

Clima e cambiamenti climatici in Veneto

Report di aggiornamento sullo stato dei lavori nell'ambito di:

Accordo di collaborazione interistituzionale ex art. 15 della Legge n. 241/1990 e ss.mm.ii. per attività propedeutiche alla elaborazione della Strategia Regionale sui Cambiamenti Climatici

15/12/2022

Arpav - Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - UO Meteorologia e Climatologia -
UO Clima, scenari e supporto alle strategie di adattamento e mitigazione



Agenzia Regionale per la Prevenzione
e Protezione Ambientale del Veneto



REGIONE DEL VENETO

Indice generale

1 Climatologia attuale in Veneto.....	3
1.1 Analisi dei dati meteorologici.....	3
1.2 Inquadramento climatico del Veneto.....	3
1.2.1 I mesoclimi del Veneto.....	6
1.3 Caratteristiche termo-pluviometriche e di ventosità regionali.....	8
1.4 Peculiarità del clima Veneto.....	16
1.5 I trend climatici sul Veneto.....	18
2 Proiezioni regionali climatiche nel Nord-Est Italia.....	30
2.1 Introduzione.....	30
2.2 Dataset.....	31
2.3 Metodologia.....	31
2.3.1 Analisi dati.....	31
2.3.2 Incertezza delle proiezioni.....	32
2.3.3 Indici climatici.....	32
2.4 Risultati.....	33
2.4.1 Temperatura.....	33
2.4.2 Precipitazione.....	35
2.4.3 Eventi estremi.....	37
2.5 Conclusioni.....	39
Bibliografia.....	40

1 Climatologia attuale in Veneto

1.1 Analisi dei dati meteoroclimatici

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.

Per caratterizzare il clima regionale ed individuarne eventuali trend in atto si analizzano i dati delle stazioni meteorologiche automatiche di ARPAV a partire dal 1993 e fino al 2021/2022 in modo da avere 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. Da qui nasce l'esigenza di adottare il 1993 come anno di inizio delle elaborazioni, in modo da poter riportare in forma spaziale le informazioni raccolte per le diverse fasce climatiche del Veneto e poter trattare i dati in forma aggregata su scala regionale.

Le stazioni termo-pluviometriche attualmente attive in Regione sono poco più di 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 aggiunge 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 Koeppen),

- areale sud-europeo ove domina l'influsso degli anticicloni subtropicali e del mare Mediterraneo (clima "Csa" di Koeppen).

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. A 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. A 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'innescò 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 anticiclone 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 anticiclone 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 Koeppen 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 (massimi pluviometrici in primavera e soprattutto in autunno), manifesto, anche se più attenuato, in pianura. 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 Koeppen 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 e dove le precipitazioni possono spesso assumere 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 Koeppen 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

La precipitazione

La mappa della precipitazione cumulata media annua (Figura 1), valutata considerando i dati dell'ultimo trentennio 1993-2021, mostra la distribuzione spaziale degli apporti pluviometrici sull'intera Regione. Vi è una notevole diversità tra gli appena 650 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.

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 negli ultimi 30 anni, dal 1993 al 2022, registra mediamente i minori apporti pluviometrici se confrontata con le altre stagioni. La fascia prealpina si mantiene la più piovosa, con punte di 430 mm, allo stesso modo il Polesine risulta la località meno piovosa, con un minimo di 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.

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 160 mm della parte più a sud della Regione, ai 320 mm, il doppio, mediamente cumulato 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 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 210 mm, a sud, ad un massimo attorno ai 370 mm sulla pedemontana orientale, valore paragonabile a quanto cumulato sulle Dolomiti settentrionali. Gli apporti maggiori, fino a 800 mm, si raggiungono sulla barriera prealpina.

Precipitazione cumulata annua Media 1993-2021

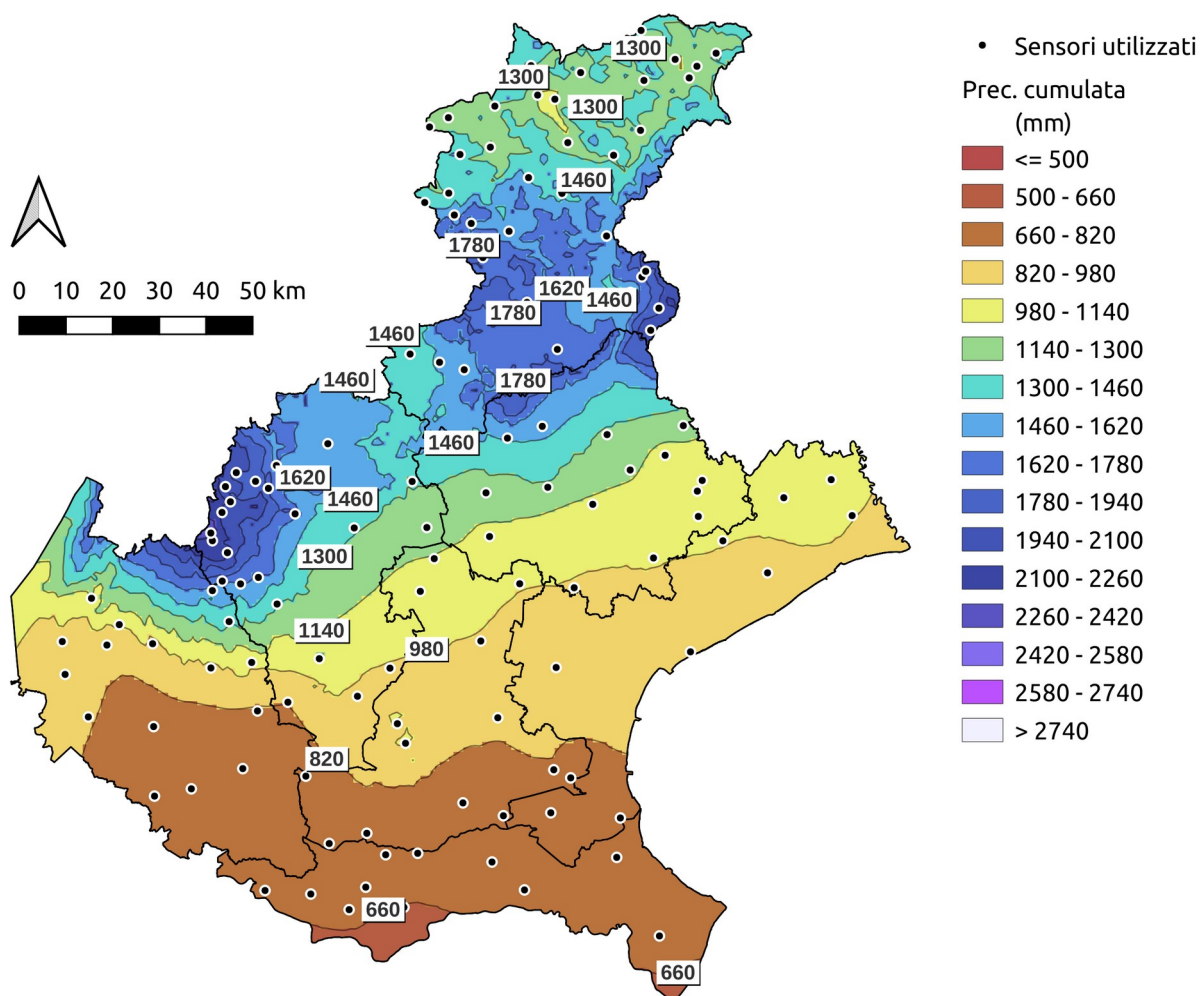


Figura 1: Precipitazione cumulata media annua sul Veneto valutata sul periodo 1993-2021. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, spazializzati annualmente con Universal Kriging e raggruppati sul trentennio.

Precipitazione cumulata stagionale Media 1993-2022

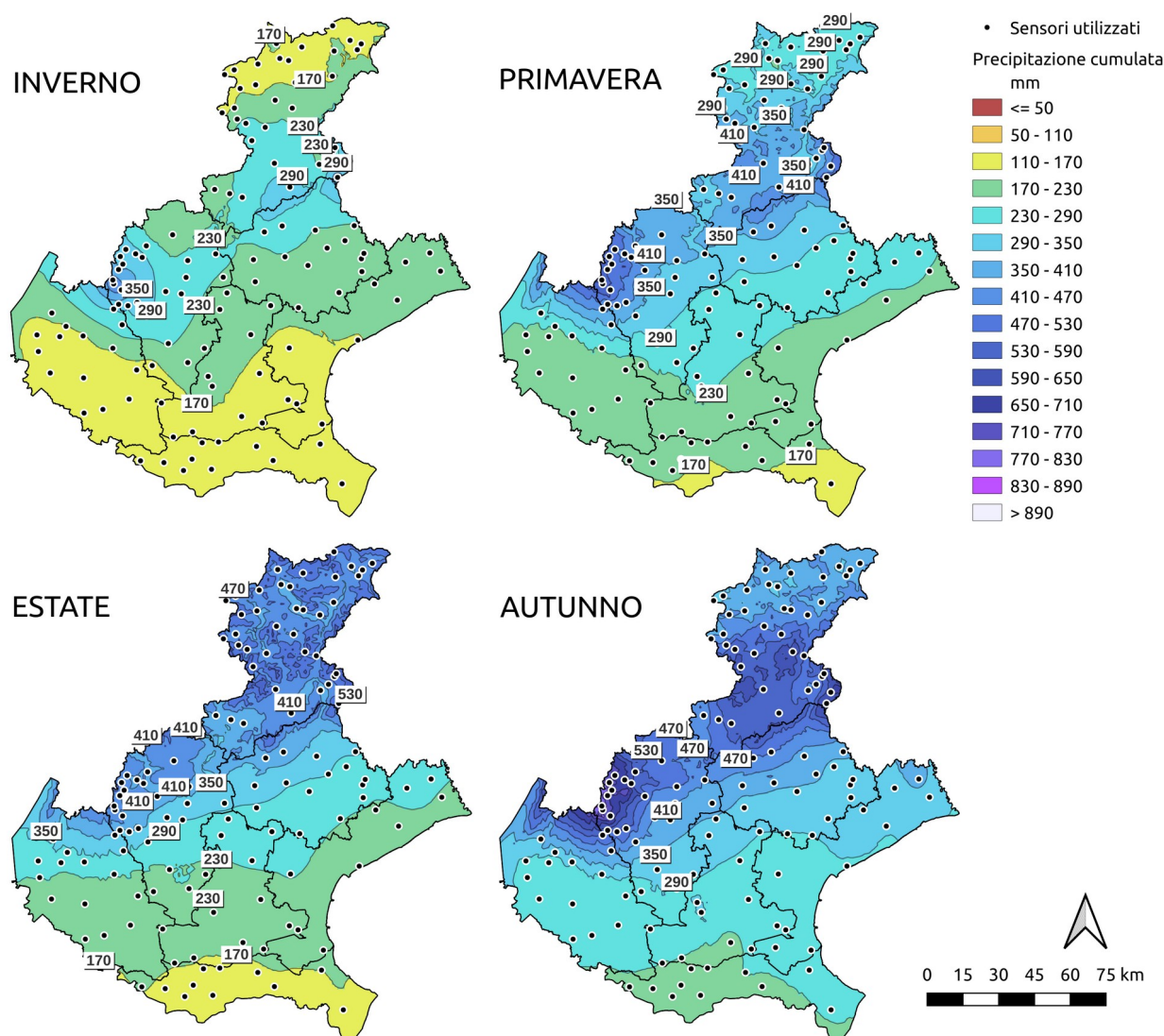


Figura 2: Precipitazione cumulata media stagionale sul Veneto valutata sul trentennio 1993-2022.

La temperatura

La mappa della temperatura media annua (Figura 3) sul Veneto è ottenuta considerando i dati dell'ultimo trentennio 1993-2021 delle stazioni automatiche con sensore di temperatura posto a 2 m di altezza dal suolo. 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 ottenute dalla media dell'ultimo trentennio e qui 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 pedemontana orientale e la zona del Lago di Garda (+13.5/14.0 °C), la laguna con l'area costiera meridionale (+13.8/14.2 °C) e la pianura interna centro-meridionale (+13.5/13.7 °C); leggermente più fresca, invece, la pianura orientale

(+13.1/13.5 °C); più in quota, la Valbelluna presenta valori medi annui vicini a +10.5/11.0 °C.

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 (+0.8/1.6 °C), sulla pianura occidentale (+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 (+4.2/4.8 °C), nell'area dei Colli (+4.0/4.2 °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 1993-2022, si intuisce un'analogia distribuzione delle temperature, seppur con qualche differenza. 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 ad 1 °C; il resto della pianura interna, più fredda, si differenzia in una zona di pianura centrale e meridionale 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.

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 (+23.6/24.0 °C); seguono l'area costiera (+23.4/23.7 °C) e la pianura centrale (+23.0/23.4 °C); più fresca invece la pianura orientale (+22.8/23.1 °C). Analogamente le temperature massime estive (Figura 6) mediate sull'ultimo trentennio segnalano i valori più alti, oltre 30 °C, sulla pianura sud-occidentale; tra 29 e 30 °C sulla pianura centro-orientale e tra 28 e 29 °C sulla costa, mitigata dalla presenza del mare.

Temperatura media annua periodo 1993-2021

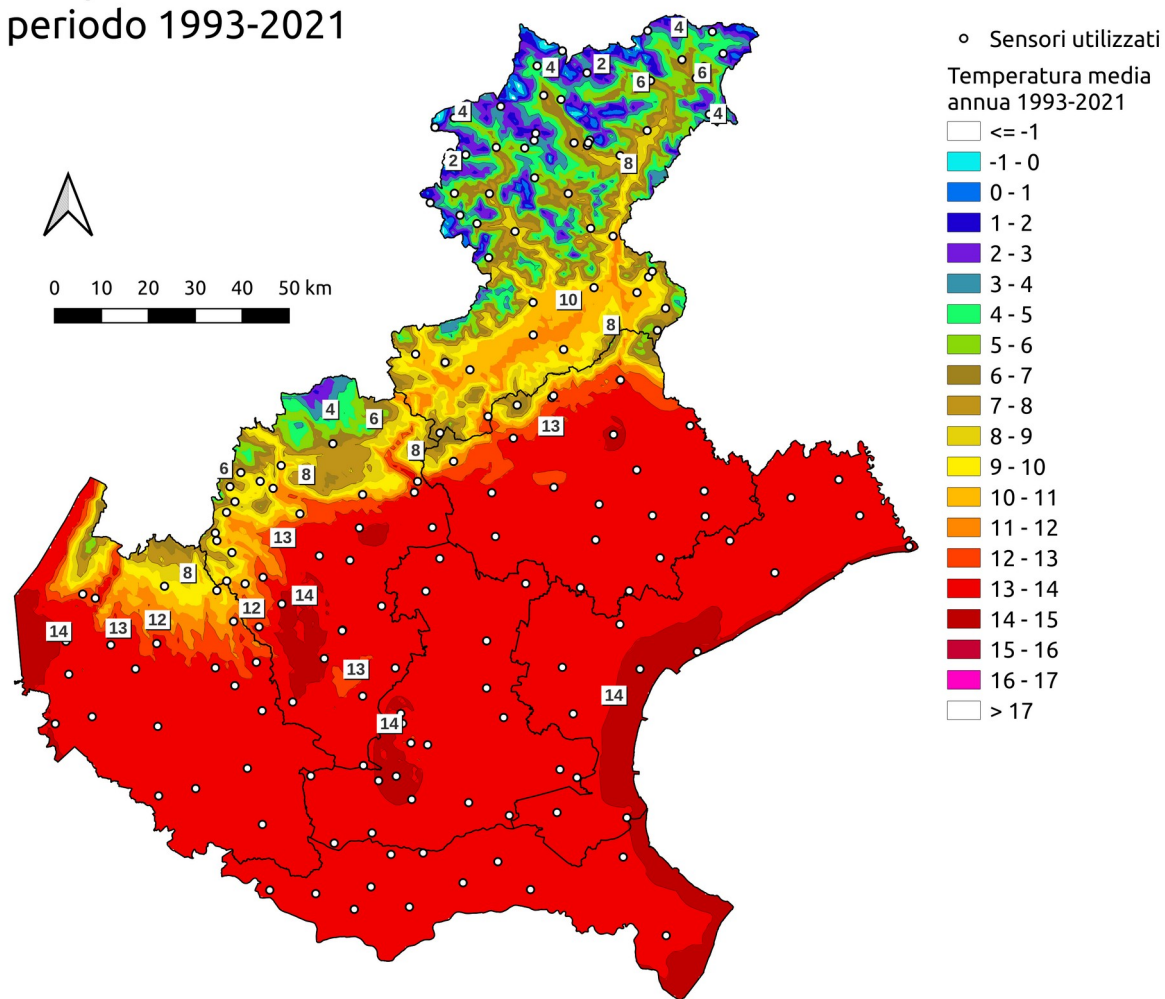


Figura 3: Temperatura media annua sul Veneto valutata sul periodo 1993-2021. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, spazializzati annualmente con Universal Kriging, utilizzando come predittore il valore della quota dato dal modello digitale del terreno, e raggruppati sul trentennio.

Temperatura media stagionale
Media 1993-2022

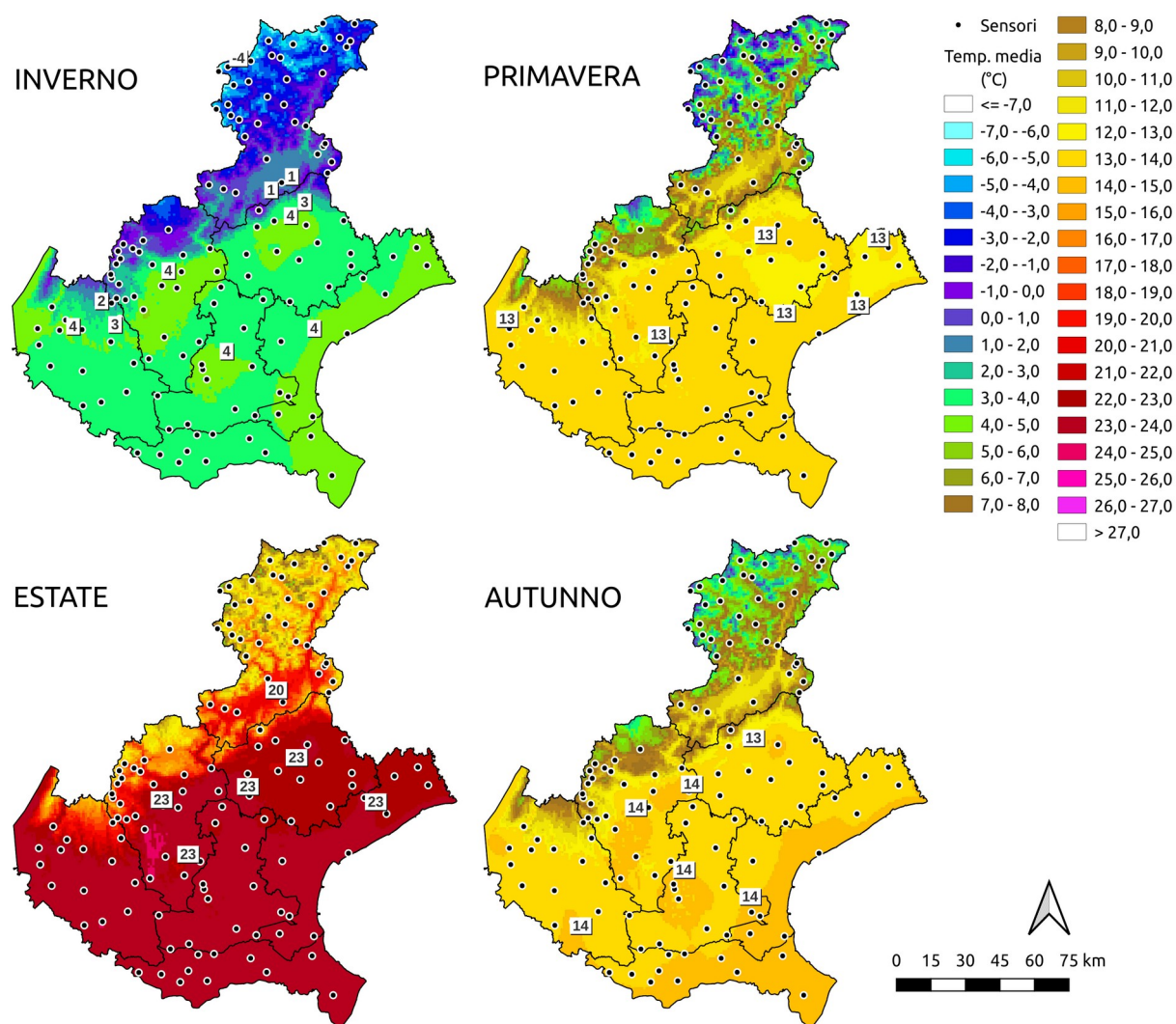


Figura 4: Temperatura media stagionale sul Veneto valutata sul trentennio 1993-2022.

Temperatura minima invernale periodo 1993-2022

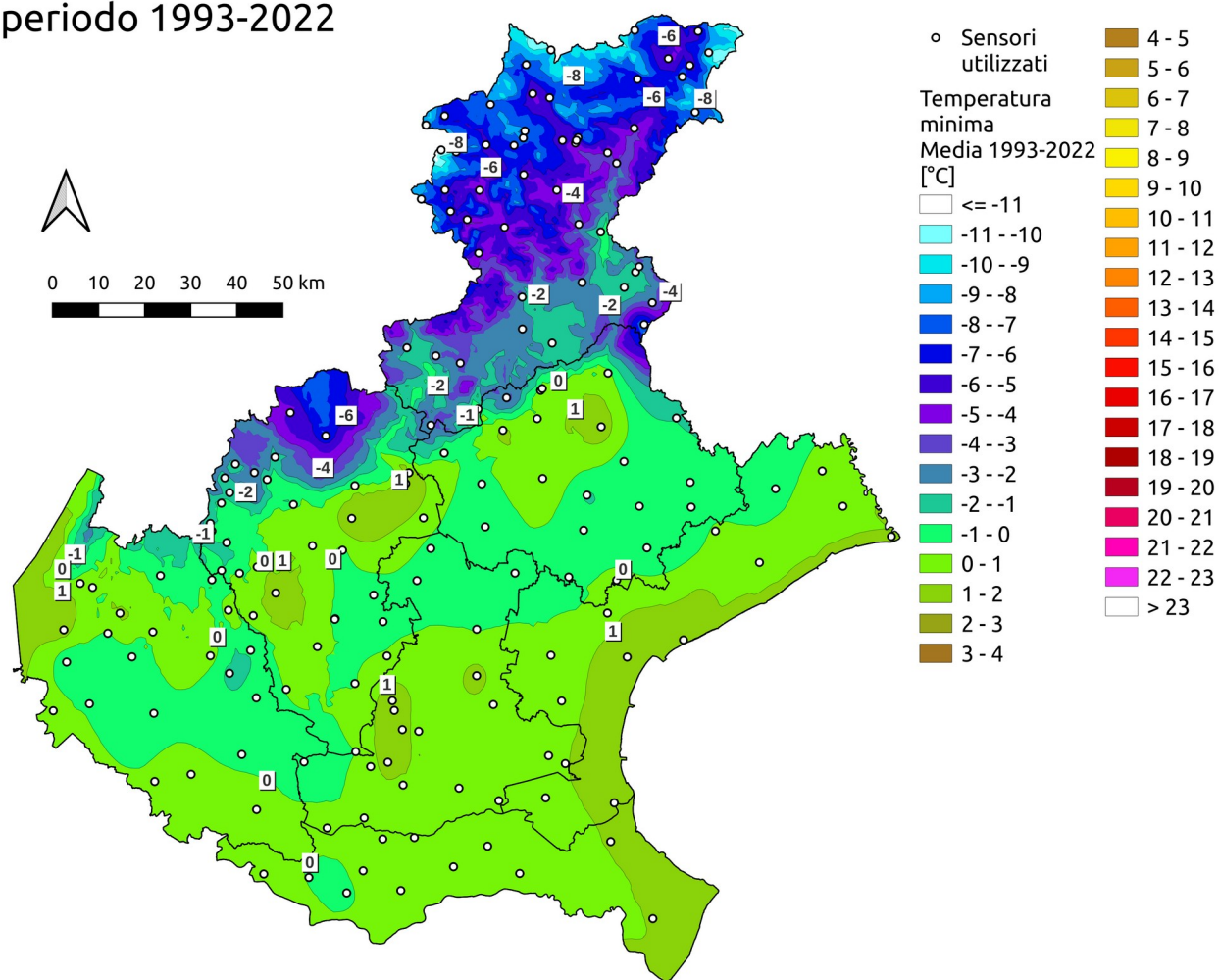


Figura 5: Temperatura minima invernale (dicembre, gennaio e febbraio) mediata stagionalmente sul Veneto e valutata sul trentennio 1993-2022.

Temperatura massima estiva periodo 1993-2022

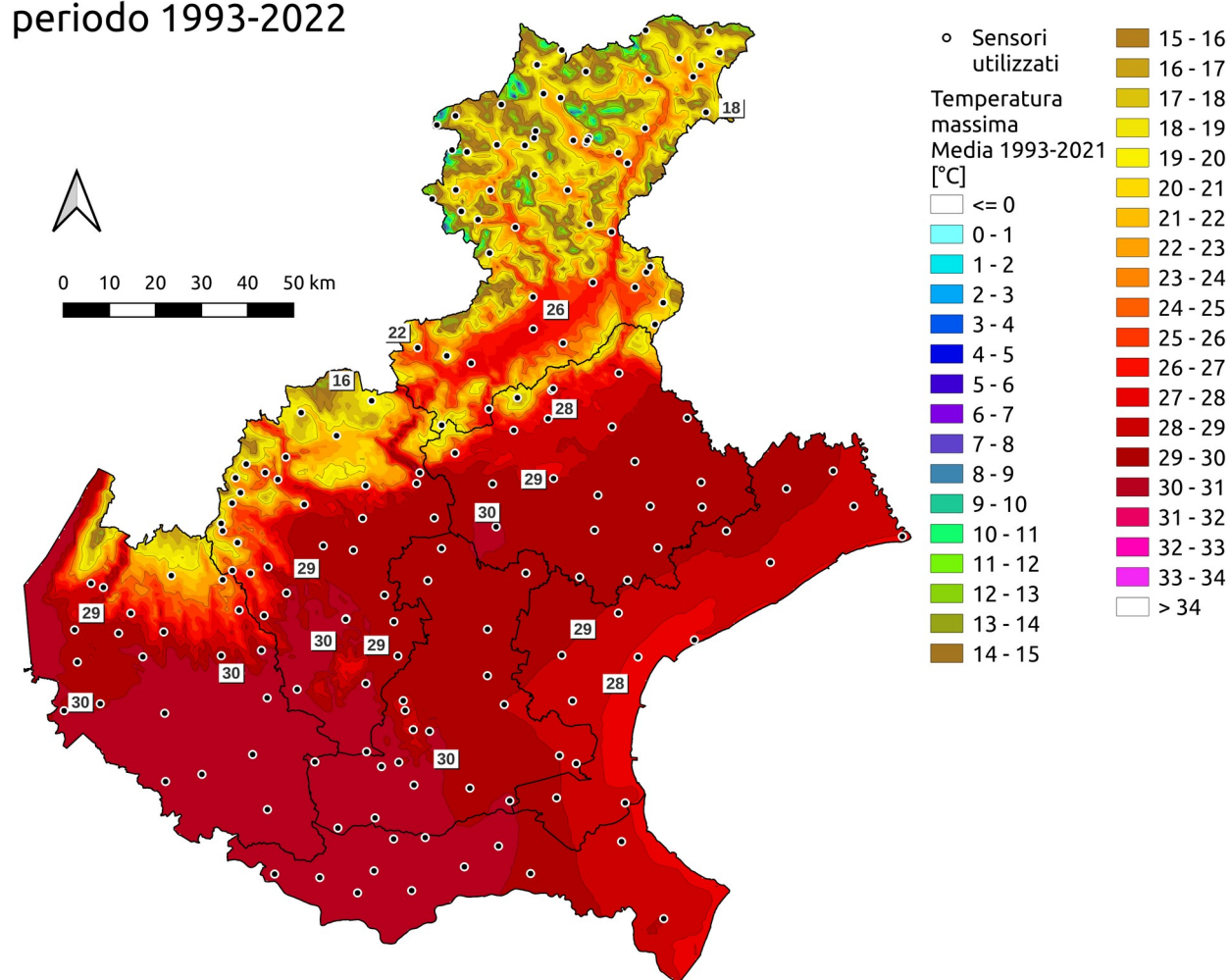


Figura 6: Temperatura massima estiva (giugno, luglio e agosto) mediata stagionalmente sul Veneto e valutata sul trentennio 1993-2022.

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 5 o 10 m rispetto al piano campagna. La scelta di limitare l'analisi agli anni dal 2017 al 2021 è dovuta alla carenza di dati nel passato, in particolare per la pianura e la costa. Le misure del vento medio campionate a 5 m dal suolo sono state convertite in valori validi per i 10 m utilizzando la legge logaritmica e impostando la rugosità a 0.0354, 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.

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 siano ostacoli orografici nelle vicinanze; dal mare sulla linea costiera se in regime di brezza; e da sudovest sulle stazioni poste in vetta (Marmolada – Punta Rocca 3250 m s.l.m. e Monte Cesen 1552 m s.l.m.).

Velocità del vento, media annua periodo 2017-2021 sotto i 500 m s.l.m.

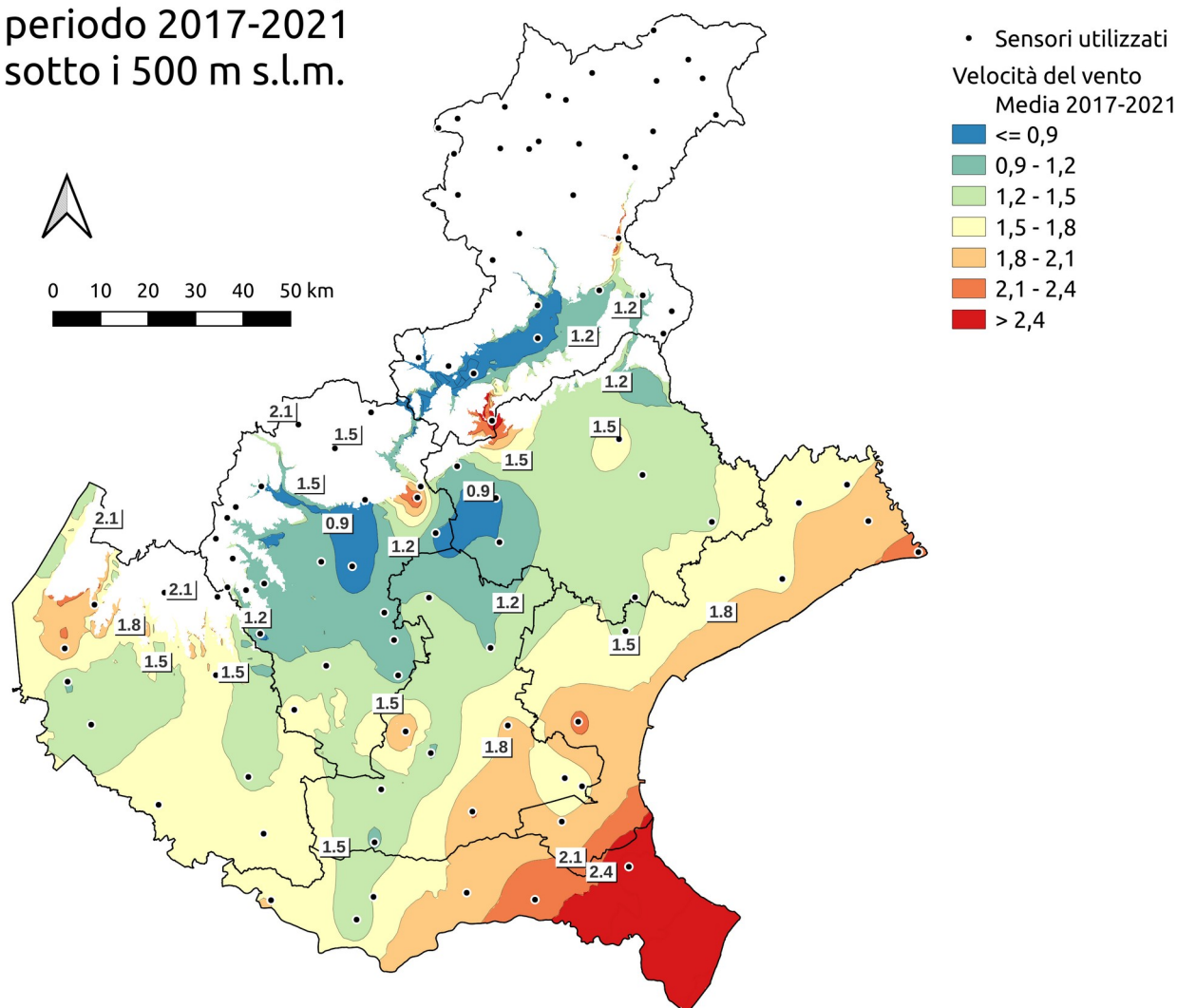


Figura 7: Intensità del vento media scalare annua sul Veneto valutata sul periodo 2017-2021 e riportata per le aree al di sotto dei 500 m s.l.m. L'immagine è ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni automatiche ARPAV evidenziate, con sensori posti a 5 e 10 m.

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 aeree 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 oltre 0.5 °C per decennio. Trend maggiore ai + 0.33 °C per decennio stimati, sullo stesso periodo, dal NOAA per le terre emerse a livello globale.

Trend della temperatura media

La mappa in Figura 8 mostra la distribuzione spaziale sul Veneto del trend delle temperature medie annue, valutato dal 1993 al 2021. 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 di crescita della temperatura media annua è grossomodo omogeneo su tutta la Regione, vale mediamente + 0.52 °C per decennio, ed è statisticamente significativo per la quasi 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.

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 e in autunno con rispettivamente + 0.76 °C e + 0.65 °C per decennio. Minore e non statisticamente significativo è invece il trend di inverno e primavera, che comunque registrano un aumento delle temperature di + 0.44 °C e + 0.36 °C per decennio.

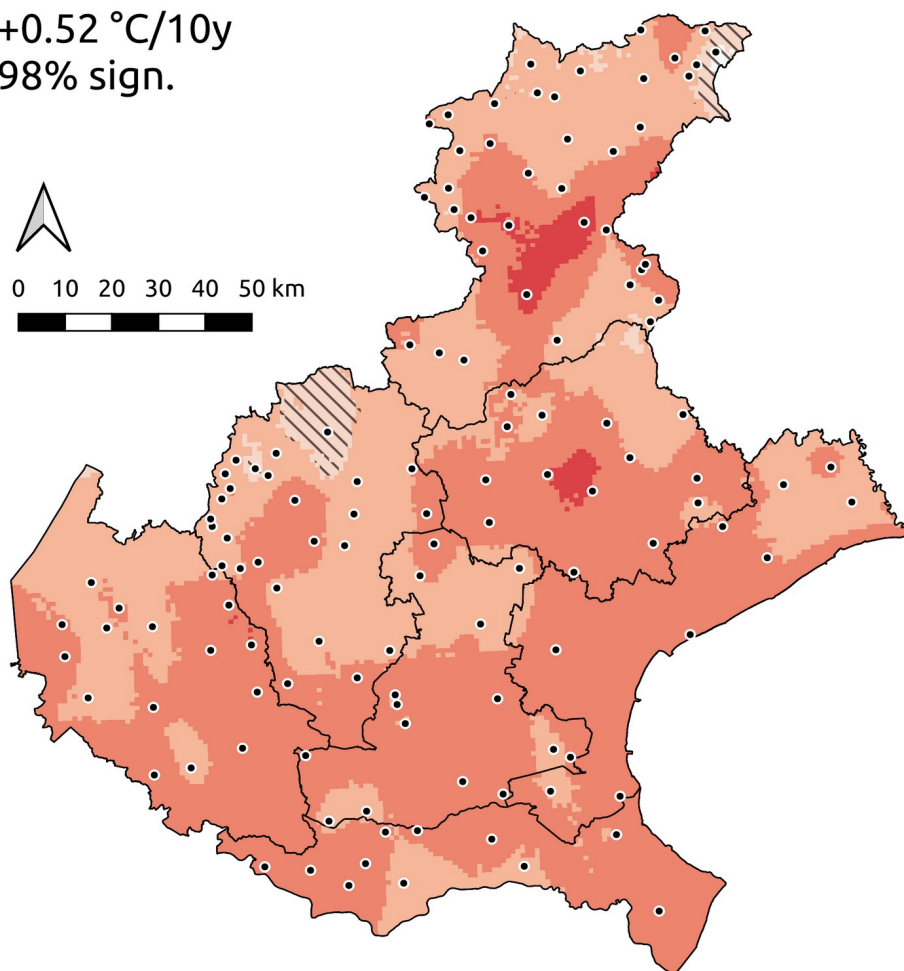
I grafici a barre riportati in Figura 11 per ogni stagione meteorologica dettagliano l'andamento della temperatura media aggregata a livello Regionale. I valori di estate ed autunno seguono fedelmente il trend lineare, pur con variazioni interannuali; le medie decennali delle temperature primaverili, invece, non mostrano variazioni significative; il grafico delle temperature invernali non evidenzia un trend statisticamente significativo ma l'ultimo decennio mostra un salto di oltre + 1 °C rispetto ai due decenni precedenti, mediamente in linea.

Temperatura media annua Trend decennale nel periodo 1993-2021

+0.52 °C/10y
98% sign.

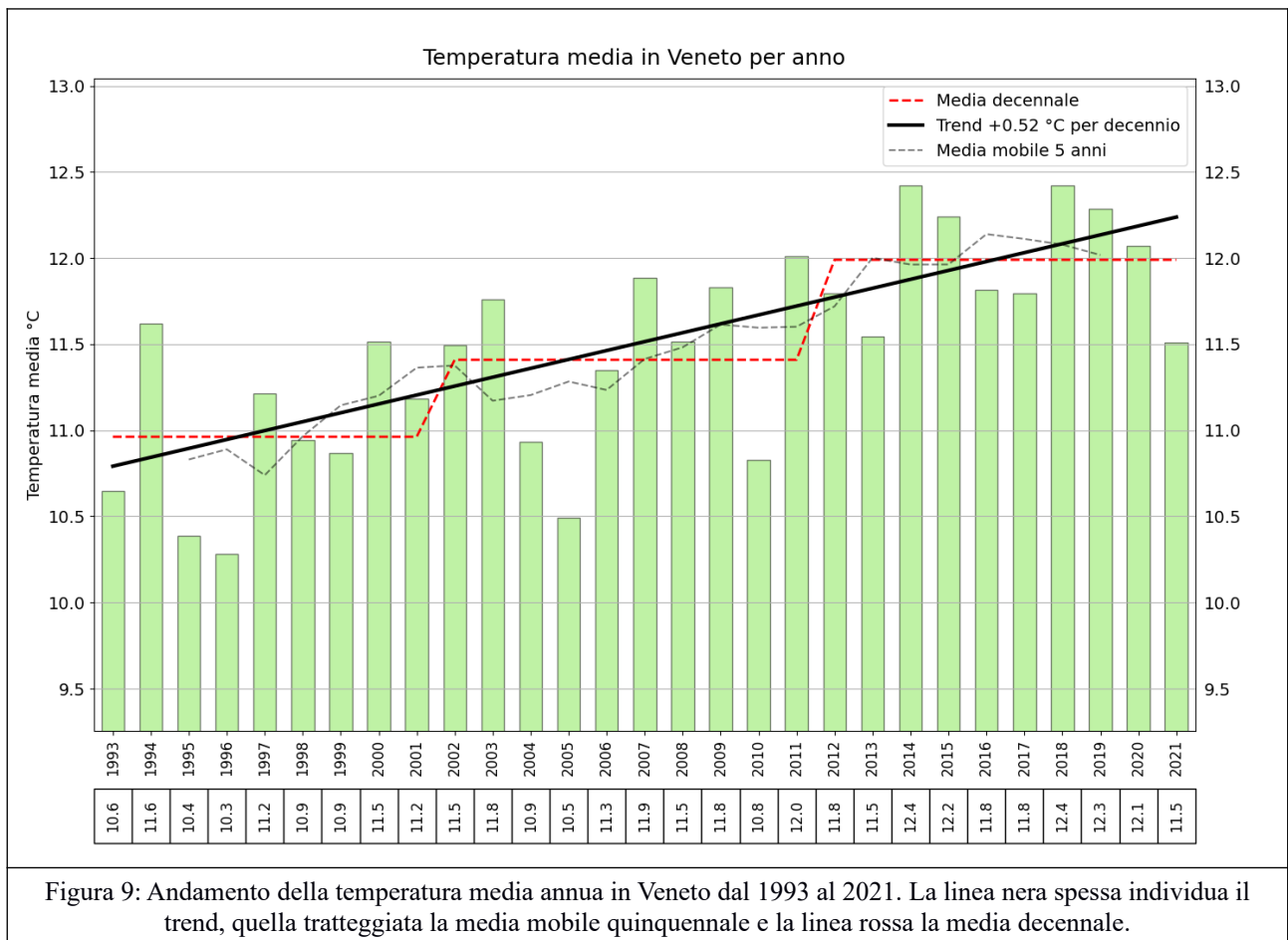


0 10 20 30 40 50 km



- Sensori utilizzati
- Trend
 - Stat. significativo
 - Non stat. sign.
- Trend decennale (°C/10y)
 - ≤ -0,9
 - -0,9 - -0,7
 - -0,7 - -0,5
 - -0,5 - -0,3
 - -0,3 - -0,1
 - -0,1 - 0,1
 - 0,1 - 0,3
 - 0,3 - 0,5
 - 0,5 - 0,7
 - 0,7 - 0,9
 - > 0,9

Figura 8: Trend decennale della temperatura media annua in Veneto, valutato dal 1993 al 2021.



Temperatura media stagionale
Trend decennale e significatività statistica 1993-2022

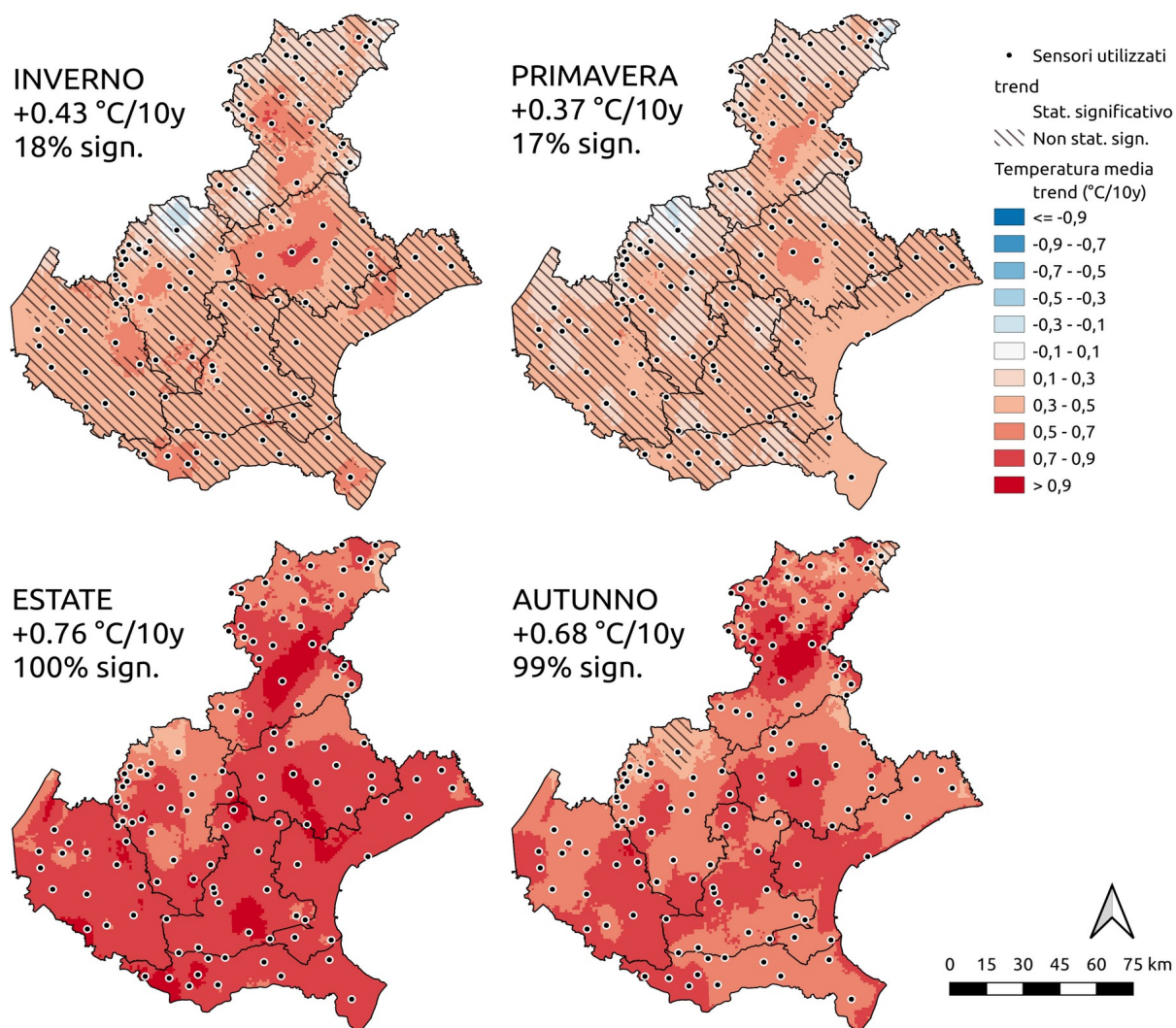
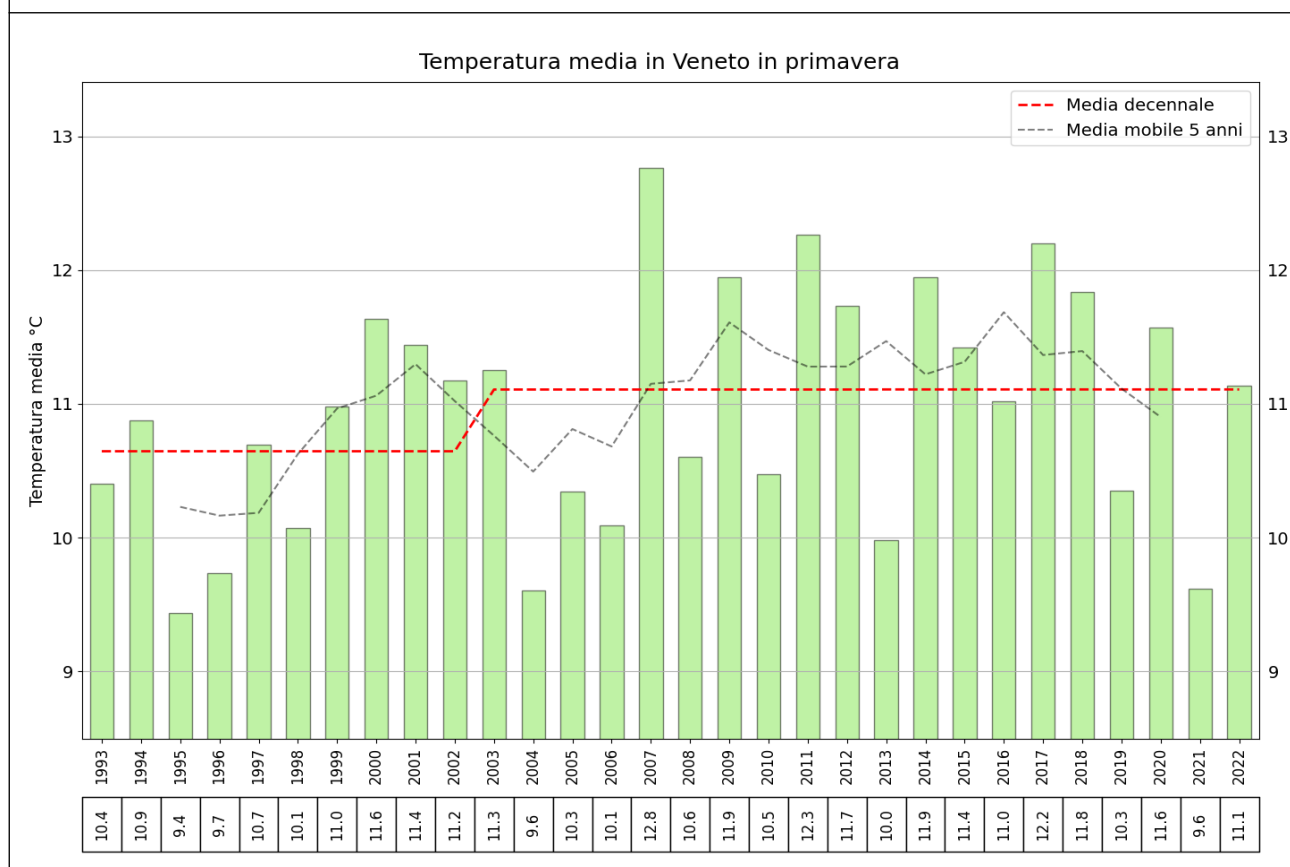
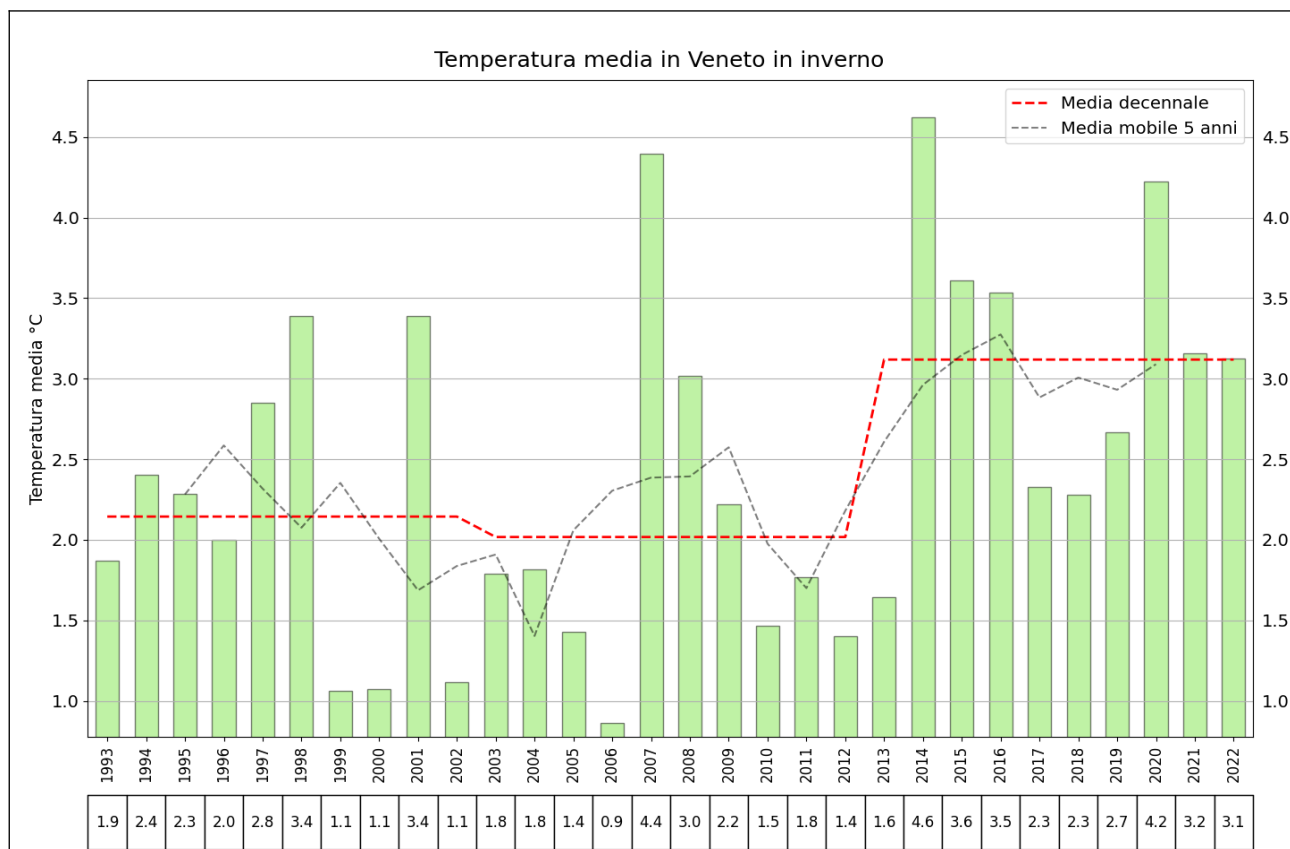


Figura 10: Trend decennale della temperatura media stagionale in Veneto, valutato dal 1993 al 2022.





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 13) 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.

Appare invece una spiccata variabilità interannuale che viene riportata nei grafici, assieme alla cumulata di precipitazione, rappresentata dalla deviazione standard valutata su decennio mobile. Questa risulta in aumento con un trend valutato 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.

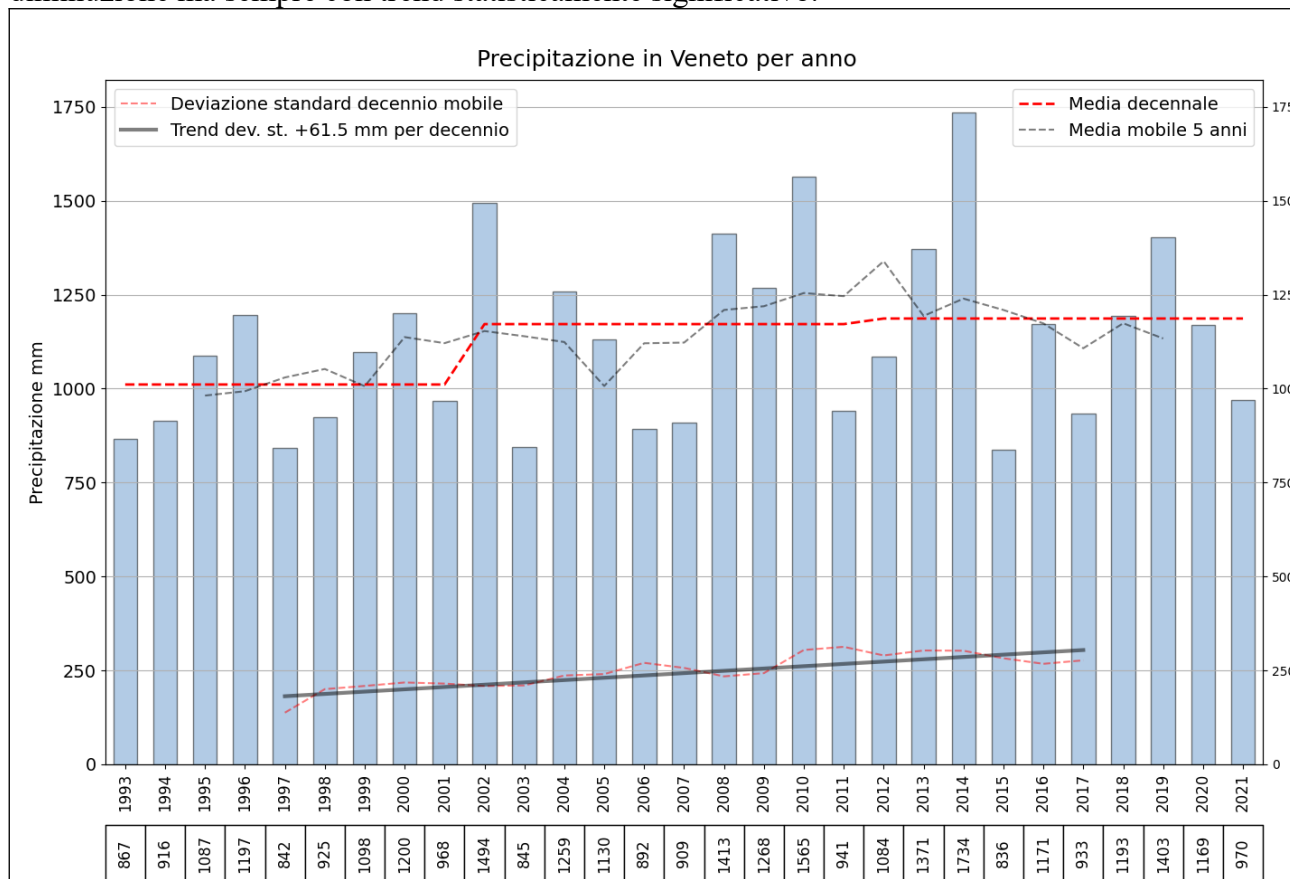
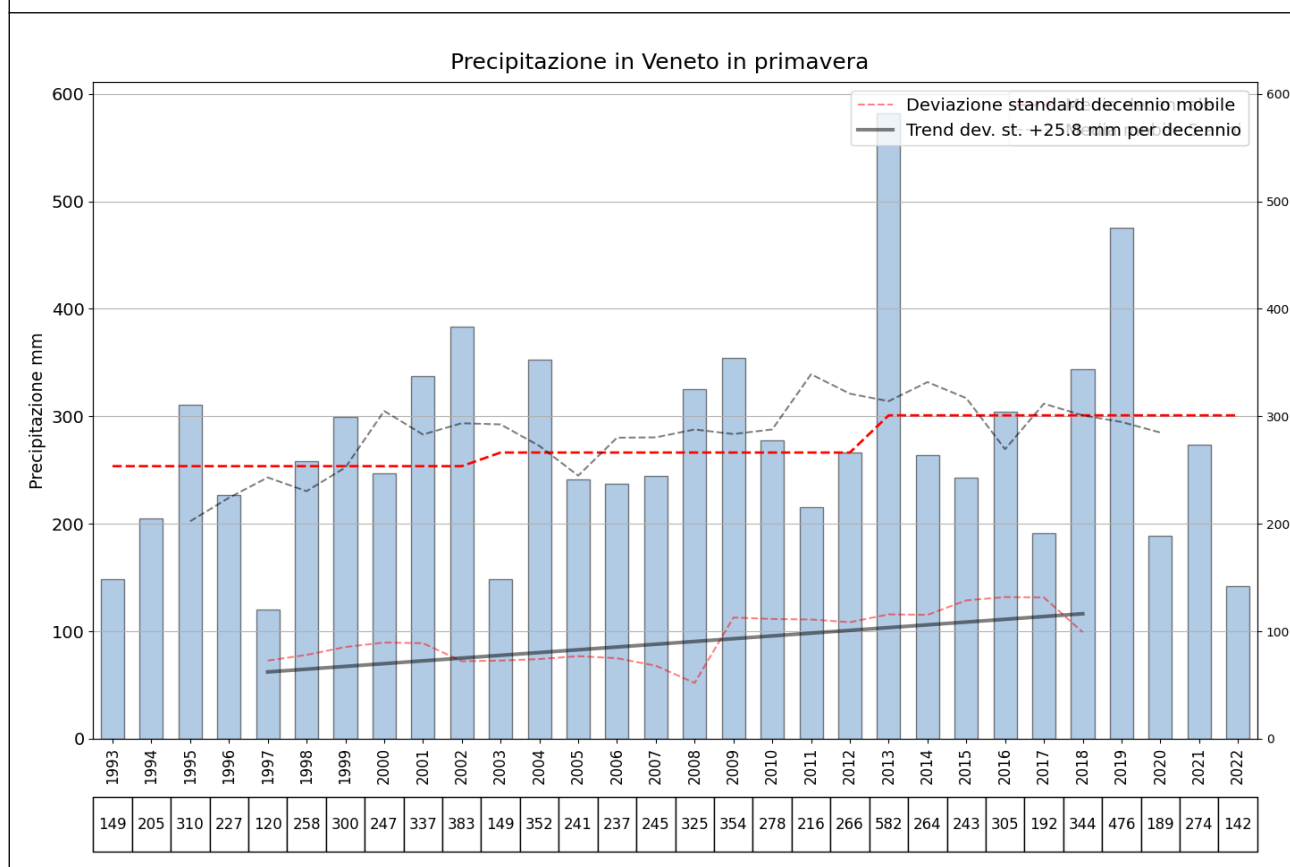
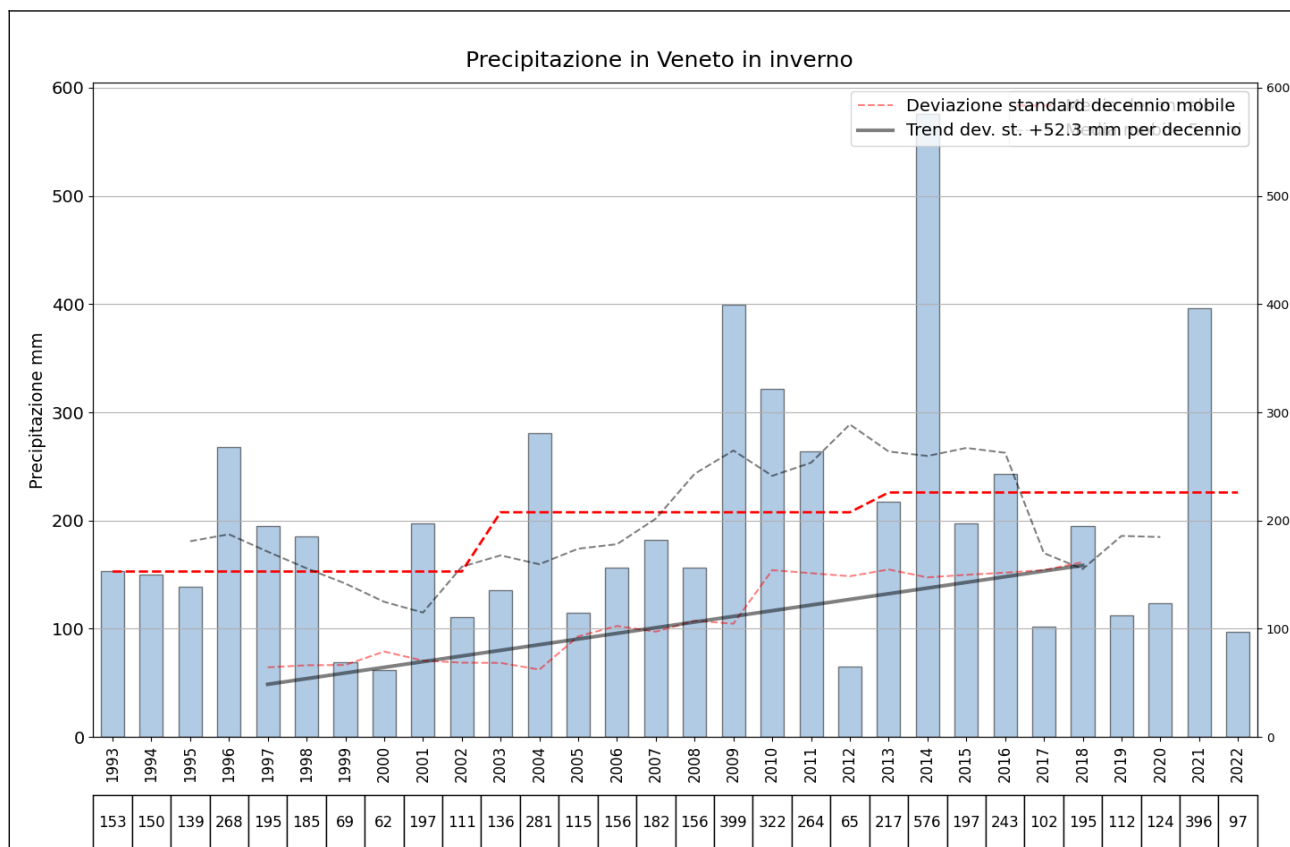


Figura 12: Andamento della precipitazione cumulata media annua in Veneto dal 1993 al 2021. La linea nera spessa individua il trend, quella tratteggiata la media mobile quinquennale, la linea rossa spessa la media decennale e quella tratteggiata la media mobile decennale della deviazione standard.



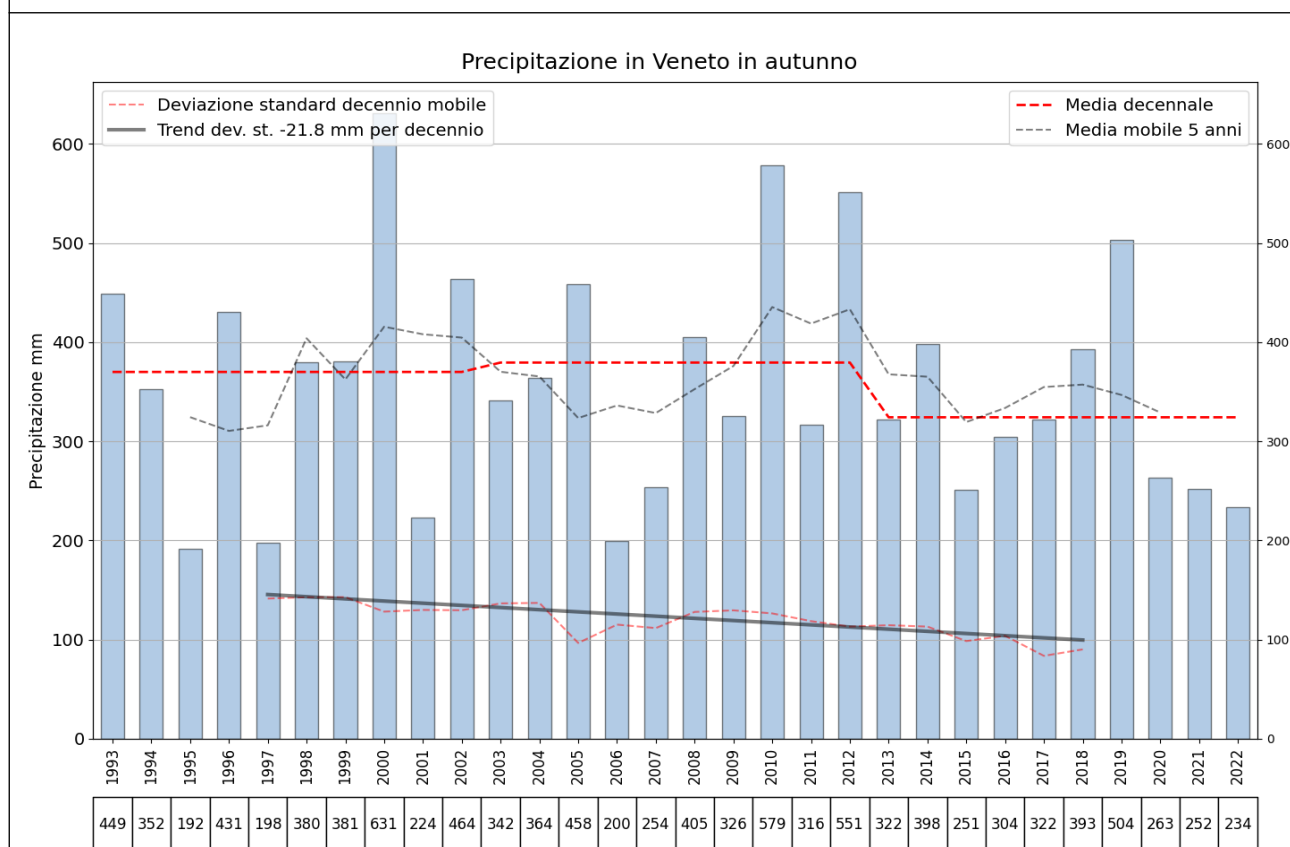
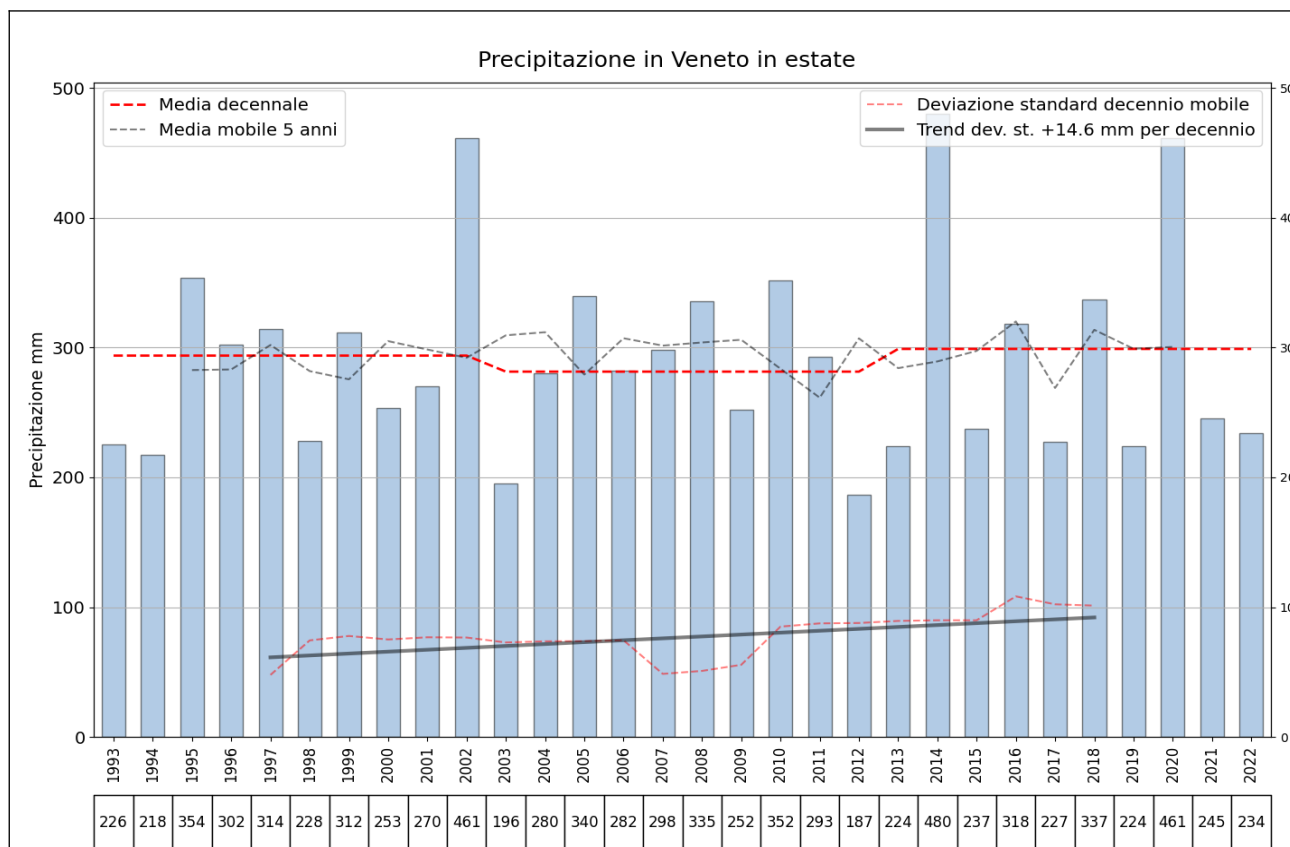


Figura 13: Andamento della precipitazione cumulata media stagionale in Veneto dal 1993 al 2021/2022. La linea nera spessa individua il trend, quella tratteggiata la media mobile quinquennale, la linea rossa spessa la media decennale e quella tratteggiata la media mobile decennale della deviazione standard.

Analisi delle anomalie dell'ultimo decennio rispetto al periodo 1993-2012

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 (2013-2021/2022) rispetto ai valori mediamente registrati durante i precedenti venti anni, dal 1993 al 2012. Vengono appaiate a livello annuale (Figura 14) e stagionale (Figura 15) le differenze assolute per la temperatura e percentuali per la precipitazione.

Questa analisi evidenzia un forte aumento delle temperature medie annue che in media vale $+0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ed è generalizzato su tutta la Regione. Anche a livello stagionale, estate ed autunno hanno subito un aumento vicino al grado, in linea col trend evidenziato dall'analisi annuale. L'inverno, pur non mostrando un trend significativo, qui mostra l'entità della discontinuità che ha caratterizzato l'ultimo decennio rispetto al ventennio precedente. Guardando alle precipitazioni, in inverno si evidenzia un aumento delle piogge concentrato su Dolomiti e Prealpi, di minor entità su gran parte della pianura; in primavera vi è un aumento generalizzato delle piogge; parallelamente in autunno si riscontra un altrettanto generalizzata diminuzione. L'estate ha visto un aumento degli apporti sulle aree già più piovose e una diminuzione nelle aree di norma meno piovose.

Riassumendo, i segnali principali a livello annuale e stagionale emersi dal confronto dell'ultimo decennio con il ventennio precedente mostrano: anni mediamente molto più caldi e con un aumento delle precipitazioni più marcato sulle aree montuose e sulla pianura orientale; inverni molto più caldi su tutta la Regione e particolarmente piovosi sulle aree montane e di alta pianura; 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 e sulla pianura orientale ed una parallela diminuzione sulla pianura sud-occidentale; infine mesi autunnali molto più caldi e con un generalizzato calo delle precipitazioni.

Temperatura media e precipitazione cumulata annuali

Differenze dell'ultimo decennio (2013-2021)
rispetto alla media del ventennio (1993-2012)

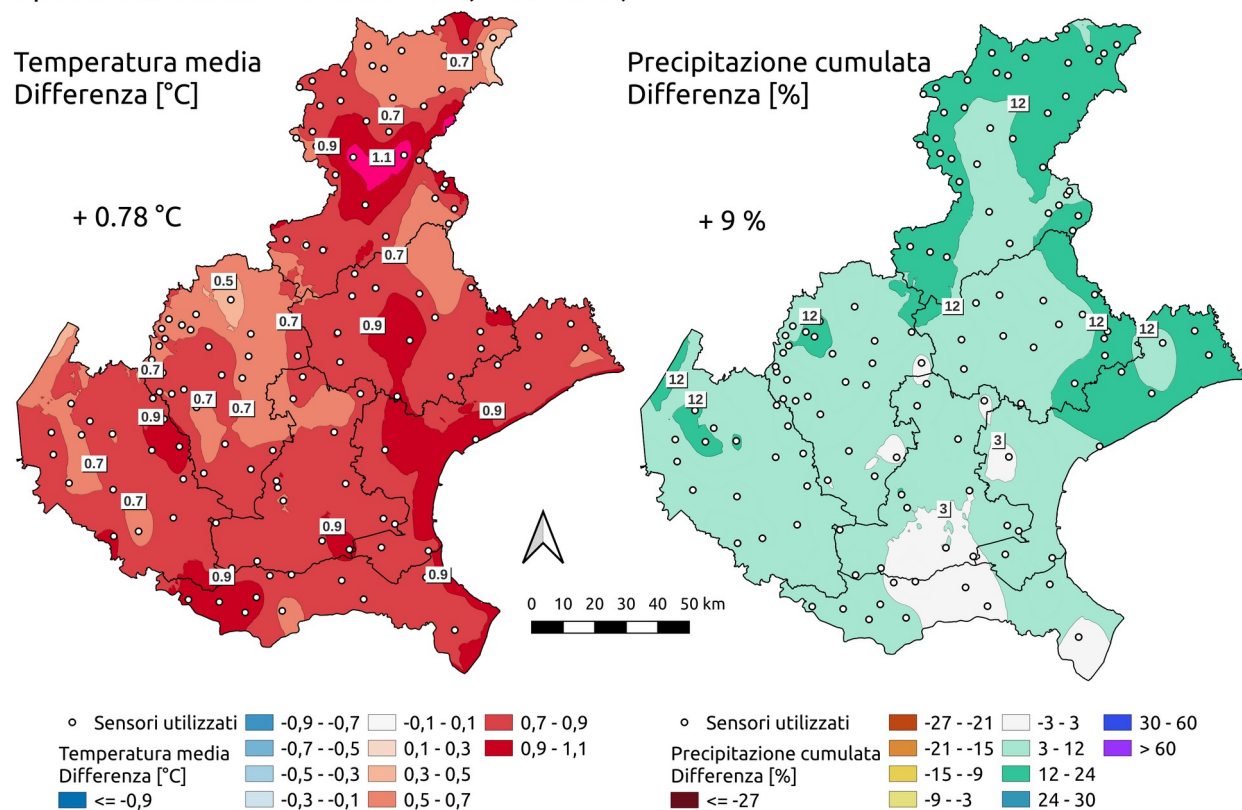


Figura 14: Differenza di temperatura media e precipitazione cumulata annue per l'ultimo decennio rispetto alla media del ventennio precedente.

Temperatura media e precipitazione cumulata stagionali

Differenze dell'ultimo decennio (2013-2022)
rispetto alla media del ventennio (1993-2012)

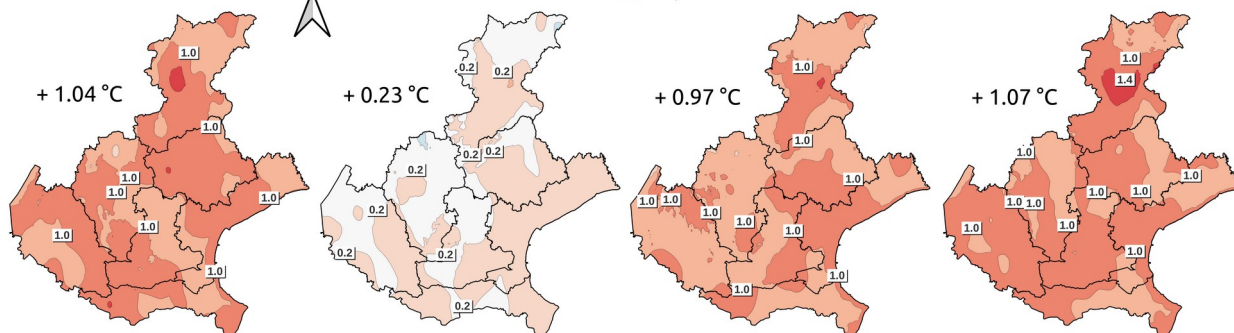
Temperatura media,
differenza [°C]

0 15 30 45 60 75 km



Temperatura media
Differenza [°C]

-1,8 - -1,4	-1,0 - -0,6	-0,2 - 0,2	0,6 - 1,0	1,4 - 1,8
-1,4 - -1,0	-0,6 - -0,2	0,2 - 0,6	1,0 - 1,4	> 1,8
<= -1,8				

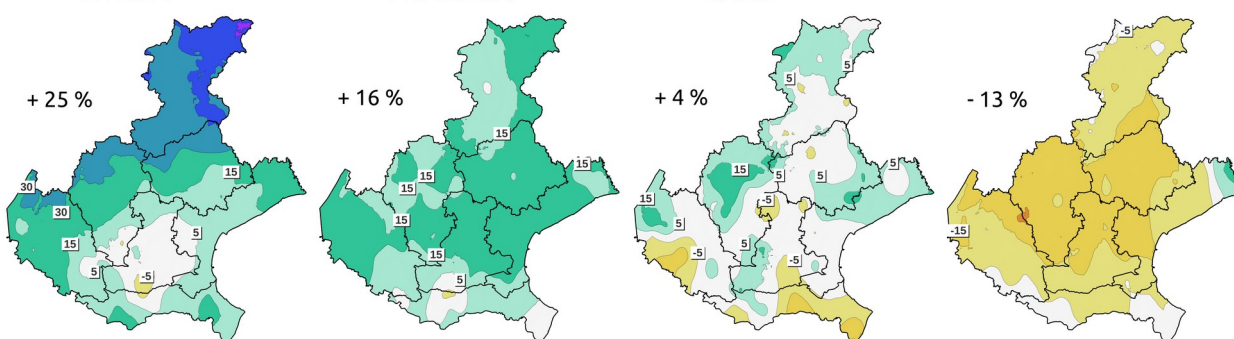


INVERNO

PRIMAVERA

ESTATE

AUTUNNO



Precipitazione cumulata,
differenza [%]

Precipitazione cumulata
Differenza [%]

-45 - -35	-25 - -15	-5 - 5	15 - 30	60 - 90
-35 - -25	-15 - -5	5 - 15	30 - 60	> 90
<= -45				

Figura 15: Differenza di temperatura media e precipitazione cumulata stagionali per l'ultimo decennio rispetto alla media del ventennio precedente.

2 Proiezioni regionali climatiche nel Nord-Est Italia

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 e ondate di calore e precipitazioni intense. 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 ($+15\%$) e una diminuzione in estate (-10%) nel futuro lontano. Il riscaldamento è maggiore nelle zone montuose e aree alpine rispetto alle zone costiere e pianeggianti. Inoltre, nelle aree montane c'è un sostanziale aumento nella durata delle ondate di calore (si raggiunge 45 giorni nel 2071-2100) e un aumento delle precipitazioni intense (fino al 140%).

2.1 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, ovverosia 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

¹ <http://www.euro-cordex.net/>

periodo di riferimento (1976-2005). Viene anche investigata l'anomalia di alcuni eventi estremi: durata delle ondate di calore (HWDI) e 95o percentile (R95pTOT) della distribuzione delle precipitazioni giornaliere.

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.

Questo studio prende spunto da uno studio analogo condotto nella regione Friuli-Venezia Giulia da ARPA FVG (Gallina e Giorgi, 2018). 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.

2.2 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/m^2), RCP4.5 (4.5 W/m^2) e RCP8.5 (8.5 W/m^2) (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.

2.3 Metodologia

2.3.1 Analisi dati

Sono state selezionate la temperatura media (tas), minima (tasmin), massima (tasmx) e precipitazione (pr) media giornaliera. Sono stati considerati gli scenari di emissione estremi, quello a basse emissioni (RCP2.6) e alte emissioni (RCP8.5). E' stato operato un regridding, utilizzando una media pesata con la distanza, su griglia regolare 0.10° (circa 12.5km) 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). E' 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.

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

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

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.

2.3.2 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 (Cubash 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).

2.3.3 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, 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.

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). Per entrambi 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 Risultati

2.4.1 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.

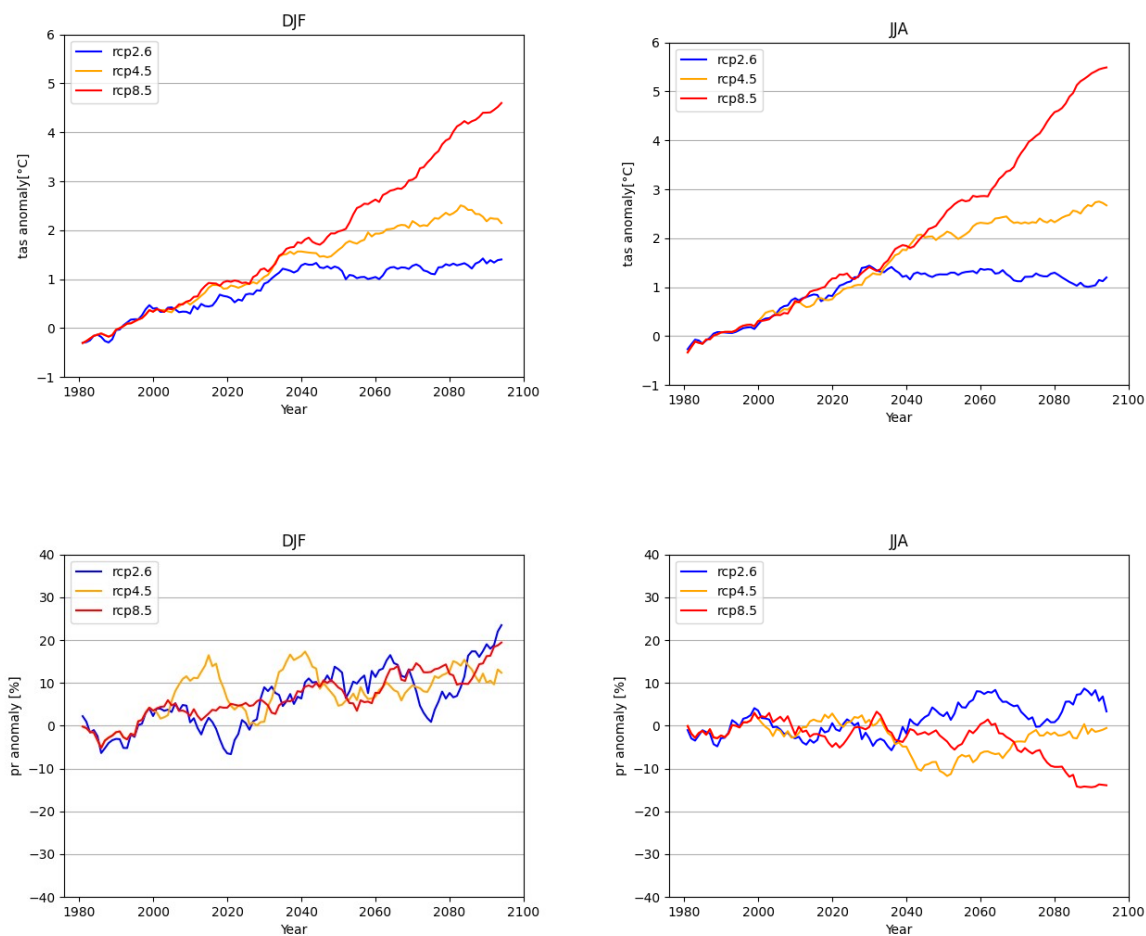


Figura 16. (Pannello superiore) Anomalia della temperatura annuale rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 per i tre scenari RCP in inverno (sinistra) ed estate (destra). I valori sono mediati su tutto il dominio spaziale considerato, rappresentano la media di ensemble e coprono il periodo dal 1976 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 presentato 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.

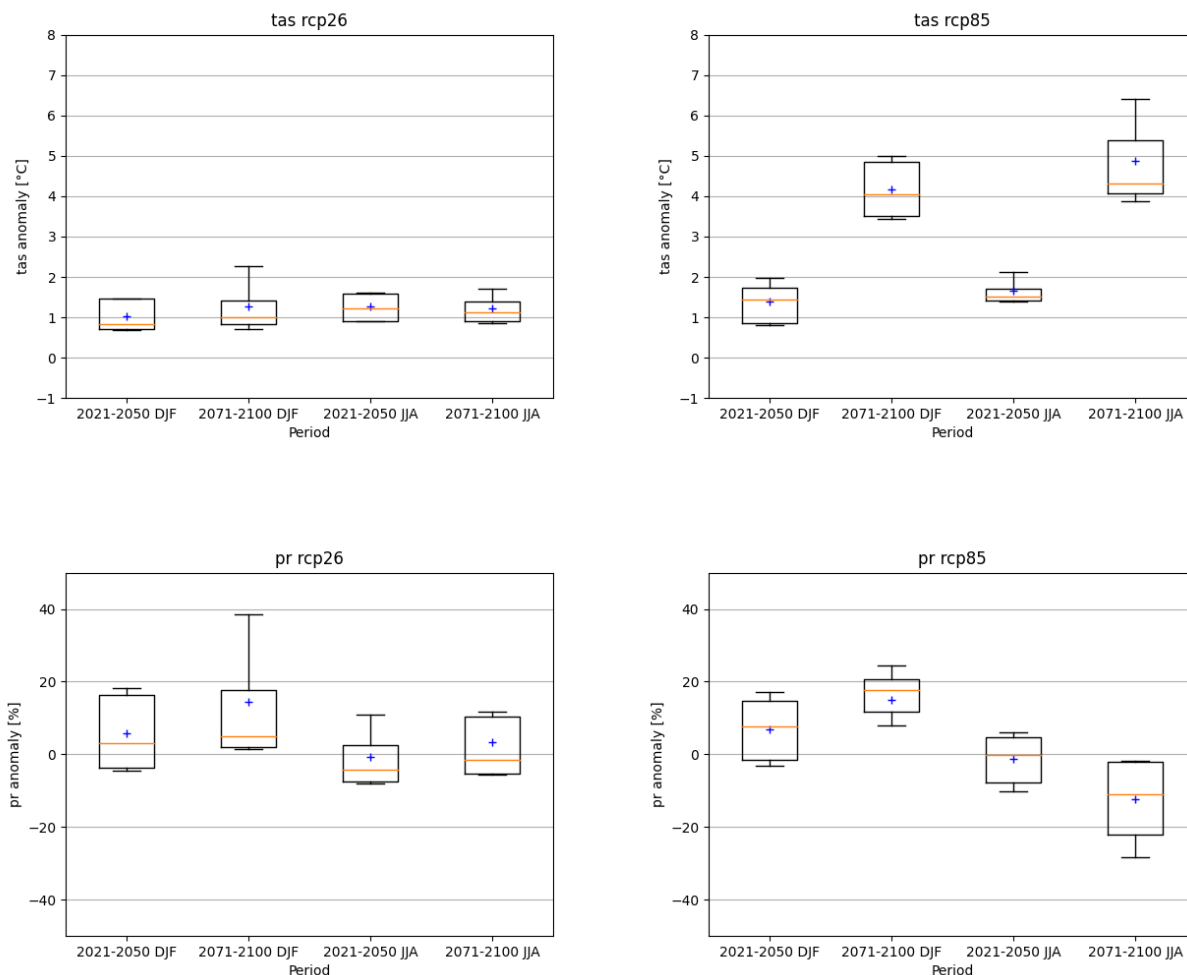


Figura 17. (Pannello superiore) Anomalie della temperatura invernale (DJF) ed estiva (JJA) per i periodi 2021-2050 e 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 nell'ensemble RCM. Il pannello di sinistra si riferisce a RCP2.6 e il pannello di destra a RCP8.5. I limiti superiore e inferiore 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 se 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. 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 e 1°C in pianura e tra 1°C e 1.5°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 con punte da 1.5°C a 2°C nelle prealpi per RCP2.6, e aumenta da 3.5°C a 4°C nelle zone costiere o pianura, e aumenta ulteriormente da 5°C a 5.5°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 da 5°C a 6°C nelle zone montuose nel futuro lontano.

2.4.2 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 -15% a -25% nell'area prealpina.

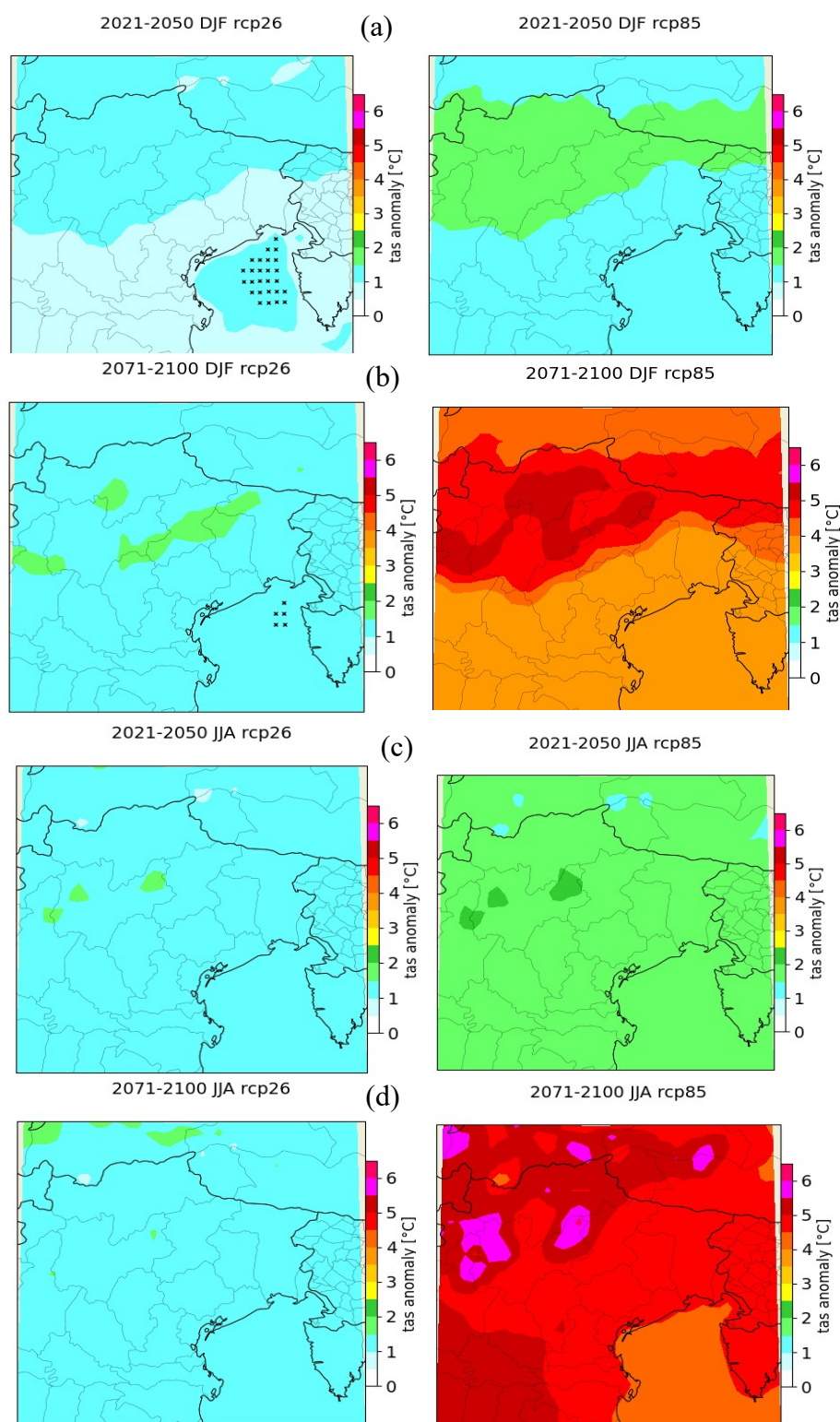


Figura 18. Distribuzione geografica dell'anomalia di temperatura in inverno per il periodo 2021-2050 (righe a) e 2071-2100 (righe b) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6/RCP8.5. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli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

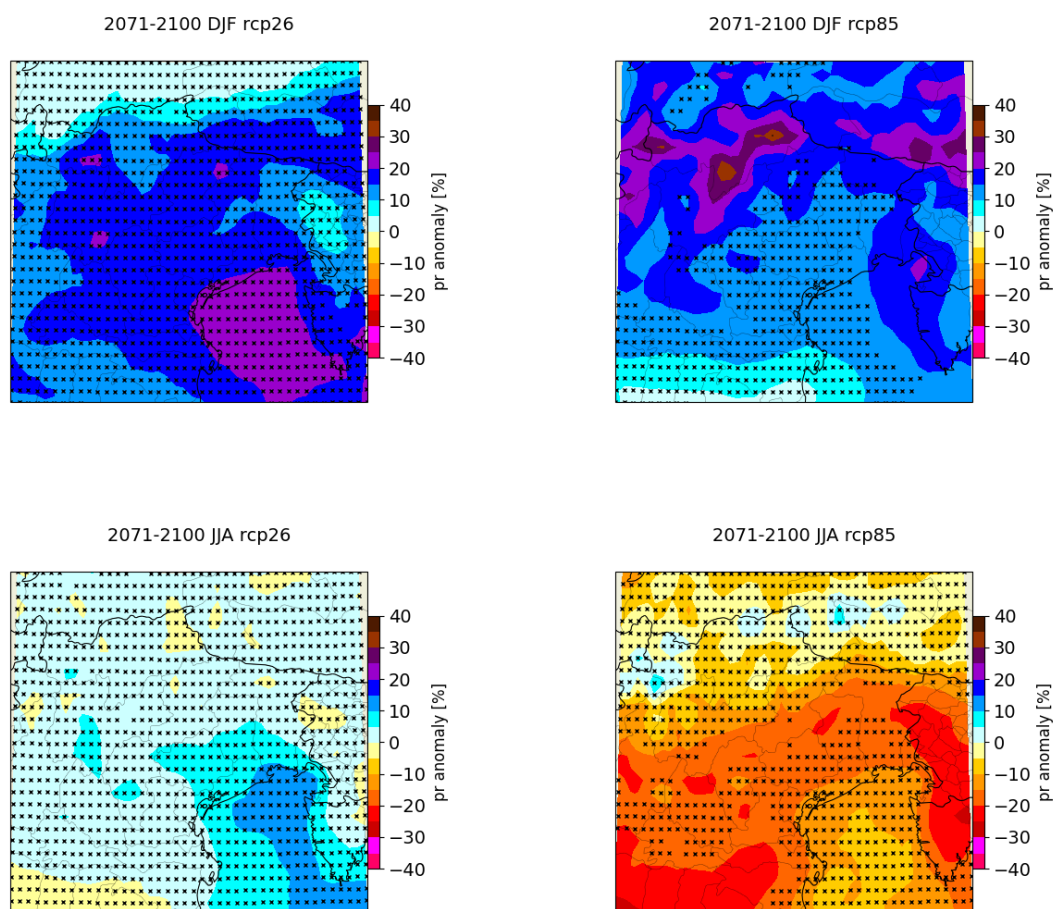


Figura 19. Distribuzione geografica dell'anomalia delle precipitazioni (unità: percentuale del valore di riferimento) in inverno (sopra) e estate (sotto) per il periodo 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6 / RCP8.5. Le croci indicano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

2.4.3 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, ad eccezione di alcune aree delle Alpi del Nord con 5-10 giorni per RCP2.6; per RCP8.5 tutte le zone pianeggianti e montane sono comprese tra 5 e 10 giorni, mentre la costa rimane tra 0 e 5 giorni. Nel 2071-2100 per RCP2.6 l'anomalia è simile al 2021-2050, ma per il RCP8.5 aumenta fortemente: 25-30 giorni nelle zone costiere, 30-35 giorni in pianura e 35-45 giorni nella zona delle Alpi.

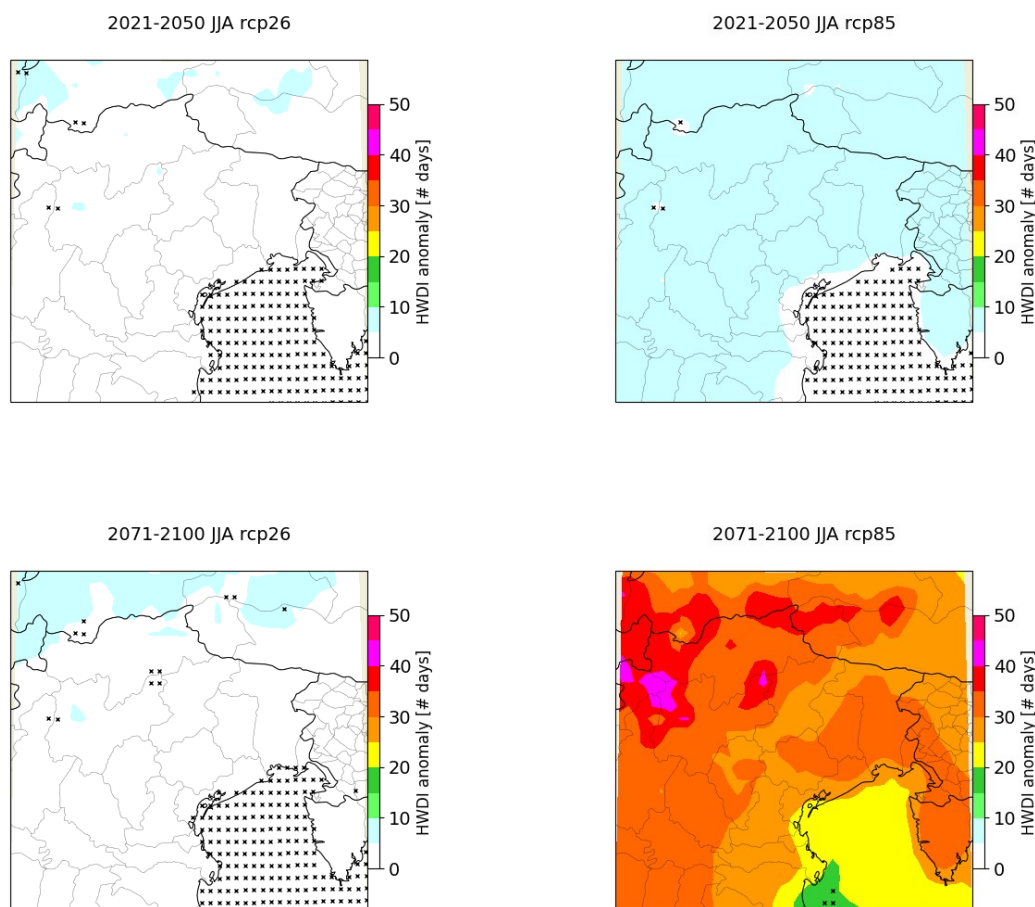


Figura 20. Distribuzione geografica dell'anomalia dell'indice di durata delle ondate di calore (HWDI) in estate per il periodo 2021-2050 (pannelli superiori) e 2071-2100 (pannelli inferiori) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6/RCP8.5. Le croci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

Per la precipitazione cumulata maggiore del 95° percentile (R95pTOT), solo l'inverno con RCP8.5 ha un buon accordo tra i modelli (Figura 21). In particolare, nel periodo 2021-2050 è presente un'anomalia R95pTOT positiva (da +20 a +40%) in un'area limitata vicino al lago di Garda. Nel futuro lontano si registra un aumento delle precipitazioni estreme nella maggior parte del dominio, dal +60 al +80% nelle zone costiere e dal +80 al +140% nelle zone alpine.

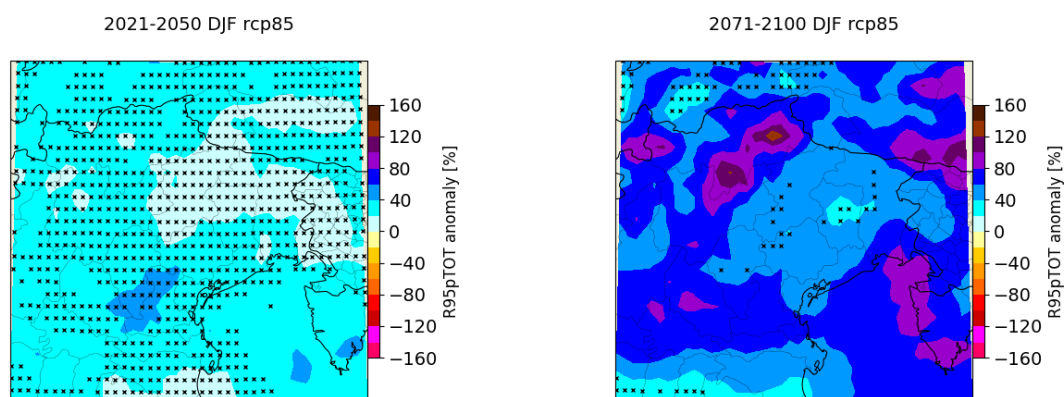


Figura 21. Distribuzione geografica dell'anomalia della precipitazione cumulata superiore al 95° percentile (R95pTOT) (unità: percentuale del valore di riferimento) in inverno per il periodo 2021-2050 (sinistra) e 2071-2100 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

2.5 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. Pertanto, 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 ondata di calore aumenta notevolmente passando dal futuro vicino al futuro lontano, specialmente nelle zone di montagna. L'anomalia HWDI è di 0-5 giorni nelle zone costiere e di 5-10 giorni nelle zone pianeggianti e montane nel 2021-2050. Cresce fino a 25-30 giorni nelle zone costiere, 30-35 giorni in pianura e 35-45 giorni nelle aree alpine nel 2071-2100.

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 (fino al -20%). L'aumento delle precipitazioni si verifica principalmente nelle aree alpine interne in inverno e la diminuzione nelle aree pianeggianti e nel versante meridionale delle Alpi in estate.

Infine, si verifica un significativo aumento delle precipitazione estreme (R95pTOT) in particolar modo considerando la stagione invernale, scenario RCP8.5 e trentennio 2071-2100, raggiungendo +80% nelle zone costiere e +140% nelle Alpi.

Bibliografia

- Coppola, E., & 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sangelantoni, L., Russo, A., and Gennaretti, F. (2019). Impact of bias correction and downscaling through quantile mapping on simulated climate change signal: a case study over Central Italy. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1-2), 725-740.
- 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.

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.