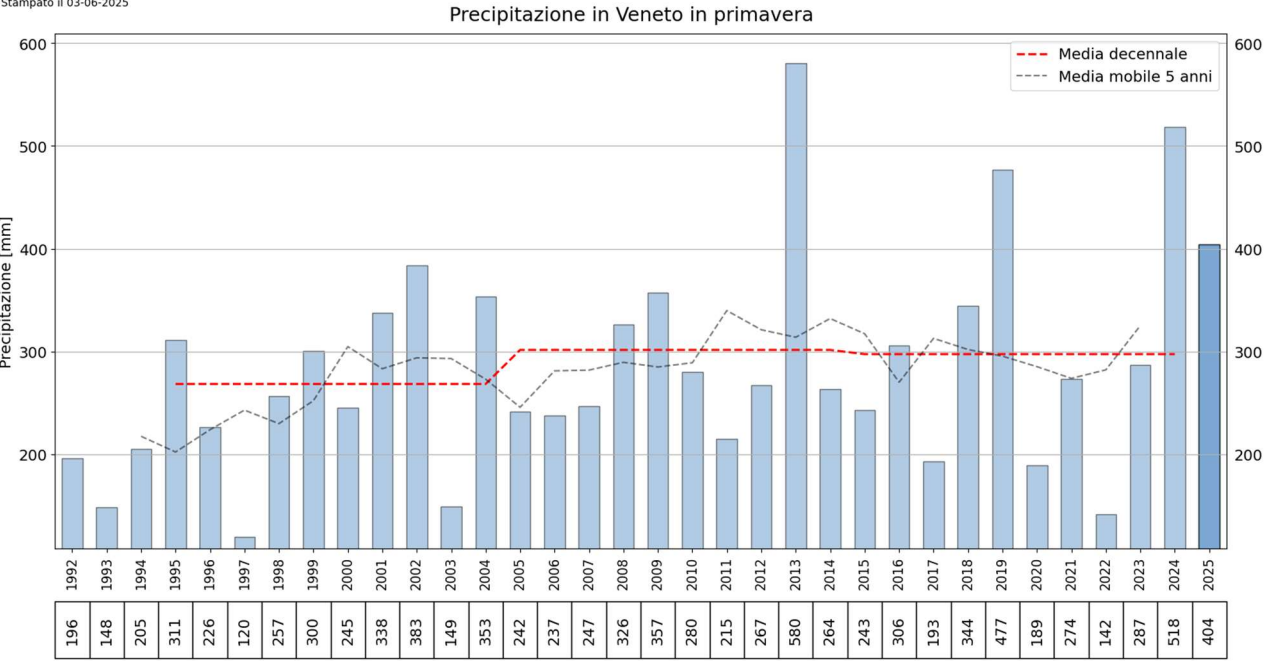
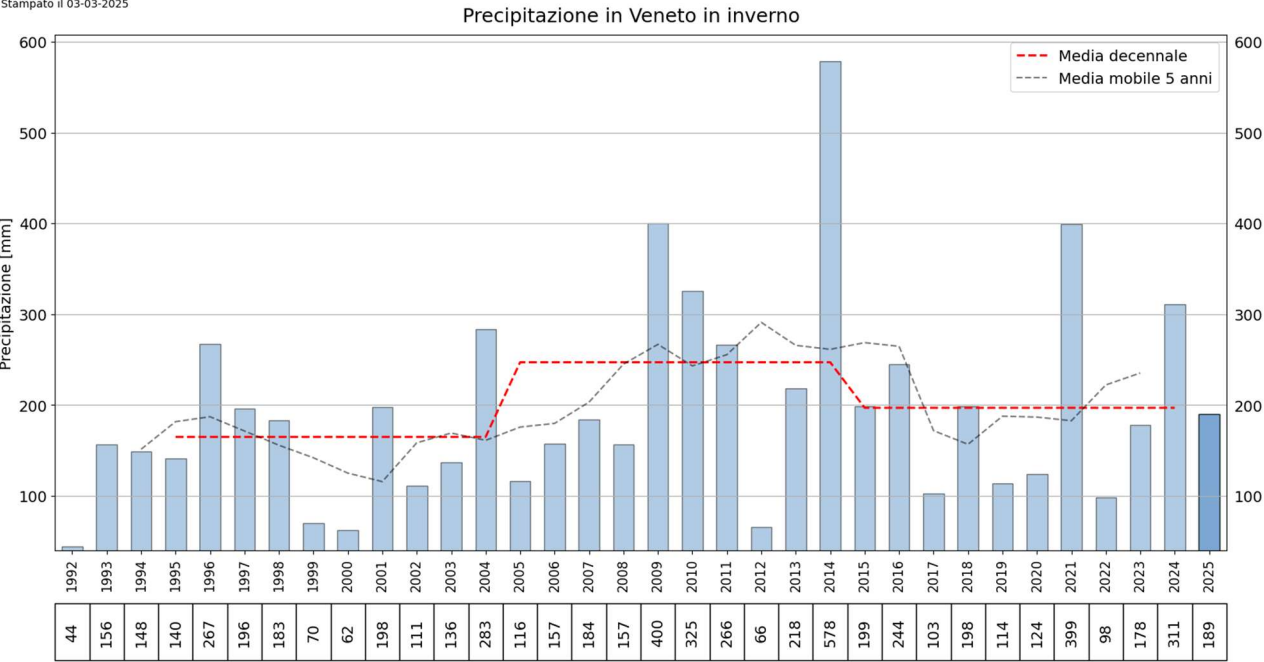
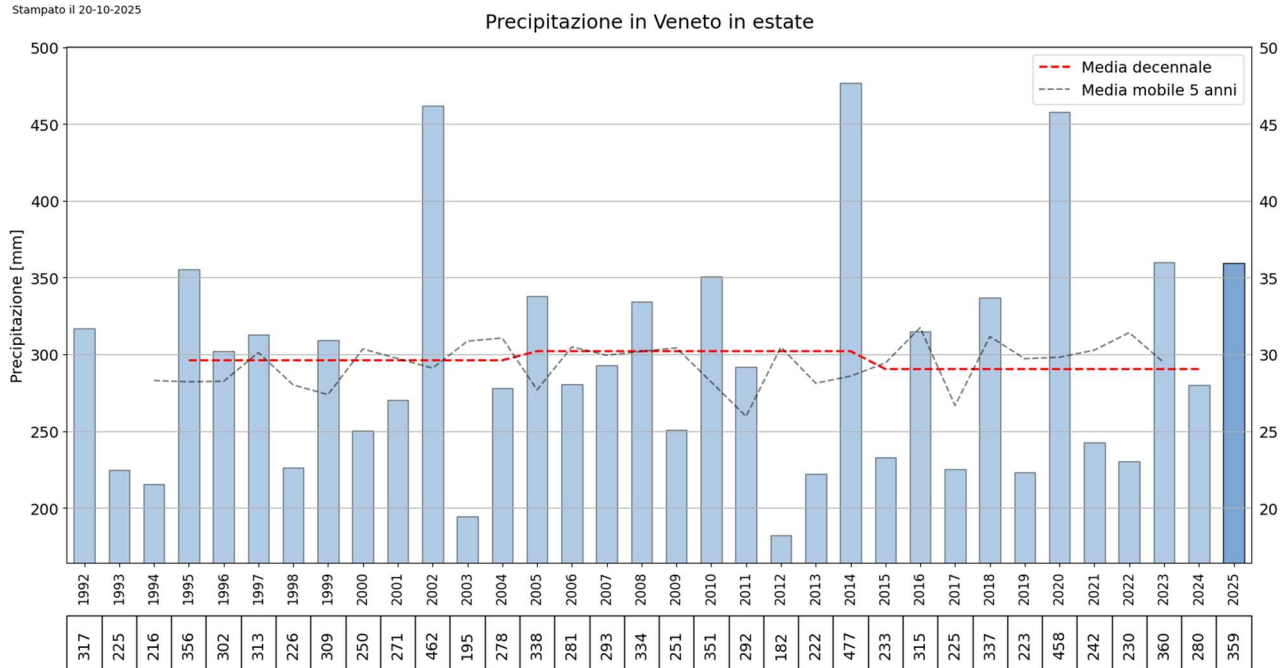


Figura 12: Andamento della precipitazione cumulata media annua in Veneto dal 1992 al 2024. La linea nera spessa individua il trend e quella tratteggiata la media mobile quinquennale.



Stampato il 20-10-2025



Stampato il 01-12-2025

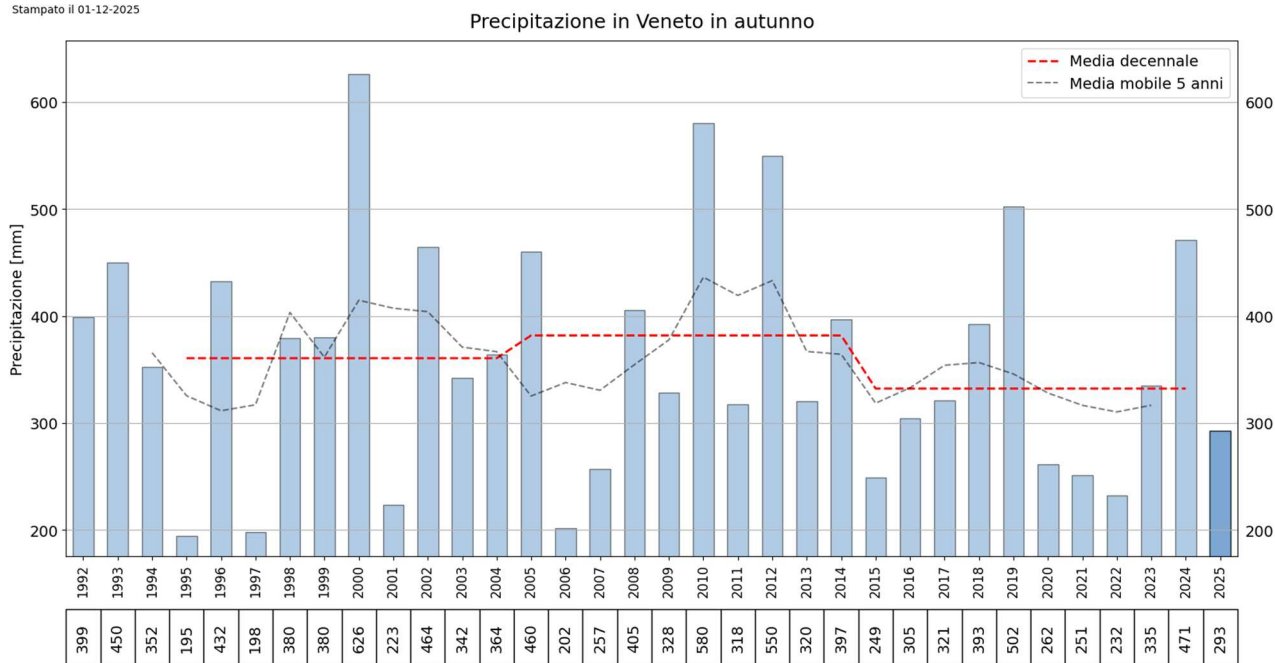


Figura 13a: Andamento della precipitazione cumulata media stagionale in Veneto dal 1992 al 2025. La linea nera spessa individua il trend e quella tratteggiata la media mobile quinquennale.

A fronte di un debole segnale sull'andamento delle precipitazioni cumulate, appare invece una spiccata variabilità interannuale che può essere evidenziata dalla deviazione standard valutata su decennio mobile. Questa risulta in aumento con un trend statisticamente significativo sia annualmente che per le stagioni meteorologiche inverno, primavera ed estate, mentre per l'autunno risulta in diminuzione ma sempre con trend statisticamente significativo. Nell'ultimo trentennio quindi vi è una crescente irregolarità negli apporti pluviometrici, che pone non poche sfide per la gestione della risorsa idrica e per la protezione del territorio.



Figura 13b: Andamento della deviazione standard delle precipitazioni, calcolata con media mobile decennale sui dati di pioggia cumulata a livello annuale e stagionale. La linea rossa individua il trend statisticamente significativo.

1.5.3 Anomalie dell'ultimo decennio rispetto al periodo 1991-2020

Per meglio indagare l'entità e la distribuzione spaziale del cambiamento in atto, si pongono a confronto le variazioni di temperatura e precipitazione avvenute nell'ultimo decennio rispetto ai valori mediamente registrati durante il trentennio normale, dal 1991 al 2020. Vengono appaiate a livello annuale (Figura 14) e stagionale (Figura 15) le differenze assolute per la temperatura e percentuali per la precipitazione.

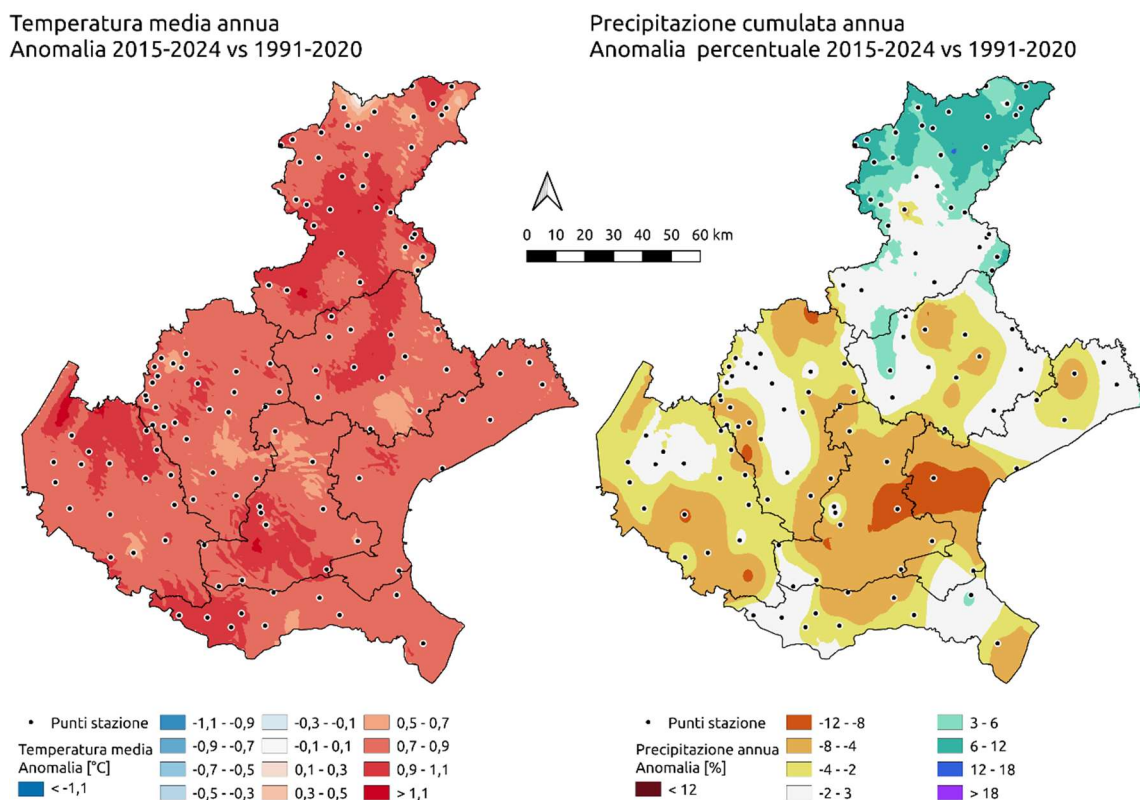


Figura 14: Differenza di temperatura media e precipitazione cumulata annue per l'ultimo decennio rispetto alla media del trentennio 1991-2020.

Questa analisi evidenzia un forte aumento delle temperature medie annue che in media vale $+0.78^{\circ}\text{C}$ ed è generalizzato su tutta la Regione. Anche a livello stagionale si registra nell'ultimo decennio un aumento delle temperature medie su tutta la Regione: Le estati e gli inverni dell'ultimo decennio 2016-2025 hanno mediamente registrato un'anomalia positiva superiore ad 1°C rispetto al periodo normale 1991-2020 (rispettivamente $+1.08^{\circ}\text{C}$ e $+1.04^{\circ}\text{C}$); l'autunno ha una anomalia di $+0.83^{\circ}\text{C}$ rispetto al trentennio 1991-2020, sotto $+1^{\circ}\text{C}$ ma comunque molto rilevante; da ultimo la primavera è la stagione che registra l'anomalia minore, tuttavia positiva e vale $+0.30^{\circ}\text{C}$.

Guardando alle precipitazioni, le anomalie dell'ultimo decennio non sono omogenee su tutta la Regione, anzi vi sono differenze significative nella loro distribuzione spaziale. L'intero anno evidenzia un deficit attorno al -8% sulla pianura centrale ed un surplus vicino al $+10\%$ sulle Dolomiti settentrionali.

Le singole stagioni mostrano comportamenti differenti tra di loro: l'inverno ha visto nell'ultimo decennio un aumento delle precipitazioni in particolare sulle Dolomiti oltre che sulle Prealpi, mediamente del +16 % ed una diminuzione sulla pianura centrale vicina al -10 %. Complessivamente la stagione invernale nel decennio 2016-2025 è risultata di un +5 % più piovosa rispetto alla media del trentennio 1991-2020; la primavera ha segnato un più marcato aumento delle precipitazioni, +13 % in media sulla Regione, con valori più vicini alla norma sulle aree occidentali e anomalie maggiori su quelle orientali; la stagione estiva risulta globalmente in media ma con delle differenze spaziali tra la pianura meridionale, con deficit attorno al -8 %, e le Dolomiti settentrionali che registrano una anomalia positiva. Aumenta quindi ancora il divario tra la già molto piovosa area dolomitica e la già più asciutta pianura; l'autunno è la stagione che più si distacca dalla normale 1991-2020, con un deficit pluviometrico su tutta la Regione che vale mediamente -8 %.

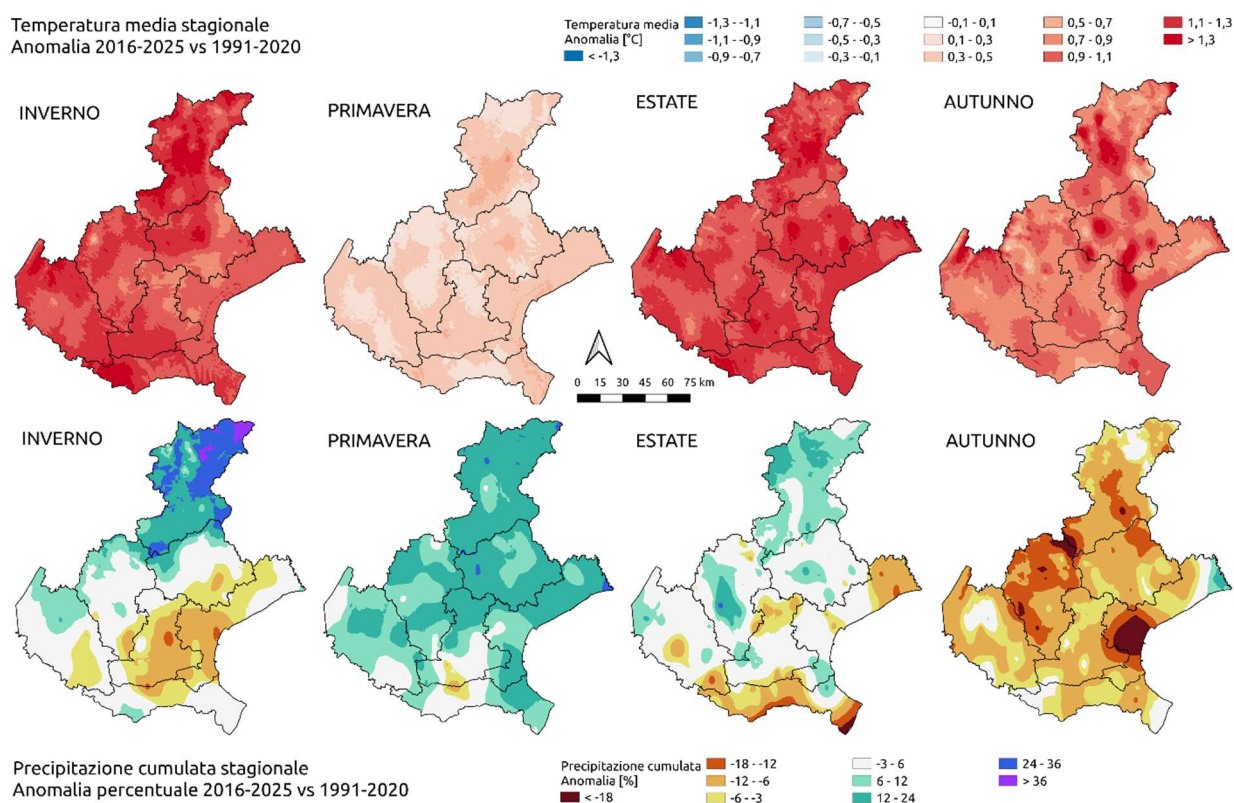


Figura 15: Differenza di temperatura media e precipitazione cumulata stagionali per l'ultimo decennio 2016-2025 rispetto alla media del trentennio 1991-2020.

Riassumendo, i segnali principali a livello annuale e stagionale emersi dal confronto dell'ultimo decennio con il trentennio 1991-2020 mostrano: anni mediamente molto più caldi e con un aumento delle precipitazioni più marcato sulle aree montuose; inverni molto più caldi su tutta la Regione e particolarmente piovosi sulle aree montane, più asciutti su pianura centrale; primavere di poco più calde ma più piovose su tutta la Regione; estati molto più calde, con un lieve aumento delle piogge sulle zone montuose ed una parallela diminuzione sulla pianura meridionale; infine mesi autunnali molto più caldi e con un generalizzato calo delle precipitazioni.

2. Proiezioni regionali climatiche nel Nord-Est Italia

2.1 Sommario

Questo studio ha analizzato un ensemble di simulazioni di modelli climatici regionali (RCM) EURO-CORDEX ad alta risoluzione (0.11°) dello scenario a basse emissioni RCP2.6 e alte emissioni RCP8.5 per l'area del Nord-Est Italia coprendo il 21° secolo. Ha considerato le anomalie stagionali di temperatura, precipitazione, ondate di calore, giorni caldi, notti tropicali, precipitazioni intense, periodi secchi e giorni di neve.

Sono stati selezionati tre trentenni: un periodo di riferimento (dal 1976 al 2005), futuro vicino (2021-2050) e futuro lontano (2071-2100). I risultati mostrano la grande differenza tra lo scenario a basse emissioni e quello ad alte emissioni per il cambiamento climatico nel Nord-Est Italia. Nel primo caso il cambiamento di temperatura e precipitazione tende a fermarsi nella seconda parte del 21° secolo. Nel secondo caso il cambiamento continua lungo tutto il secolo con un sostanziale riscaldamento ($+5^\circ\text{C}$ in estate, $+4^\circ\text{C}$ in inverno), ci si aspetta un aumento della precipitazione in inverno (fino a $+35\%$ nelle aree alpine) e una diminuzione in estate (fino a -30% in pianura) nel futuro lontano.

Il riscaldamento è maggiore nelle zone montuose e aree alpine rispetto alle zone costiere e pianeggianti. Nelle aree montane nel 2071-2100 con RCP8.5 c'è un sostanziale aumento nella durata delle ondate di calore ($+40$ giorni/anno), un aumento delle precipitazioni intense (fino a $+120\%$), una diminuzione dei giorni con neve nuova (-35 giorni/anno).

Sia le aree costiere che di pianura presentano un aumento del numero massimo di giorni consecutivi asciutti in estate (fino a $+20$ giorni). Le prime sperimentano un forte aumento delle notti tropicali (fino a $+70$ giorni/anno); mentre le seconde presentano un forte aumento dei giorni caldi (fino a $+60$ giorni/anno).

2.2 Introduzione

Il clima della Terra sta cambiando dalla scala globale a quella regionale ed è previsto un profondo cambiamento nel futuro prossimo, in modo particolare causato dall'aumento delle emissioni di gas serra antropogenici (IPCC, 2013).

L'area del Mediterraneo è un hot-spot del cambiamento climatico, con delle differenze marcate tra Nord e Sud del bacino (Giorgi, 2006; Giorgi and Lionello, 2008; Lionello and Scarascia, 2018). Una precisa valutazione del cambiamento climatico a scala regionale insieme all'incertezza è cruciale per stimare i potenziali impatti nel futuro, per lo sviluppo di strategie di adattamento e valutare l'importanza delle azioni di mitigazione (IPCC, 2014).

Per descrivere il clima futuro è necessario l'utilizzo di modelli climatici. Esistono i modelli a scala globale (GCM) con una risoluzione tipica di 100 km , che nelle aree caratterizzate da una topografia complessa non riescono a descrivere in modo preciso le caratteristiche del campo di precipitazione indotto dall'orografia stessa. Esistono poi i modelli climatici regionali (RCM), che attraverso un downscaling dinamico, ovvero utilizzando i GCM come condizioni al contorno e condizioni iniziali, riescono ad aumentare di un ordine di grandezza la risoluzione spaziale e quindi a descrivere meglio i processi a scala regionale (Giorgi and Lionello, 2008; Torma et al., 2015).

In questo studio viene considerato il dataset EURO-CORDEX¹ (Jacob et al., 2014), che rappresenta lo stato dell'arte dei modelli climatici regionali su scala europea in termini di risoluzione spaziale. L'obiettivo è studiare i possibili scenari climatici, in termini di temperatura e precipitazione, nell'area del Nord-Est Italia. In particolare, viene considerata l'anomalia della temperatura e precipitazione media per il futuro vicino (2021-2050) e futuro lontano (2071-2100) rispetto al periodo di riferimento (1976-2005). Viene anche investigata l'anomalia di alcuni eventi estremi: durata delle ondate di calore (HWDI), giorni caldi (SU30), notti tropicali (TR), 95° percentile (R95pTOT) della distribuzione delle precipitazioni giornaliere, giorni secchi (CDD), giorni con neve nuova (SNWDAYS).

Esistono già alcuni studi di proiezioni climatiche sull'Italia con modelli regionali (Zampieri et al., 2010; Coppola and Giorgi, 2010), ma non con questa risoluzione spaziale e non sull'area specifica di nostro interesse. In più in questo studio le variabili di temperatura e precipitazione fornite dalle proiezioni climatiche EURO-CORDEX sono state corrette con un metodo di bias-correction con le misure della rete meteorologica regionale.

Questo studio prende spunto da uno studio analogo condotto nella regione Friuli-Venezia Giulia da ARPA FVG (Gallina e Giorgi, 2018) e da uno studio condotto in collaborazione con Università del Salento (Massaro e Lionello, 2020). Molti aspetti di questo studio, come la definizione dell'area geografica, periodi di riferimento, variabili di interesse, indici climatici, sono stati concordati con ARPA FVG.

2.3 Dataset

Le simulazioni utilizzate sono caratterizzate da una risoluzione spaziale di 0.11° sull'intera area europea (dominio EUR-11), i GCM sono frutto del CMIP5 (5^a fase del Coupled Model Intercomparison Project; Taylor et al, 2012). Esse si dividono in simulazione storiche, dal 1950 al 2005 che rappresentano lo stato attuale del clima, e simulazioni di scenario 2006-2100, proiezione del clima futuro a partire da alcuni scenari futuri. Tali scenari si chiamano *Representative Concentration Patways* e rappresentano differenti forzanti radiative: RCP2.6 (2.6 W/m²), RCP4.5 (4.5 W/m²) e RCP8.5 (8.5 W/m²) (Moss et al., 2010). Il dataset contiene diverse variabili giornaliere tra cui, pressione, temperatura, umidità, vento, precipitazione, radiazione.

Il dataset è ottenibile liberamente da *Earth System Grid Federation* (ESGF2) oppure dal servizio di *Climate Data Store* (CDS3) del progetto Copernicus. L'output è in formato NetCDF, caratterizzato da una parte di meta-dati (che descrivono il contenuto dei dati) e dai dati veri e propri. I dati sono forniti su griglia spaziale a coordinate lat/lon ruotate su tutta Europa a passo temporale giornaliero dal 1950 al 2100. Per ridurre il tempo necessario al download completo del dataset, è stato utilizzato lo stesso dataset fornito da ARPA-FVG.

¹ <http://www.euro-cordex.net/>

² <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>

³ <https://cds.climate.copernicus.eu#!/home>

2.4 Metodologia

2.4.1 Analisi dati

Sono state selezionate la temperatura media (tas), minima (tasmin), massima (tasmax) e precipitazione (pr) media giornaliera. Sono stati considerati gli scenari di emissione estremi, quello a basse emissioni (RCP2.6) e alte emissioni (RCP8.5).

È stato operato un regridding, utilizzando una media pesata con la distanza, su griglia regolare 0.10° (circa 12.5 km) sull'area del Triveneto lat: 44.55°-47.35° lon: 10.10-14.20°. Dei 15 modelli a disposizione uno (simulazione GCM/RCM IPSL-CM5A-MR/INERIS-WRF331F) è stato escluso perché considerato un outlier rispetto a tutti gli altri modelli, in particolar modo sulla parte del mare. I modelli utilizzati sono riportati in Tabella 1.

Sono state calcolate le anomalie stagionali (estate e inverno) annuali e trentennali per i due periodi futuri (2021-2050 e 2071-2100) rispetto al trentennio di riferimento (1976-2005). È stata considerata sia l'anomalia mediata su tutto il dominio spaziale sia l'anomalia trentennale punto per punto, in modo da ottenerne la distribuzione geografica.

Per le variabili climatiche calcolate punto per punto vengono considerati esclusivamente i 5 modelli che meglio rappresentano la climatologia del Nord-Est Italia (Gallina e Giorgi, 2018), che vengono riportati in grassetto in Tabella 1.

Le analisi statistiche (calcolo della media, varianza, percentili) sono state condotte in CDO (Climate Data Operator) e bash, sviluppando alcuni scripts e funzioni fornite da ARPA FVG. Per gli output grafici è stato utilizzato Python sotto sistema operativo Linux. Tutti i software utilizzati sono open-source.

GCM	RCM	Risoluzione	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	CCLM4-8-17	0.11°	-	X	X
CNRM-CM5	RCA4	0.11°	-	X	X
EC-EARTH	CCLM4-8-17	0.11°	X	X	X
EC-EARTH	HIRHAM5	0.11°	X	X	X
EC-EARTH	RACMO22E	0.11°	X	X	X
EC-EARTH	RCA4	0.11°	X	X	X
HadGEM2-ES7	CCLM4-8-17	0.11°	-	X	X
HadGEM2-ES	RACMO22E	0.11°	X	X	X
HadGEM2-ES	RCA4	0.11°	X	X	X
IPSL-CM5A-MR	RCA4	0.11°	-	X	X
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	0.11°	-	X	X
MPI-ESM-LR	RCA4	0.11°	X	X	X
MPI-ESM-LR	REMO2009	0.11°	X	X	X
NCC-NorESM1-M	HIRHAM5	0.11°	-	X	X

Tabella 1. Simulazioni climatiche regionali estratte dal progetto EURO-CORDEX considerate in questo studio. GCM sta per Global Climate Model, RCM per Regional Climate Model, RCP si riferisce a diversi Representative Concentration Pathway, le simulazioni disponibili sono indicate con X. In grassetto vengono riportati i modelli che meglio rappresentano la climatologia del Nord-Est Italia (Gallina e Giorgi, 2018).

2.4.2 Incertezza delle proiezioni

La migliore proiezione per il futuro è rappresentata dalla media di ensemble (Giorgi, 2015); quindi è stata operata una media su tutte le 14 simulazioni a disposizione. Per quanto riguarda l'incertezza - dovuta essenzialmente allo scenario di emissione, rappresentazione dei processi fisici e variabilità naturale del sistema climatico (Cubasch et al, 2001) - in questo studio si è considerata la variabilità inter-modello. In particolare, per quanto riguarda l'anomalia media su tutto il dominio il cambiamento climatico è considerato significativo quando il 90° percentile dell'anomalia di tutti i modelli ha un segno definito (o positivo o negativo). Per quanto riguarda l'anomalia punto per punto, il cambiamento climatico su ciascun punto della griglia è considerato significativo quando la media di ensemble dell'anomalia è maggiore della deviazione standard di tutto l'ensemble (IPCC, 2013).

2.4.3 Indici climatici

Per suggerire gli impatti potenziali sulla società e ecosistemi dovuti al cambiamento climatico vengono calcolati alcuni indici climatici.

Gli estremi di temperatura possono provocare molti impatti tra cui il disagio fisico. Un indice comunemente usato è la durata delle ondate di calore (HWDI), calcolata come 5 giorni consecutivi in cui la temperatura massima è 5 °C al di sopra della media di riferimento per quel giorno dell'anno (Giorgi et al., 2014). Questo indice è calcolato per l'estate e la media di riferimento è calcolata come media su finestra mobile di 5 giorni.

Vengono poi considerati alcuni indici per il disagio termico: i giorni caldi (SU30), intesi come il numero di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C; le notti tropicali (TR), definiti come il numero di giorni con temperatura minima maggiore di 20 °C.

Gli estremi di precipitazione possono avere forti impatti tra cui alluvioni e fenomeni di erosione. Un segnale per questo tipo di eventi comunemente usato è la precipitazione cumulata oltre il 95° percentile della distribuzione di precipitazione giornaliera (R95pTOT; Giorgi et al., 2014). Questo indice viene calcolato considerando soli i giorni piovosi (precipitazione giornaliera > 1mm/giorno).

Come indice di pericolo climatico legato alla siccità viene considerato il numero massimo di giorni consecutivi asciutti (precipitazione giornaliera inferiore a 1 mm; CDD).

Come proxy della variazione delle precipitazioni nevose si considerano i giorni con neve nuova (SNWDAYS), intesi come numero di giorni con temperatura media minore di 2 °C e precipitazione giornaliera maggiore di 1 mm.

Per tutti questi indici l'anomalia in ciascun punto della griglia per i due periodi futuri rispetto al periodo di riferimento è calcolata considerando la media di ensemble; per testare la concordanza tra i modelli si utilizza lo stesso metodo utilizzato per le anomalie di temperatura e precipitazione media.

2.4.4 Downscaling statistico

Il metodo del linear scaling (Leander e Buishand, 2007) è stato utilizzato per correggere le variabili di precipitazione e temperatura a livello giornaliero e per ottenere un downscaling statistico di base. Per le precipitazioni è stato utilizzato il dataset del progetto ArcIS (Pavan et al., 2019), che fornisce una griglia delle precipitazioni giornaliere sull'Italia centro-settentrionale con una spaziatura di circa 5 km. Per la temperatura è stata costruita una griglia di temperatura massima e minima mensile di 500 m con un processo di regressione multilineare - che tiene conto dell'altezza, della distanza dalla costa, della morfologia e della pendenza del terreno - partendo da misurazioni giornaliere

provenienti dalla rete di stazioni meteorologiche regionali nel periodo 1976-2005 (Massaro et al., 2022). Il linear scaling è stato applicato a tutti gli indicatori basati su soglia fissa (SU30, TR, CDD, SNWDAYS). La dimensione della griglia aumenta così a 500 m e 5 km, rispettivamente per gli indicatori basati sulla temperatura e sulle precipitazioni, rispetto a quella originaria (11 km).

2.5 Risultati

2.5.1 Temperatura

La serie temporale dell'anomalia annuale di temperatura fino al 2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 per la media di ensemble degli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (inverno e estate) è presentata in Figura 16. Considerando lo scenario a basse emissioni RCP2.6 e quella ad alte emissioni RCP8.5, l'anomalia è compresa tra +1.5 °C e +4.5 °C al 2100 in inverno, e tra +1.5 °C e +5.5 °C al 2100 in estate.

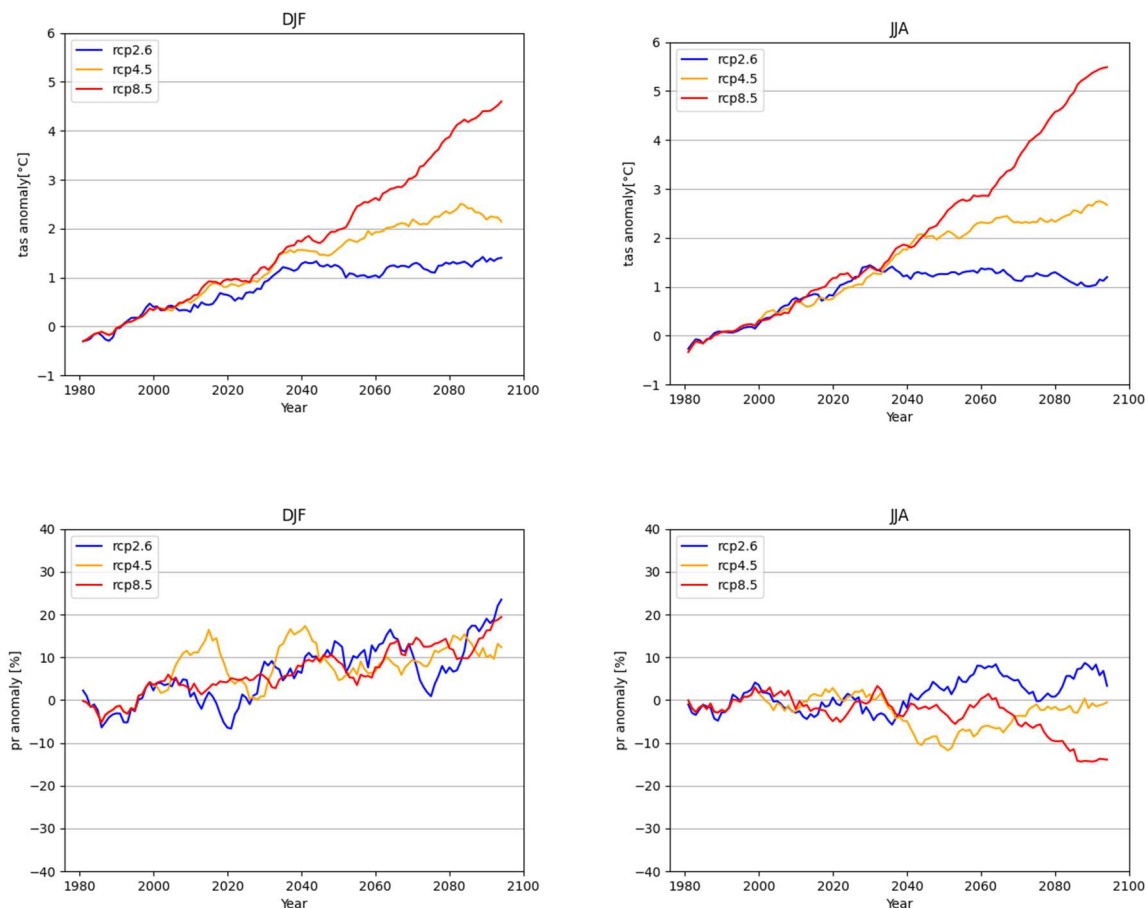


Figura 16. (Pannello superiore) Anomalia della temperatura annuale rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 per i tre scenari RCP in inverno (sinistra) ed estate (destra). I valori sono mediati su tutto il dominio spaziale considerato, rappresentano la media di ensemble e coprono il periodo dal 1976 al 2100. A ciascuna serie temporale è stata applicata una media mobile di 11 anni. RCP si riferisce a Representative Concentration Pathways. (Pannello inferiore) Analogo al pannello superiore, ma per l'anomalia delle precipitazioni annuali (come differenza percentuale).

L'anomalia per i due periodi futuri 2021-2050 e 2071-2100 per l'ensemble dei 14 modelli nei vari scenari e stagioni è presentata nel boxplot di Figura 17.

Per tutti i periodi e scenari l'anomalia è significativamente positiva (al 90° percentile). Considerando il 25°/75° percentile (box), per RCP2.6 l'anomalia è tra +1 °C e +1.5 °C sia nel futuro vicino che lontano indipendentemente dalla stagione. Per RCP8.5 l'anomalia è tra +1 °C e +2 °C nel futuro vicino; nel futuro lontano è tra +3.5 °C e +5 °C e tra +4 °C a +5.5 °C in inverno e estate, rispettivamente. Quindi l'anomalia di temperatura è maggiore in estate.

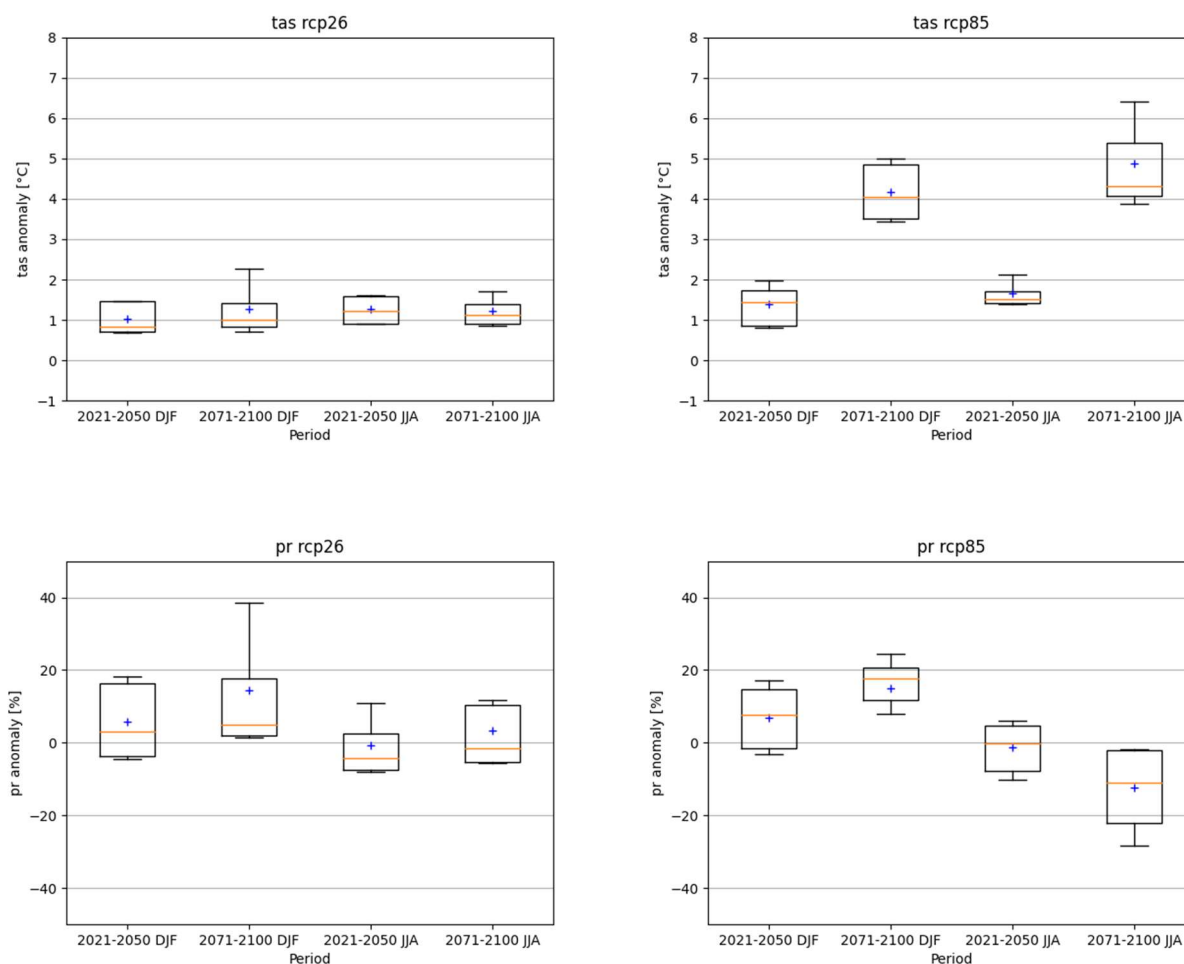
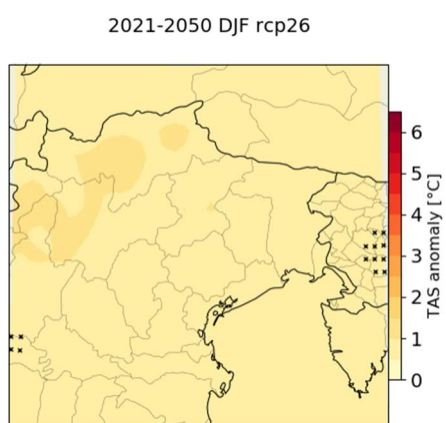
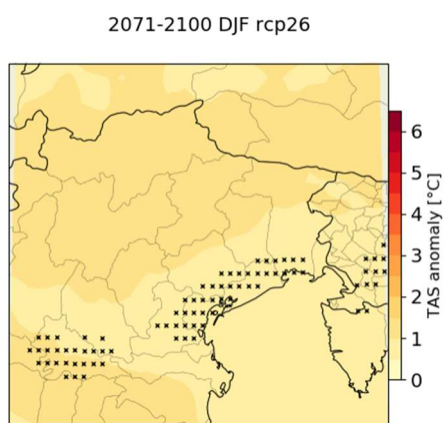
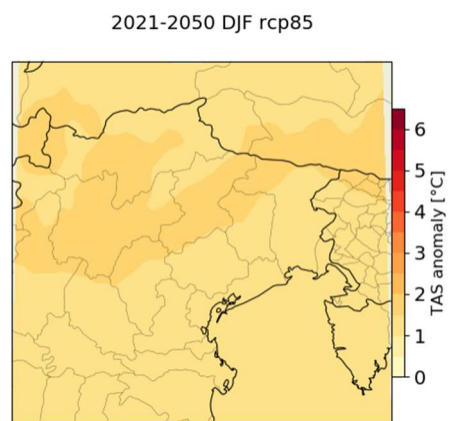


Figura 17. (Pannello superiore) Anomalie della temperatura invernale (DJF) ed estiva (JJA) per i periodi 2021-2050 e 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nell'ensemble RCM. Il pannello di sinistra si riferisce a RCP2.6 e il pannello di destra a RCP8.5. I limiti superiore e inferiore del box indicano il 25° e 75° percentile, i baffi corrispondono rispettivamente al 10° e al 90° percentile, la linea orizzontale rossa è la mediana. La croce blu indica l'anomalia della media di ensemble. (Pannello inferiore) Come il pannello superiore, ma per le anomalie di precipitazione.

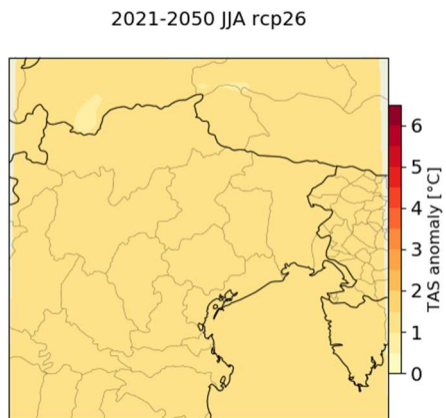
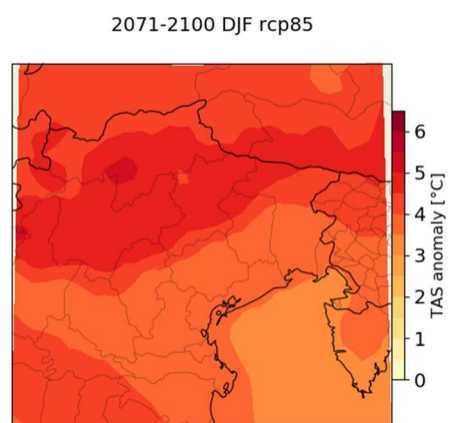
La distribuzione geografica della media di ensemble dell'anomalia di temperatura è presentata in Figura 18 per i due periodi futuri e stagioni. Le croci nella mappa indicano i punti di griglia dove l'accordo tra i modelli è basso, ovvero sia la media di ensemble risulta minore della deviazione standard tra modelli. Per tutti gli scenari i modelli sono statisticamente in accordo su quasi l'intero dominio.



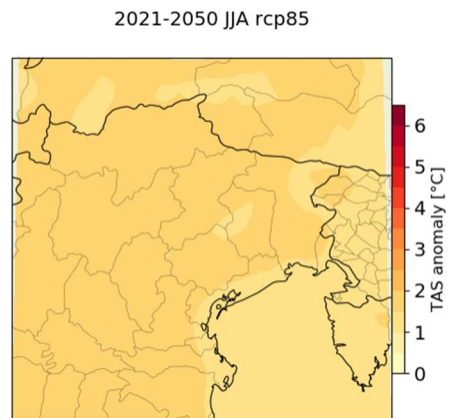
(a)



(b)



(c)



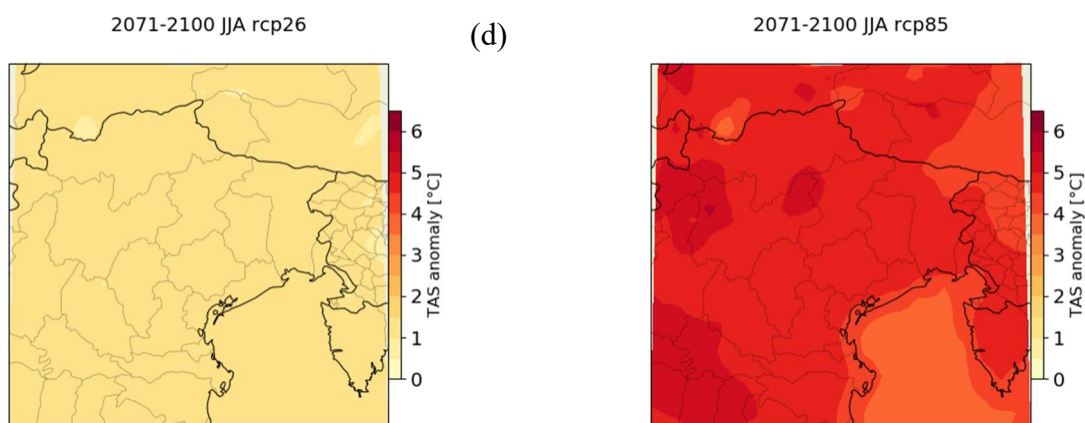


Figura 18. Distribuzione geografica dell'anomalia di temperatura in inverno per il periodo 2021-2050 (righe a) e 2071-2100 (righe b) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6/RCP8.5. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli è basso. Le righe (c) e (d) forniscono le stesse informazioni di (a) e (b), rispettivamente, ma si riferiscono all'estate.

Le aree meno affette dal riscaldamento sono le aree costiere e pianeggianti, mentre quelle montuose risultano quelle più colpite, specialmente nella stagione invernale.

In inverno, nel 2021-2050 l'anomalia della temperatura è compresa tra +0.5 °C in pianura e +1 °C in montagna per RCP2.6; l'anomalia della temperatura aumenta da +1 °C a +1.5 °C in pianura e da +1.5 °C a +2 °C nelle aree prealpine e alpine per RCP8.5.

Nel futuro lontano, il riscaldamento è compreso tra +1 °C e +1.5 °C per RCP2.6, e aumenta da +3.5 °C a +4 °C nelle zone costiere o pianura, e aumenta ulteriormente fino a +5 °C nelle aree alpine per RCP8.5. Quest'ultimo effetto potrebbe essere correlato allo scioglimento della neve e dei ghiacciai e alla conseguente riduzione dell'albedo superficiale.

Per la stagione estiva il riscaldamento è geograficamente più uniforme rispetto all'inverno, è compreso tra +1 °C e +1.5 °C per RCP2.6 sia nel 2021-2050 che nel 2071-2100; per RCP8.5 il riscaldamento è compreso tra +1.5 °C e +2 °C per il 2021-2050 e aumenta da +4.5 °C a +5 °C in pianura e fino a +5.5 °C nelle zone montuose nel futuro lontano.

2.5.2 Precipitazione

Per la precipitazione vengono calcolate le stesse quantità della temperatura, con l'eccezione che per la precipitazione l'anomalia è calcolata come una variazione percentuale rispetto al periodo di riferimento.

La Figura 16 mostra l'anomalia della media di ensemble per i vari RCP fino al 2100. Considerando gli RCP più discordanti, l'anomalia di precipitazione raggiunge da +15 % a +25 % al 2100 in inverno; in estate gli scenari non concordano e l'anomalia raggiunge +5 % con RCP2.6 e -15 % con RCP8.5. Considerando l'ensemble dell'anomalia nei due periodi futuri (Figura 17), soltanto nel trentennio 2071-2100 c'è accordo tra i modelli.

In inverno l'anomalia media è positiva, tra 0 e +20 % (RCP2.6) e da +15 % a +20 % (RCP8.5); in estate l'anomalia è negativa, da 0 a -20 % (RCP8.5).

La distribuzione geografica dell'anomalia delle precipitazioni è mostrata nella Figura 19 per l'inverno e l'estate. Solo il trentennio 2071-2100 con RCP8.5 ha un buon accordo tra i modelli. In inverno l'anomalia delle precipitazioni è positiva, maggiore per l'area alpina rispetto alle zone pianeggianti (da +15 a +35 % contro valori compresi entro +10 e +20 %, rispettivamente). In estate l'anomalia è negativa, con un massimo da -20 % nelle Alpi meridionali a -30 % nella pianura centrale.

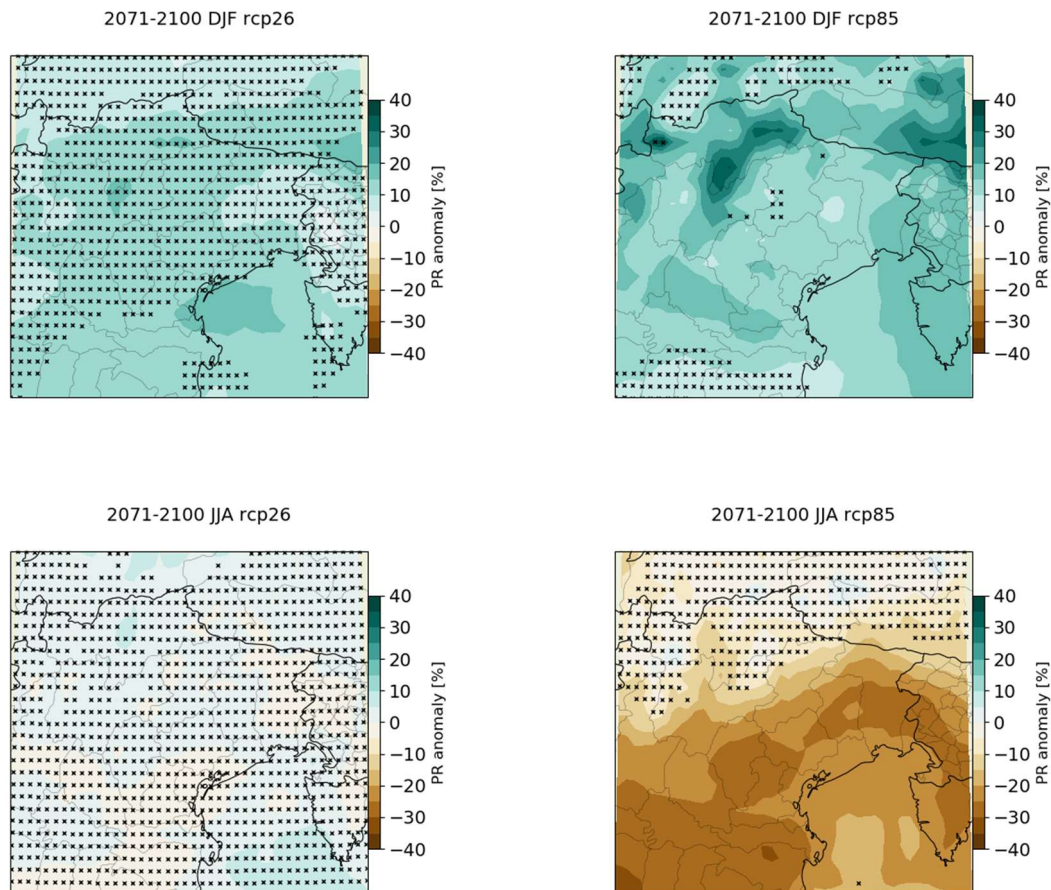


Figura 19. Distribuzione geografica dell'anomalia delle precipitazioni (unità: percentuale del valore di riferimento) in inverno (sopra) e estate (sotto) per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6 / RCP8.5. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

2.5.3 Eventi estremi

La Figura 20 mostra la distribuzione geografica dell'anomalia del numero di giorni di ondate di calore (HWDI, media ensemble) in estate per i due periodi futuri rispetto al periodo di riferimento. Nel 2021-2050 l'anomalia è compresa tra 0 e 5 giorni/anno per RCP2.6; per RCP8.5 l'anomalia rimane compresa tra 0 e 5 giorni/anno, ad eccezione di alcune aree delle Alpi del Nord con 5-10 giorni/anno.

Nel 2071-2100 per RCP2.6 l'anomalia è simile al 2021-2050, ma per il RCP8.5 aumenta fortemente: 20-30 giorni/anno nelle zone costiere, 30 giorni/anno in pianura e 35-40 giorni/anno nella zona delle Alpi.

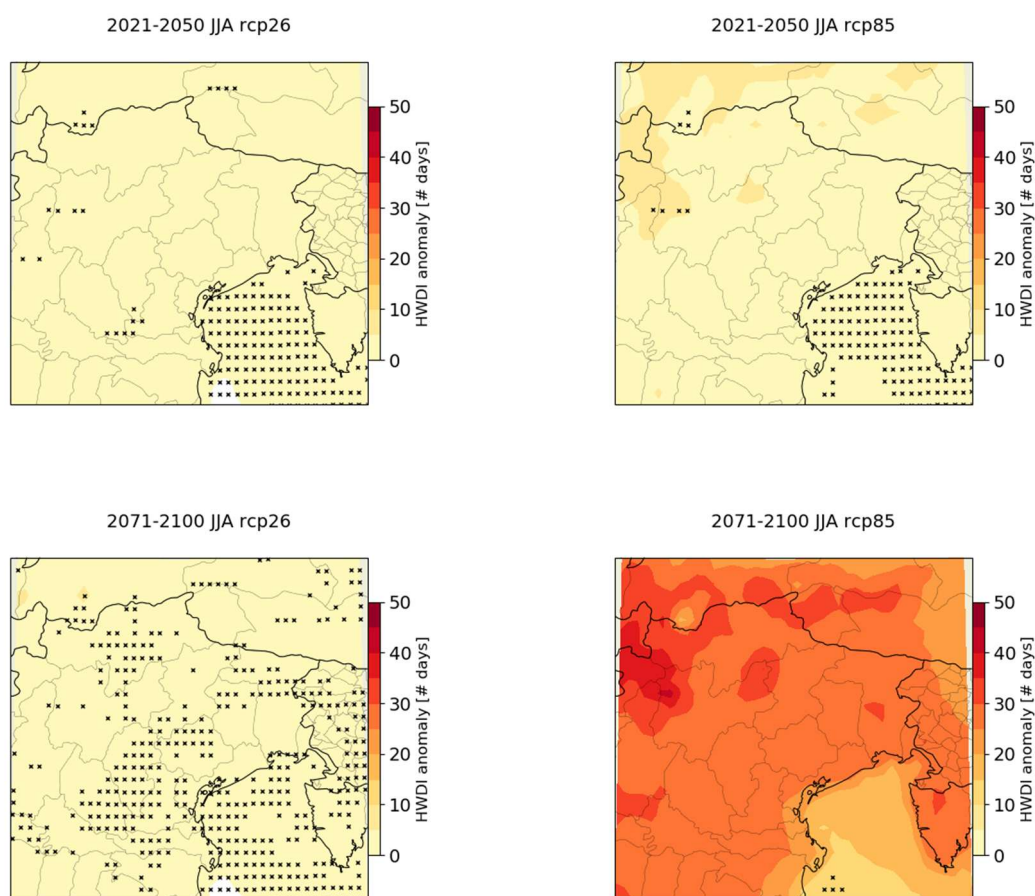


Figura 20. Distribuzione geografica dell'anomalia dell'indice di durata delle ondate di calore (HWDI) (unità: n. giorni/anno) in estate per il periodo 2021-2050 (pannelli superiori) e 2071-2100 (pannelli inferiori) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6/RCP8.5. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo fra i modelli è basso.

La distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni caldi (SU30) è mostrata in Figura 21 per il trentennio 2071-2100 con il confronto RCP2.6 e RCP8.5. Si vede la differenza sostanziale tra i due scenari: per l'area di pianura si passa da un aumento fino a +10 giorni/anno per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a +60 giorni/anno per le stesse aree con RCP8.5.

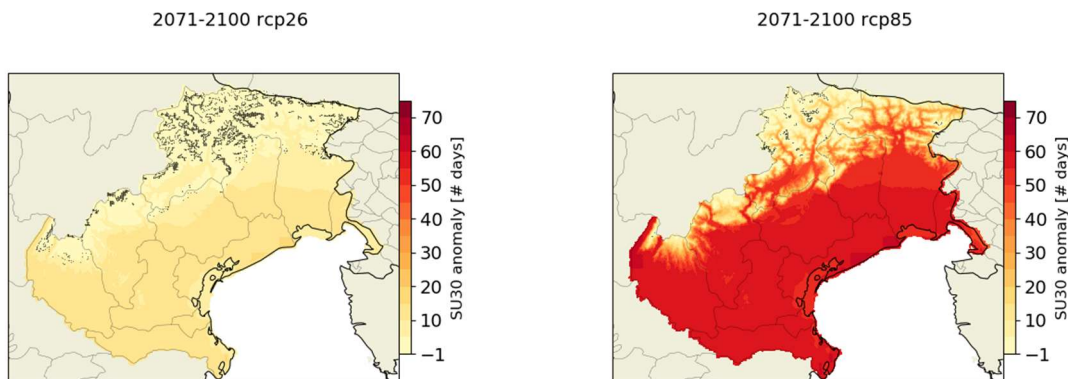


Figura 21. Distribuzione geografica dell'anomalia del numero di giorni caldi, temperatura massima maggiore di 30 °C (SU30) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

La distribuzione geografica dell'anomalia delle notti tropicali (TR) è mostrata in Figura 22 per il trentennio 2071-2100 con il confronto RCP2.6 e RCP8.5. Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari: per l'area costiera si passa da un aumento fino a +20 giorni/anno per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a +70 giorni/anno per le stesse aree con RCP8.5.

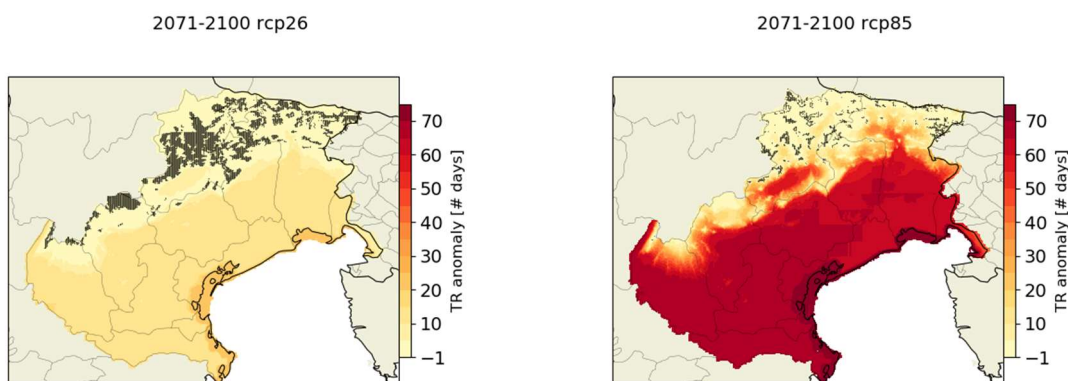


Figura 22. Distribuzione geografica dell'anomalia delle notti tropicali, ovvero i giorni con temperatura minima maggiore di 20 °C (TR) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

Per la precipitazione cumulata maggiore del 95° percentile (R95pTOT), l'inverno nel periodo 2071-2100 presenta un'anomalia complessivamente positiva (Figura 23). In particolare, con RCP2.6 è presente un'anomalia R95pTOT positiva (+45 %) con buon accordo tra modelli solo in un'area limitata del Veneto meridionale. Per RCP8.5 si registra un aumento delle precipitazioni estreme nella maggior parte del dominio, dal +60 al +80% nelle zone costiere e Veneto meridionale e fino a +120% nelle zone alpine. Per l'estate l'indice R95pTOT presenta una diminuzione significativa solo a fine secolo per RCP8.5 nella pianura settentrionale (-30 %) (Figura 24).

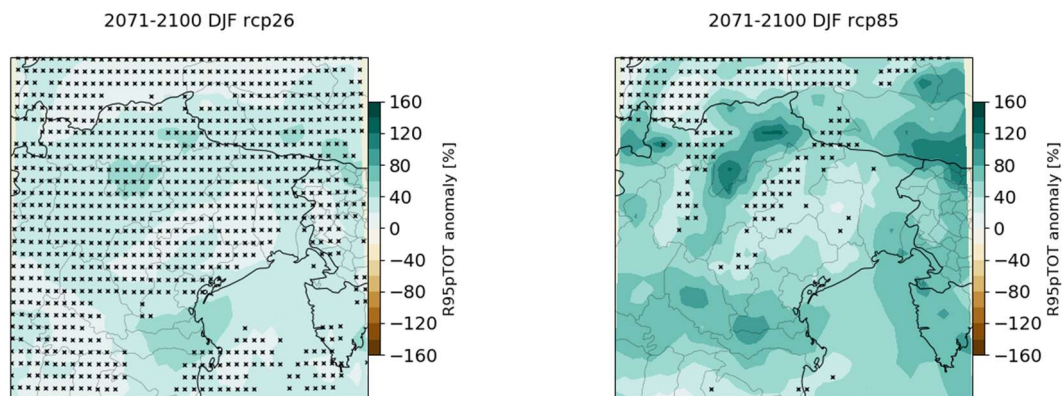


Figura 23. Distribuzione geografica dell'anomalia della precipitazione cumulata superiore al 95° percentile (R95pTOT) (unità: percentuale del valore di riferimento) in inverno per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

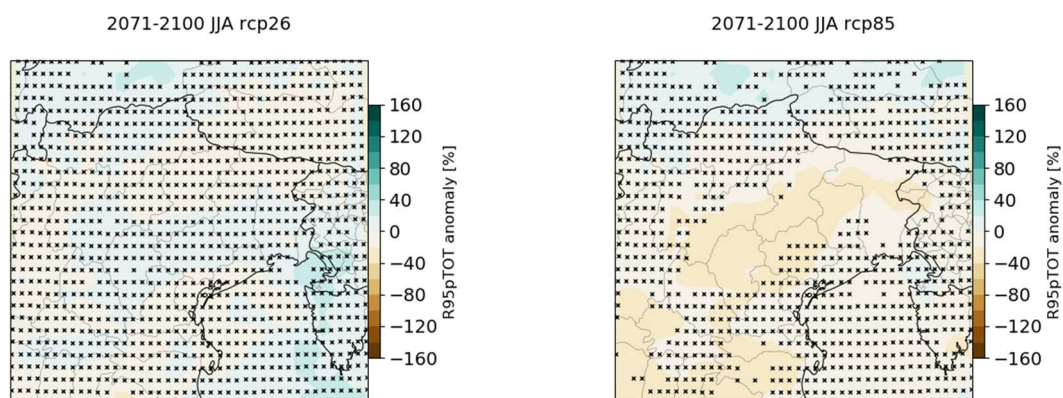


Figura 24. Distribuzione geografica dell'anomalia della precipitazione cumulata superiore al 95° percentile (R95pTOT) (unità: percentuale del valore di riferimento) in estate per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

Per il numero massimo di giorni consecutivi asciutti (CDD) nel futuro lontano si passa da un aumento poco significativo dello scenario RCP2.6, fino ad un aumento significativo nelle aree della pianura centrale di +20 giorni per RCP8.5 (Figura 25).

Per il numero massimo di giorni con neve nuova nel trentennio 2071-2100 si passa da una diminuzione di -10 giorni/anno dello scenario RCP2.6, fino ad una diminuzione nelle aree alpine di -35 giorni/anno per RCP8.5 (Figura 26).

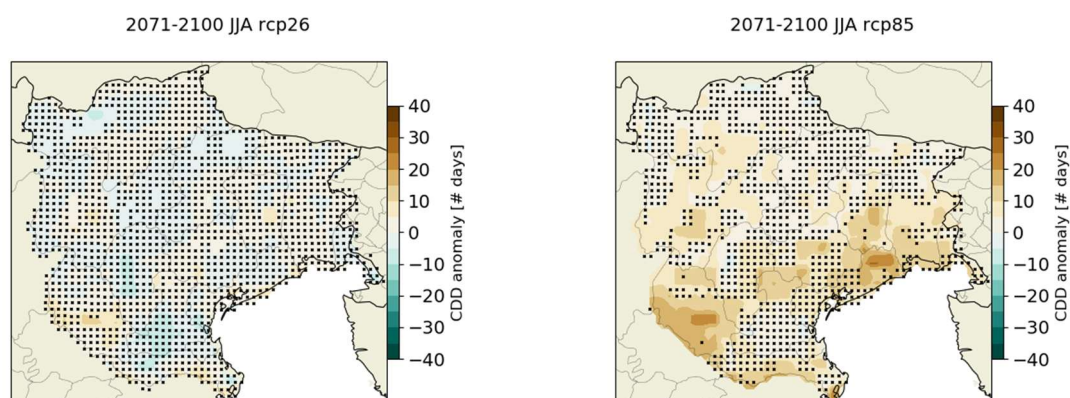


Figura 25. Distribuzione geografica dell'anomalia del numero massimo di giorni consecutivi asciutti (CDD) (unità: n. giorni) in estate per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

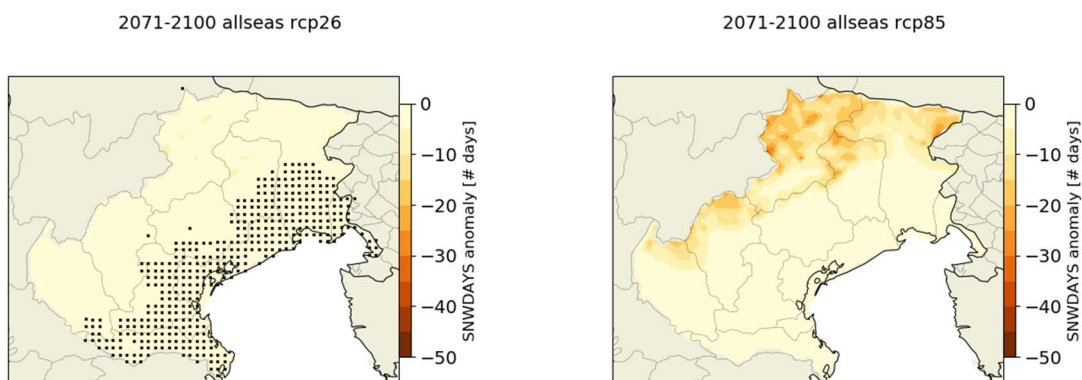


Figura 26. Distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni con neve nuova, ovvero giorni con temperatura media minore di 2 °C e precipitazione giornaliera maggiore di 1 mm (SNWDAYS) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

2.6 Conclusioni

Le proiezioni di temperatura derivate dalle simulazioni EURO-CORDEX mostrano un riscaldamento diffuso per il futuro sull'area del Nord-Est Italia sia nella stagione estiva che in quella invernale.

Per lo scenario RCP2.6 il riscaldamento medio si stabilizza nell'intervallo compreso tra 1 °C e 1.5 °C sia nel futuro vicino che lontano.

Per RCP8.5 il riscaldamento aumenta da valori simili al RCP2.6 nel futuro vicino a valori molto più elevati nel futuro lontano: compresi tra +3.5 °C e +5 °C in inverno e tra +4 °C e +5.5 °C in estate. Il riscaldamento appare maggiore in estate rispetto all'inverno.

Con RCP2.6 l'aumento della temperatura si arresta dopo la metà del 21° secolo, mentre accelera con RCP8.5.

Il riscaldamento è spazialmente più uniforme in estate rispetto all'inverno, e più debole nelle zone costiere e pianeggianti rispetto alla regione montuosa, dove raggiunge i +6 °C contro i +5 °C in pianura con RCP8.5 nel futuro lontano.

Con lo scenario RCP8.5 la durata delle ondate di calore (HWDI) aumenta notevolmente passando dal futuro vicino al futuro lontano, specialmente nelle zone di montagna. L'anomalia HWDI è di 0-5 giorni/anno nelle zone costiere e di 5-10 giorni/anno in alcune aree montane nel 2021-2050. Cresce fino a 20-30 giorni/anno nelle zone costiere, 30 giorni/anno in pianura e 35-40 giorni/anno nelle aree alpine nel 2071-2100.

Considerando il trentennio 2071-2100, l'anomalia dei giorni caldi SU30 passa dai +10 giorni/anno ai +60 giorni/anno nelle aree di pianura, rispettivamente, per lo scenario RCP2.6 e RCP8.5; l'anomalia delle notti tropicali TR passa dai +20 giorni/anno ai +70 giorni/anno nelle aree costiere, rispettivamente, per lo scenario RCP2.6 e RCP8.5.

L'impatto del cambiamento climatico sulle precipitazioni stagionali emerge chiaramente solo nello scenario RCP8.5, che nel futuro lontano produce un aumento significativo delle precipitazioni in inverno (nell'intervallo dal 15 % al 20 %) e una diminuzione in estate (da -5 % a -20 %).

L'aumento delle precipitazioni si verifica principalmente nelle aree alpine interne in inverno (fino a +35 %) e la diminuzione nelle aree di pianura interna (fino a -30 %) e nel versante meridionale delle Alpi in estate.

Infine, si verifica un significativo aumento delle precipitazioni estreme (R95pTOT) in particolar modo considerando la stagione invernale, scenario RCP8.5 e trentennio 2071-2100, raggiungendo +80% nelle zone costiere e Veneto meridionale e +120% nelle Alpi.

Considerando il trentennio 2071-2100, l'anomalia dei giorni secchi CDD è poco significativa per lo scenario RCP2.6 e aumenta fino a +20 giorni per RCP8.5.

Considerando lo stesso trentennio, l'anomalia dei giorni con neve nuova passa da una diminuzione fino a -10 giorni/anno a -35 giorni/anno nelle aree montane, rispettivamente, per lo scenario RCP2.6 e RCP8.5.

3. Piattaforma Clima Nord-Est

La Piattaforma Clima Nord-Est (CliNE, <https://clima.arpa.veneto.it>) propone il quadro climatico passato e futuro per il territorio del Nord-Est Italia attraverso una serie di indicatori climatici che tengono conto dei dati raccolti dalle stazioni meteorologiche regionali (Figura 27).

Tali indicatori climatici vengono forniti in termini di mappe e di serie temporali, per diversi orizzonti temporali e tre scenari climatici futuri, con la possibilità di estrazione e download dei dati per specifici punti di interesse. Inoltre, viene data la possibilità di visualizzare e confrontare la serie annuale puntuale fornita dalla proiezione con la serie storica puntuale misurata dalle stazioni di misura della rete meteo-idro-nivo regionale presenti nelle immediate vicinanze.

Le nuove funzionalità di CliNE sviluppate nel corso del biennio 2024-2025 riguardano:

- introduzione dei dati forniti dalle stazioni della rete meteorologica regionale;
- sviluppo di una nuova sezione “Climatologia storica” interamente dedicata ai dati storici;
- introduzione del “Barometro del clima”, che permette un raffronto dell'andamento attuale del clima e di quello fornito dai modelli climatici ad alta risoluzione;
- introduzione di nuovi indicatori climatici, in particolare di due indicatori che forniscono indicazioni sugli impatti della domanda di energia per riscaldamento e raffrescamento;
- introduzione dell’incertezza delle proiezioni climatiche;
- miglioramento dell’accessibilità e della navigabilità, tra cui: miglioramento della modalità di visualizzazione e download dei dati, miglioramento della ricerca dei punti di interesse e introduzione dei centroidi ISTAT, traduzione in lingua inglese, pubblicazione di due video tutorial (<https://www.youtube.com/watch?v=jgowvWIVSE0>; <https://www.youtube.com/watch?v=qyMiroQFss0>);
- introduzione di una versione “avanzata” – per il pubblico esperto – e una “semplice” – per il pubblico generalista;
- utilizzo di tecnologie e approccio open source, con il codice sorgente ospitato su repository pubblico promuovendo la trasparenza e la replicabilità tramite riuso dal catalogo nazionale AgID;

Il database sui cambiamenti climatici a scala locale disponibile con CliNE rappresenta il punto di partenza per valutare gli impatti dei cambiamenti climatici in una specifica area da parte delle autorità locali e delle parti interessate. Gli indicatori climatici forniscono, infatti, delle indicazioni su impatti specifici come siccità, disagio termico, dissesto geo-idrologico, impatti sulla domanda di energia per numerosi settori fra cui salute, risorsa idrica, energia, produzione agricola, ecosistemi terrestri. Pertanto, CliNE rappresenta uno strumento utile a supportare la pianificazione territoriale e le politiche di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici, aumentando la consapevolezza dei cittadini sui pericoli climatici e sull'importanza di azioni di mitigazione.

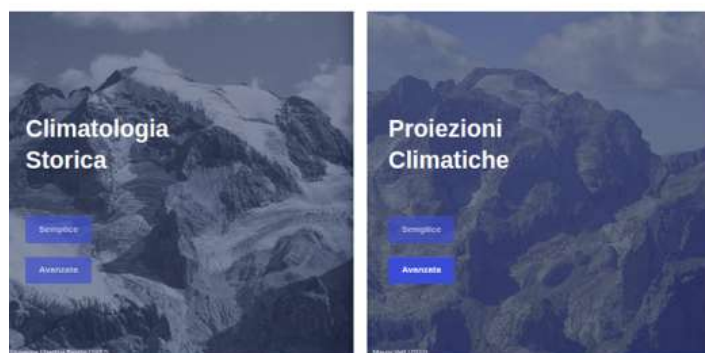
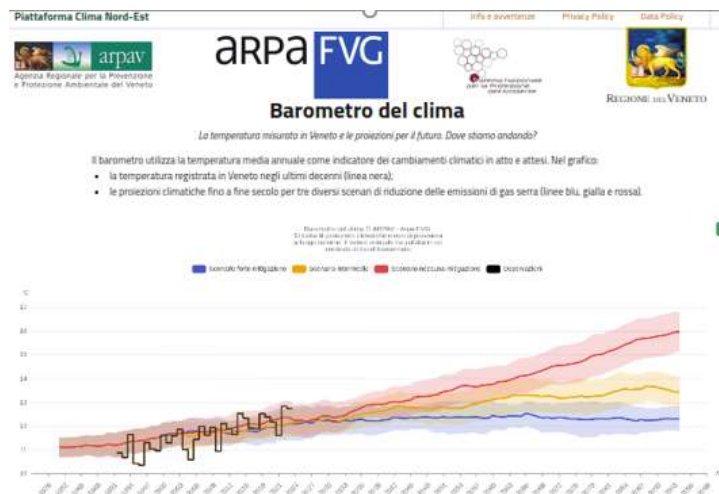


Figura 27. Homepage della Piattaforma Clima Nord-Est.

CLiNE è strutturato in tre sezioni: barometro del clima, climatologia storica e proiezioni climatiche, che vengono illustrate nei paragrafi seguenti.

3.1 Barometro del clima

Il barometro del clima, analogamente al barometro che misura la pressione atmosferica usato per descrivere e prevedere l'evoluzione meteorologica, vuole essere uno strumento semplice e diretto per descrivere e prevedere il clima che cambia.

In questo contesto, la temperatura media annua misurata dalle stazioni meteorologiche regionali racconta l'evoluzione del clima in Veneto fino ad oggi. Le proiezioni climatiche rappresentano possibili futuri climatici, ognuno dei quali parte dalla situazione attuale tenendo conto di sviluppi socio-economici, demografici e tecnologici che determinano panorami emissivi diversi di gas serra, causa principale del riscaldamento globale.

Il confronto tra temperatura media annua rilevata e proiezioni climatiche offre una misura del clima che sta cambiando e della possibile evoluzione nel futuro.

3.2 Climatologia storica

3.2.1 Indicatori climatici

Indicatore	Descrizione
Temperatura media (TAS)	Temperatura media dell'aria vicino al suolo
Temperatura minima (TASMIN)	Media della temperatura minima giornaliera dell'aria vicino al suolo
Temperatura massima (TASMAX)	Media della temperatura massima giornaliera dell'aria vicino al suolo
Notti tropicali (TR)	Numero di notti con temperatura minima maggiore di 20 °C
Giorni caldi (SU30)	Numero di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C
Giorni di gelo (FD)	Numero di giorni con temperatura minima minore di 0 °C
Gradi giorno di riscaldamento (HDDs)	Somma delle differenze tra la temperatura dell'ambiente (20°C) e la temperatura media giornaliera esterna nell'anno solare (1 gennaio - 31 dicembre); vengono conteggiate solo le differenze superiori allo zero
Gradi giorno di raffrescamento (CDDs)	Somma delle differenze tra la temperatura media giornaliera esterna e la temperatura di comfort climatico (21°C) nell'anno solare (1 gennaio - 31 dicembre); la differenza viene conteggiata solo se la temperatura media esterna supera i 24°C

Precipitazione (PR)	Precipitazione cumulata vicino al suolo
---------------------	---

Tabella 2. Indicatori climatici presenti in CliNE, sezione Climatologia storica.

3.2.2 Aggregazione temporale

Per ogni indicatore sono disponibili medie a livello annuale, decennale e trentennale in valore assoluto o in termini di variazione rispetto ad un periodo di riferimento (anomalia). Come periodo di riferimento è stato preso il trentennio normale climatico 1991-2020, che rappresenta la climatologia recente. Utilizzando questo normale climatico sono state calcolate le anomalie annuali e decennali.

Gli indicatori sono calcolati su base mensile, stagionale e annuale a seconda della tipologia dell'indicatore. Si considera la definizione climatica di stagione: inverno (dicembre-gennaio-febbraio), primavera (marzo-aprile-maggio), estate (giugno-luglio-agosto), autunno (settembre-ottobre-novembre).

3.2.3 Dati osservati

La piattaforma CliNE sul territorio del Veneto utilizza le osservazioni della rete di stazioni automatiche meteo-idro-nivo di ARPA Veneto, considerando circa 130 stazioni che dispongono di una serie consistente (almeno 27 anni) dal 1992 ad oggi. Le stime dei valori regionalizzati sono state calcolate mediante la spazializzazione dei dati puntuali attraverso l'applicazione del Universal Kriging, utilizzando come covariabile la quota e considerando anche la distanza dalla costa per alcuni indicatori.

Per il territorio del Friuli Venezia Giulia vengono utilizzate circa 85 stazioni automatiche della rete meteorologica regionale di ARPA FVG che dispongono di una serie consistente a partire dal 1991. Per il calcolo del trend si è adottato lo stimatore di Theil-Sen, metodo più robusto rispetto alla regressione lineare; la significatività statistica del trend viene poi valutata con il test non parametrico di Mann-Kendall.

3.2.4 Risoluzione geografica

Per gli indicatori spazializzati sul Veneto il passo di griglia è circa 1 km. Tutte le griglie sono fornite con il sistema di riferimento WGS 84 (EPSG:4326).

3.2.5 Avvertenze

- Nell'utilizzo della Piattaforma è importante tenere presente le seguenti avvertenze:
- Area geografica di riferimento. Per gli indicatori calcolati sul Veneto è stata operata un'interpolazione geo-spaziale che permette di ottenere un grigliato regolare su tutta la regione. I valori nei punti al di fuori delle stazioni meteorologiche, essendo frutto di interpolazione spaziale, vanno trattati come dati stimati e non come dati misurati. Per il Friuli Venezia Giulia vengono forniti solo i valori misurati a livello puntuale di stazione.
- Nell'analisi delle serie storiche un aspetto cruciale è la significatività statistica delle linee di tendenza. Attualmente in CliNE si tiene conto della significatività del trend nel modo seguente: per le serie annuali puntuali, se il trend è statisticamente significativo (con 95% di confidenza) la linea di trend è continua e viene fornito il coefficiente di

aumento/diminuzione; in caso contrario, la linea dell'andamento è tratteggiata e non viene fornito alcun coefficiente.

- Nelle serie annuali puntuali viene fornito il dato da stazione se il punto selezionato è ad una distanza massima di 2.5 km dalla stazione stessa; al di fuori di questo raggio, viene fornito il dato frutto dell'interpolazione spaziale (ove esistente).
- Sebbene gli output dei dati di origine delle stazioni siano stati sottoposti a procedure di controllo qualità, è possibile rimangano errori non identificati.

3.3 Proiezioni climatiche

3.3.1 Indicatori climatici

Indicatore	Descrizione
Temperatura media (TAS)	Temperatura media dell'aria vicino al suolo
Temperatura minima (TASMIN)	Media della temperatura minima giornaliera dell'aria vicino al suolo
Temperatura massima (TASMAX)	Media della temperatura massima giornaliera dell'aria vicino al suolo
Notti tropicali (TR)	Numero di notti con temperatura minima maggiore di 20 °C
Giorni caldi (SU30)	Numero di giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C
Giorni di gelo (FD)	Numero di giorni con temperatura minima minore di 0 °C
Durata delle ondate di calore (HWDI)	Numero di giorni con temperatura massima maggiore di 5 °C rispetto alla media per almeno 5 giorni consecutivi
Gradi giorno di riscaldamento (HDDs)	Somma delle differenze tra la temperatura dell'ambiente (20°C) e la temperatura media giornaliera esterna nell'anno solare (1 gennaio - 31 dicembre); vengono conteggiate solo le differenze superiori allo zero
Gradi giorno di raffrescamento (CDDs)	Somma delle differenze tra la temperatura media giornaliera esterna e la temperatura di comfort climatico (21°C) nell'anno solare (1 gennaio - 31 dicembre); la differenza viene conteggiata solo se la temperatura media esterna supera i 24°C
Precipitazione (PR)	Precipitazione cumulata al suolo
Precipitazione estrema (R95pTOT)	Precipitazione totale cumulata al di sopra del 95 ° percentile del periodo di riferimento
Giorni secchi (CDD)	Numero massimo di giorni consecutivi asciutti (precipitazione

	giornaliera inferiore a 1 mm)
Giorni con neve nuova (SNWDAYS)	Numero di giorni con temperatura media minore di 2 °C e precipitazione giornaliera maggiore di 1 mm

Tabella 3. Indicatori climatici presenti in CliNE, sezione Proiezioni climatiche.

3.3.2 Aggregazione temporale

Per ogni indicatore sono disponibili medie a livello annuale e trentennale in valore assoluto o in termini di variazione del valore atteso nel futuro rispetto al periodo storico di riferimento (anomalia).

Per le medie trentennali il periodo storico di riferimento è l'intervallo 1976-2005, che rappresenta la climatologia passata, su cui sono state calcolate le medie per i periodi 2021-2050 (futuro vicino) e 2071-2100 (futuro lontano).

Gli indicatori sono calcolati su base stagionale e alcuni su base annuale, anche a seconda della tipologia dell'indicatore. Si considera la definizione climatica di stagione: inverno (dicembre-gennaio-febbraio), primavera (marzo-aprile-maggio), estate (giugno-luglio-agosto), autunno (settembre-ottobre-novembre).

3.3.3 Scenari e modelli climatici

La piattaforma CliNE utilizza tre scenari climatici:

- RCP2.6: scenario con forte mitigazione delle emissioni di gas serra, ovvero una concentrazione in atmosfera di CO₂ entro il 2100 pari a quella attuale (circa 420ppm) e che mira a mantenere il riscaldamento globale entro i 2°C rispetto ai valori preindustriali, come previsto dall'Accordo di Parigi (del 2015);
- RCP4.5: scenario intermedio di stabilizzazione, ovvero la concentrazione di CO₂ si stabilizza entro fine secolo a 538 ppm;
- RCP8.5: scenario senza mitigazione e con emissioni via via crescente, cosiddetto business-as-usual e una concentrazione di CO₂ entro fine secolo che supera i 900 ppm, come da tendenza attuale.

Per questi scenari la Piattaforma elabora - con un metodo di *bias-correction* che tiene conto dei dati della rete delle stazioni meteorologiche regionali - proiezioni che meglio rappresentano la realtà locale: sono utilizzati cinque diversi modelli climatici e una media di ensemble come migliore proiezione per il futuro. I cinque modelli sono modelli climatici a scala regionale del progetto [EURO-CORDEX](#), che rappresenta lo stato dell'arte dei modelli climatici regionali su scala europea in termini di risoluzione spaziale; questi ultimi garantiscono una rappresentazione più dettagliata delle caratteristiche geografiche e dei processi fisici che influenzano il clima a scala regionale rispetto ai modelli climatici a scala globale da cui derivano.

3.3.4 Risoluzione geografica

Per gli indicatori corretti con bias-correction il passo di griglia è 500 m e 5 km, rispettivamente, per quelli calcolati sulla base di temperatura e di precipitazione. Per gli indicatori non corretti con la bias-correction il passo di griglia è quello originale del modello, ovvero 11 km.

Tutte le griglie sono fornite con il sistema di riferimento WGS 84 (EPSG:4326).

3.3.5 Avvertenze

Nell'utilizzo della Piattaforma è importante tenere presente le seguenti avvertenze:

- Sono presenti 5 diverse simulazioni modellistiche e la loro media di ensemble come migliore proiezione per il futuro (Giorgi, 2005). Tutte le simulazioni modellistiche sono caratterizzate da un certo grado di incertezza, che è dovuta allo scenario di emissione, alla rappresentazione dei processi fisici (fisica delle nubi, bilancio energetico alla superficie, ...) e alla variabilità naturale del sistema climatico (Cubash et al, 2001). L'incertezza dei modelli considerati è fornita dalla deviazione standard dell'insieme di modelli considerati (Giorgi, 2005). Nell'utilizzo delle proiezioni, la media di ensemble può essere considerata come la proiezione futura più probabile, ma l'incertezza fornita dai diversi output delle varie simulazioni modellistiche va sempre tenuta in considerazione. Attualmente in CliNE si tiene conto dell'incertezza nei modi seguenti: per le mappe di anomalia trentennale, le aree dove i modelli non hanno un buon accordo (Stocker et al., 2013) e quindi la proiezione è incerta sono ombreggiate (media di ensemble < deviazione standard dei 5 modelli); per le serie annuali puntuali, oltre alla media di ensemble vengono forniti gli estremi di incertezza superiore e inferiore (media ensemble +/- deviazione standard dei 5 modelli).
- Si tratta di proiezioni climatiche e non di previsioni a lungo termine. Pertanto, il valore annuale non ha validità come previsione (ad es. non ha alcun significato vedere quale sarà la temperatura media nell'estate del 2047), ma ha validità esclusivamente in un contesto di trend trentennale.
- La risoluzione effettiva delle simulazioni modellistiche è circa 2-3 volte minore rispetto al passo di griglia e quindi non è possibile descrivere fenomeni al di sotto di questa dimensione. Ad esempio, se il modello ha passo di griglia 11 km la risoluzione effettiva è circa 30 km; nell'utilizzo dell'indicatore sul singolo punto è sempre necessario tener conto di questo aspetto.
- Area geografica di riferimento. Per gli indicatori che si basano sulla precipitazione il bias-correction è stato operato su tutta l'area di Veneto/Friuli-Venezia Giulia/Trentino-Alto Adige utilizzando il dataset ArcGIS che copre il centro-Nord Italia e pertanto è presente tutta l'area interessata. La medesima area è presente per gli indicatori forniti in anomalia su cui non è stata operato il bias-correction. Per gli indicatori di temperatura il bias-correction è stato eseguito utilizzando esclusivamente le stazioni di Veneto e Friuli-Venezia Giulia, pertanto il

dato è fornito solo su quest'area. In una versione futura della Piattaforma si cercherà di integrare le proiezioni con la bias-correction eseguita con i dati da stazione del Trentino-Alto Adige.

- La serie annuale puntuale fornita dalla proiezione viene messa a confronto con la serie storica puntuale misurata dalla stazione di misura della rete meteo regionale presente nelle immediate vicinanze, se quest'ultima si trova ad una distanza di 1 km dal punto di griglia del modello.
- Sebbene gli output dei dati di origine EURO-CORDEX siano stati sottoposti a procedure di controllo qualità, è possibile rimangano errori non identificati.

4. Bibliografia

- Barbi, A. et al. (2013). Atlante climatico del Veneto - Precipitazioni - Basi informative per la correlazione tra cambiamenti climatici e dinamiche forestali nel Veneto. ARPAV, Regione Veneto: <https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/atlante-climatico-del-veneto-precipitazioni-basi-informative-per-l2019analisi-delle-correlazioni-tra-cambiamenti-climatici-e-dinamiche-forestali-nel-veneto>
- Coppola, E., and Giorgi, F. (2010). An assessment of temperature and precipitation change projections over Italy from recent global and regional climate model simulations. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 30(1), 11-32.
- Cubasch, U., Meehl, G.A., Boer, G.J., Stouffer, R.J., Dix, M., Noda, A., Senior, C.A., Raper, S., Yap, K.S. (2001). Projections of future climate change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, ISBN: 0521 01495 6.
- Furlani Edoardo, Rech Francesco (2017). Atlante Agroclimatico del Veneto - Numero giorni piovosi - Numero giorni con precipitazioni significative. Anni 1993-2015. ARPAV, Regione Veneto: <https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/numero-di-giorni-piovosi>
- Gallina, V., and Giorgi, F. 2018. Studio conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia, ARPA FVG.
- Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73(3), 239-265.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, 33(8).
- Giorgi, F., and Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104.
- IPCC (2013). *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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., ... and Georgopoulou, E. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional environmental change*, 14(2), 563-578.
- Leander, R., and Buishand, T. A., 2007. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332(3-4), 487-496.
- Lionello, P., and Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1481-1493.

- Massaro, G., Lionello, P., 2020. Regional climate model projections for North-East Italy, tesi Master 2° livello in Meteorologia e Oceanografia fisica, Università del Salento e Università Parthenope.
- Massaro, G., Gallina, V., Cicogna, A., Zecchini, F., Rech, F., Dalan, F., Ferrario, M.E., Micheletti, S., and Lionello, P., 2022. *Proceedings of the 2a Conferenza Nazionale sulle Previsioni Meteorologiche e Climatiche*.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... and Meehl, G. A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.
- Pavan, V., Antolini, G., Barbiero, R., Berni, N., Brunier, F., Cacciamani, C., ... and Malaspina, T. T., 2019. High resolution climate precipitation analysis for north-central Italy, 1961–2015. *Climate Dynamics*, 52(5), 3435-3453.
- Pinna, M., 1978. L'atmosfera e il clima. UTET - Collana il nostro universo, 478 pp.
- Sito web ARPAV (aggiornamento maggio 2023). Atlante climatico. Raccolta di prodotti climatici elaborati per la climatologia storica e per le proiezioni climatiche relative al Veneto: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/cambiamenti-climatici/atlante-climatico>
- Taylor K, Stouffer RJ, Meehl GA (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bull Am Meteorol Soc* 93:485–498.
- Torma, C., Giorgi, F., & Coppola, E. (2015). Added value of regional climate modeling over areas characterized by complex terrain—Precipitation over the Alps. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(9), 3957-3972.
- Tridello Gabriele et all. (2010), Atlante Agroclimatico del Veneto - Temperature. ARPAV, Regione Veneto. <https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/atlante-climatico-del-veneto-temperature>
- W.M.O. (1983). Guide to Climatological Practices. *WMO n. 100, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva – Switzerland*.
- Zampieri, M., Giorgi, F., Lionello, P., & Nikulin, G., 2010. Regional climate change in the Northern Adriatic. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 40, 32-46.