Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto

Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente

Interreg CENTRAL EUROPE

Co-funded by the European Union

Climate_CRICES

Climate_CRICES

Technical addendum

Heat and drought

Pilot action 1 - Improving climate change adaptation plans focusing on heat and drought's effects – **Veneto Region pilot area**

Version	V_10.27
Date	October 2026
Prepared by	Fabio Zecchini (ARPAV), Francesco Rech (ARPAV), Giovanni Massaro (ARPAV), Stefano Micheletti (ARPAV)
Contributing partners	LP01 Veneto Region – PP02 ARPAV

Document information

Project	Climate_CRICES - Increasing Climate Change Resilience in Central Europe
Project number	CE0200728
Pilot action	Pilot action 1 – Improving climate change adaptation plans focusing on heat and drought's effects
Geographic scope	Veneto Region
Climate change effect	Heat and drought's effects
Related plan or process	SRACC, the Veneto Region's Regional Strategy for Adapting to Climate Change
Lead partner	LP01 Veneto Region – PP02 ARPAV
Authors	Fabio Zecchini (ARPAV), Francesco Rech (ARPAV), Giovanni Massaro (ARPAV), Stefano Micheletti (ARPAV)
Version and date	V_10.27 | 27 October 2026

Disclaimer

This publication has been developed within the Climate_CRICES project, supported by the Interreg CENTRAL EUROPE Programme with co-financing from the European Union. Its content is the sole responsibility of the authors and the project partnership and does not necessarily reflect the views or positions of the Interreg CENTRAL EUROPE Programme, its programme bodies or the European Union. Neither the programme authorities nor the European Union can be held responsible for any use that may be made of the information contained herein.

The following is the full Italian-language version of the document.

Document information 1
Disclaimer 1
Contesto normativo e scopo del documento 3
Il contesto 3
Lo scopo 4
Struttura e contenuti 4
Fonti dei dati e metodologia 5
Dati osservati 5
Proiezioni climatiche 7
Confrontabilità tra dati osservati e proiezioni 9
Le ondate di calore 10
Definizioni di ondata di calore 10
Caratterizzazione delle ondate di calore 11
Magnitudo, durata ed estensione 12
Tipologie meteorologiche delle ondate di calore 13
Interazioni tra aspetti sanitari e dinamiche meteorologiche 14
La siccità 19
Perché la siccità è difficile da gestire 20
Siccità e cambiamento delle condizioni di vulnerabilità 21
Definizione di siccità (Drought) 22
Le principali tipologie di siccità 22
Differenza tra siccità e aridità 24
Temperature e precipitazioni sul Veneto 27
Temperatura media annuale 27
Precipitazioni annuali 28
Indicatori calore e disagio fisico 30
Giorni Estivi (SU30) e Giorni Torridi (SU35) 31
Warm-Spell Duration Index (WSDI) e Heat-Wave Duration Index (HWDI) 38
Heat-Wave Magnitude Index (HWMI) e Heat-Wave Magnitude Index daily (HWMId) 41
Ondate di forte disagio fisico 45
Notti tropicali (TR) 48
Giorni di gelo (FD) 52
Somme termiche per l'agricoltura 56
Indicatori per energia CDDs e HDDs 58
Indicatori di siccità 64
Giorni consecutivi secchi (CDD) 65
Giorni di neve nuova (SNWDays) 69
Fire Weather Index (FWI) 72
SPI-SPEI 74
Bilancio Idroclimatico (BIC) 78
La Dashboard del Progetto Climate_CRICES 85
Indice di umidità del suolo (SWI) 86
Riferimenti bibliografici per gli indicatori 88

Contesto normativo e scopo del documento

Il contesto

La Regione del Veneto, in collaborazione con ARPAV e le Università IUAV e Ca' Foscari di Venezia, ha definito a partire dall'inizio del 2024 la propria **Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici** (SRACC), allo scopo di avere un quadro programmatico coerente con le proprie competenze istituzionali in materia di adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici.

La SRACC è stata approvata dalla Giunta Regionale con DGR n. 14/CR del 4 febbraio 2025 e trasmessa al Consiglio regionale per l'approvazione finale. Il documento è stato presentato alla Seconda Commissione consiliare il 27 febbraio 2025, ottenendo valutazione favorevole all'unanimità nella seduta del 3 aprile 2025 ed attualmente è in attesa di definitiva approvazione da parte del Consiglio Regionale del Veneto.

Il **rapporto tecnico-scientifico** "Clima e cambiamenti climatici in Veneto" è parte integrante della strategia essendo finalizzato a caratterizzare i fattori di pericolo determinati dalla crisi climatica in corso a livello globale ma ben evidenti anche sul Veneto.

Tra le **problematiche storicamente ben note** ai tecnici regionali si collocano: le **alluvioni** in grado di mandare in crisi il complesso sistema idraulico veneto; le piogge intense in grado di innescare frane o di mandare in crisi localmente i sistemi di scolo delle acque urbane o di bonifica; l'**aumento del livello del medio mare** con i conseguenti effetti determinati dalle mareggiate su Venezia e sulla costa. Costituendo problemi complessi, che per essere affrontati richiedono interventi strutturali e gestionali altrettanto complessi, la SRACC del Veneto ed in generale la pianificazione regionale rivolgono a questi fenomeni una preminente rilevanza.

Il presente Addendum vuole invece focalizzare l'analisi climatologica sui temi della siccità e delle ondate di calore allo scopo di fornire informazioni supplementari ai pianificatori regionali per l'implementazione delle misure di adattamento previste dalla SRACC. Il tema della gestione delle risorse idriche in condizioni di deficit pluviometrico non rappresenta certamente una novità per il Veneto, che pure è un territorio mediamente ricco di acqua, ma l'innalzamento delle temperature, osservato dalla fine degli anni 80 con trend superiori a quelli stimati per le terre emerse a scala globale, associato all'aumento della variabilità delle precipitazioni, può esacerbare le situazioni di carenza idrica in termini di frequenza e magnitudo dando luogo ad eventi acuti e senza precedenti.

Sul fronte delle ondate di calore e delle temperature estreme, l'estate del 2003 è stata un campanello d'allarme per il nostro territorio, utile per comprendere gli effetti del fenomeno. Quello che poteva essere considerato un evento eccezionale, proprio in questi ultimi anni sta manifestando delle tendenze sul Veneto che fanno ritenere che tali situazioni possano diventare molto più frequenti ed inoltre i dati delle proiezioni climatiche delineano andamenti molto preoccupanti.

Per questo motivo si è ritenuto di **utilizzare l'opportunità offerta dal** Progetto Climate_CRICES per realizzare un dettagliato focus su queste due tematiche che per il nord-Italia e per l'Europa centrale possono rappresentare un problema emergente caratterizzato da livelli di severità mai raggiunti perlomeno negli scorsi decenni.

Oltre alle politiche di adattamento questi pericoli richiedono un aumento di consapevolezza anche nei servizi idro-meteorologici previsionali che combinando azioni previsionali e il monitoraggio dello status quo possono essere in grado di fornire supporto informativo qualificato per i tecnici e la popolazione che si trova ad affrontare le situazioni di siccità o di ondata di calore.

Lo scopo

Questo documento non intende sostituirsi al rapporto tecnico-scientifico *Clima e cambiamenti climatici in Veneto* allegato alla SRACC, né fornire una descrizione del clima attuale e dei cambiamenti climatici in atto in Veneto. Il quadro climatico e le principali dinamiche osservate e attese vengono piuttosto assunti come riferimento per individuare e **illustrare un insieme di indicatori utili alla descrizione e al monitoraggio di fenomeni quali le ondate di calore e la siccità.**

Il documento raccoglie e descrive indicatori che possono essere utilizzati da tecnici e operatori di enti locali, consorzi di bonifica, gestori della risorsa idrica e, più in generale, da tutti i soggetti potenzialmente interessati dagli impatti degli eventi estremi e dei cambiamenti climatici, tra cui strutture sanitarie, aziende agricole e zootecniche e altri operatori dei settori maggiormente esposti.

Gli indicatori proposti possono supportare diverse esigenze operative e conoscitive: il monitoraggio climatologico dei fenomeni in corso, a supporto di azioni tempestive di risposta e gestione dell'emergenza; l'analisi dei trend di medio e lungo periodo, utile alla programmazione e alla pianificazione; e l'analisi delle proiezioni climatiche future, riferite alla metà e alla fine del secolo, a supporto di strategie di pianificazione e adattamento di più ampio respiro.

Il documento può inoltre costituire uno strumento di supporto per i decisori pubblici e per gli studi e le valutazioni ambientali, contribuendo a integrare le informazioni climatiche nei processi di pianificazione urbana e territoriale e, più in generale, nella programmazione dei diversi settori potenzialmente interessati dagli impatti dei cambiamenti climatici.

Per ciascun indicatore vengono forniti la definizione, le principali modalità e finalità di utilizzo, i punti di forza e le eventuali limitazioni, nonché le indicazioni sulle fonti presso cui l'indicatore può essere consultato o dove possono essere reperiti i dati per elaborazioni personalizzate.

Struttura e contenuti

Al termine dell'introduzione sul contesto normativo e sugli obiettivi del lavoro, il documento presenta le principali fonti dei dati climatici e le modalità attraverso cui sono disponibili gli indicatori, sia per il clima passato sia per le proiezioni future, considerando sia le serie storiche puntuali sia i dati spazializzati su griglia.

Seguono due capitoli introduttivi dedicati, rispettivamente, alle ondate di calore e ai periodi siccitosi, nei quali vengono presentati e inquadrati i due fenomeni. Il documento prosegue quindi con due sezioni dedicate agli indicatori climatici: la prima è dedicata al calore, con la descrizione degli indicatori utilizzati per caratterizzare il fenomeno; la seconda è dedicata alla siccità con la descrizione dei relativi indicatori.

Per ciascun indicatore vengono sintetizzati gli aspetti essenziali per comprenderne il significato e le modalità di utilizzo, insieme alle principali fonti presso cui è possibile consultarlo.

Il documento non approfondisce invece le **procedure per il reperimento e l'elaborazione autonoma dei dati**. A questo scopo è stata predisposta un'**appendice operativa**, *Indicazioni operative per il reperimento e l'utilizzo dei dati climatici*, che illustra le principali modalità di accesso ai dati e il loro utilizzo per successive elaborazioni. In particolare, l'appendice descrive come interrogare le API e trasferire i dati in un foglio di calcolo, nonché come utilizzare i prodotti scaricabili dalla piattaforma CliNE, dalle serie storiche alle mappe spazializzate in formato NetCDF, per analisi e rappresentazioni personalizzate.

Fonti dei dati e metodologia

Dati osservati

Gli indicatori presentati in questo rapporto sono calcolati a partire dai dati osservati della **rete di stazioni meteorologiche automatiche gestite dall'ARPAV** che è costituita da circa 200 punti di misura distribuiti sull'intero territorio regionale che rilevano in continuo le principali variabili meteorologiche, tra cui temperatura dell'aria, precipitazione, umidità relativa, direzione e velocità vento e radiazione solare.

ARPAV svolge le attività di monitoraggio idro-meteorologico in applicazione della Legge 15 marzo 1997, n. 59 a seguito della quale sono state trasferite le funzioni in materia di idrografia ed idrologia indicate dall'articolo 22 del DPR 24 gennaio 1991, n. 85, che erano precedentemente svolte dall'ex Ufficio Idrografico e Mareografico di Venezia.

Per garantire l'omogeneità e la qualità delle elaborazioni climatologiche, i dati sono sottoposti a procedure di controllo automatico e validazione secondo gli standard adottati da ARPAV.

Per la descrizione del clima attuale viene adottato il **periodo climatologico di riferimento 1991-2020**, in accordo con le raccomandazioni della World Meteorological Organization (WMO). Tale trentennio costituisce la base per il calcolo delle medie climatiche, delle anomalie e di tutti gli indicatori che richiedono un periodo di riferimento.

Sono **circa 120 le stazioni con una lunga serie storica**, utilizzabili per valutazioni climatologiche. La rete automatica ARPAV è entrata progressivamente in esercizio tra la seconda metà degli anni Ottanta nelle aree montane e l'inizio degli anni Novanta in pianura. Per questo motivo il trentennio 1991-2020 rappresenta il miglior compromesso tra completezza temporale, densità spaziale della rete e qualità delle osservazioni disponibili.



Figura 1. Interfaccia di scelta e accesso ai dati giornalieri dal 2010, dal sito web istituzionale di ARPAV.

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 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*.

I dati osservati delle principali variabili meteorologiche e idrologiche misurate dalla rete di monitoraggio ARPAV sono consultabili e scaricabili dal sito dell'Agenzia nella sezione dei dati storici, che costituisce il riferimento ufficiale per la diffusione dei dati validati (figura 1).

Per alcuni indicatori i valori elaborati sono inoltre disponibili tramite le API (Application Programming Interface) di ARPAV, che consentono di interrogare il database climatico e di ottenere i dati in formato strutturato. Le API permettono di selezionare, in funzione dell'indicatore e della disponibilità dei dati, la stazione, la scala temporale e il periodo di riferimento, rendendo possibile il recupero dei dati per singole stazioni o per l'insieme delle stazioni disponibili. Un esempio di restituzione di informazioni è riportato in figura 2. Le modalità di interrogazione e di accesso ai dati tramite API sono descritte nell'appendice operativa.

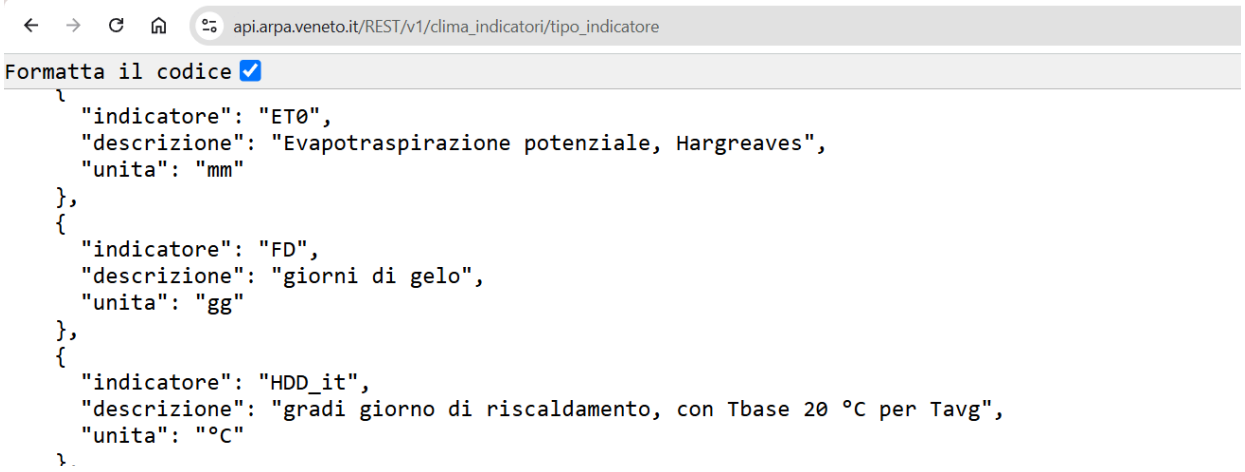


Figura 2. Esempio di chiamata API al database climatico, con restituzione dell'elenco degli indicatori disponibili.

Una parte degli indicatori presentati in questo rapporto è disponibile anche nella sezione Climatologia storica della piattaforma di Arpa Veneto CliNE – Piattaforma Clima Nord-Est (figura 3), dove può essere consultata come serie temporale puntuale o come mappa spazializzata, in funzione della tipologia di indicatore. Per gli indicatori disponibili sono fornite elaborazioni a scala annuale, decadale (1991-2000, 2001-2010 e 2011-2020) e trentennale, espresse come valori assoluti oppure, quando previsto, come anomalie rispetto al periodo di riferimento.

Come già introdotto, per la climatologia osservata è stato adottato il trentennio 1991-2020, che rappresenta il normale climatico di riferimento secondo le raccomandazioni della World Meteorological Organization (WMO). Sulla base di questo periodo vengono calcolate le anomalie annuali e decadali degli indicatori che richiedono una climatologia di riferimento.

Gli indicatori sono elaborati su base mensile, stagionale o annuale, anche in funzione delle loro caratteristiche. Le stagioni seguono la convenzione meteo-climatologica: inverno (dicembre, gennaio, febbraio), primavera (marzo, aprile, maggio), estate (giugno, luglio, agosto) e autunno (settembre, ottobre, novembre).

ARPAV pubblica periodicamente, alla fine di ogni mese:

- il Bollettino meteoclimatico relativo al mese, alla stagione o all'anno appena concluso. Dopo una panoramica sull'andamento meteorologico del periodo considerato, il bollettino

presenta e descrive mappe e grafici a barre relativi a diversi indicatori climatici, sia per il monitoraggio climatico sia per il settore agro-meteorologico. È inoltre presente una sezione dedicata a neve, ghiaccio e permafrost, oltre a specifici approfondimenti sul territorio bellunese.

- il Rapporto sulla risorsa idrica che fornisce informazioni sulle precipitazioni cadute sul Veneto nel mese appena concluso e nell'anno idrologico (periodo da ottobre al mese appena concluso). Vengono inoltre analizzati gli andamenti del manto nevoso, delle portate dei corsi d'acqua principali, dei livelli idrometrici dei principali laghi e delle falde.

Proiezioni climatiche

Le valutazioni sul clima futuro sono ottenute mediante simulazioni modellistiche e la metodologia è stata elaborata a partire dal Rapporto sui Cambiamenti Climatici di Arpa Veneto (Arpa Veneto, 2026), dalla piattaforma CliNE – Piattaforma Clima Nord-Est (figura 3) e alcuni indicatori di calore e siccità sono stati elaborati nell'ambito del progetto Climate_CRICES.

Le proiezioni sono basate su modelli climatici regionali (Regional Climate Models, RCM) del progetto EURO-CORDEX, caratterizzati da una risoluzione spaziale di circa 11 km e che rappresentano lo stato dell'arte per quanto riguarda la modellistica climatica nell'area del Mediterraneo. Tali modelli utilizzano come condizioni al contorno i modelli climatici globali (Global Climate Models, GCM) e rispetto a questi ultimi 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).

Le analisi considerano cinque differenti combinazioni di modelli climatici regionali di EURO-CORDEX. Oltre ai singoli modelli viene utilizzata la media di *ensemble*, considerata la migliore stima della risposta climatica futura, mentre la deviazione standard dei diversi modelli costituisce una misura dell'incertezza associata alle proiezioni (Giorgi, 2005). In particolare, per quanto riguarda l'anomalia trentennale, il segnale climatico su ciascun punto della griglia modellistica è considerato significativo quando la media di ensemble dell'anomalia è maggiore della deviazione standard di tutto l'ensemble (IPCC, 2013). Per le serie annuali puntuali, oltre alla media di ensemble vengono forniti gli estremi di incertezza superiore e inferiore, forniti rispettivamente come media ensemble +/- deviazione standard dei 5 modelli.

Per ridurre gli errori sistematici tipici delle simulazioni numeriche e per aumentarne la risoluzione spaziale, gli output dei modelli sono stati sottoposti a procedure di *bias correction* e *downscaling statistico* mediante il metodo del *linear scaling* (Leander e Buishand, 2007). La correzione utilizza come riferimento i dati osservati provenienti dalle reti meteorologiche storiche dell'ex Ufficio Idrografico, integrate con le reti regionali disponibili, permettendo di ottenere simulazioni maggiormente coerenti con il clima osservato e caratterizzate da una maggiore risoluzione spaziale (Massaro et al, 2022). La correzione viene operata su tutti gli indicatori basati su una soglia fissa (e non percentile). 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.

La descrizione completa dei modelli climatici, delle tecniche di bias correction, delle procedure di costruzione dell'ensemble e delle metodologie adottate per le proiezioni future è disponibile nella documentazione tecnica della piattaforma CliNE – Piattaforma Clima Nord-Est (home page in figura 3).

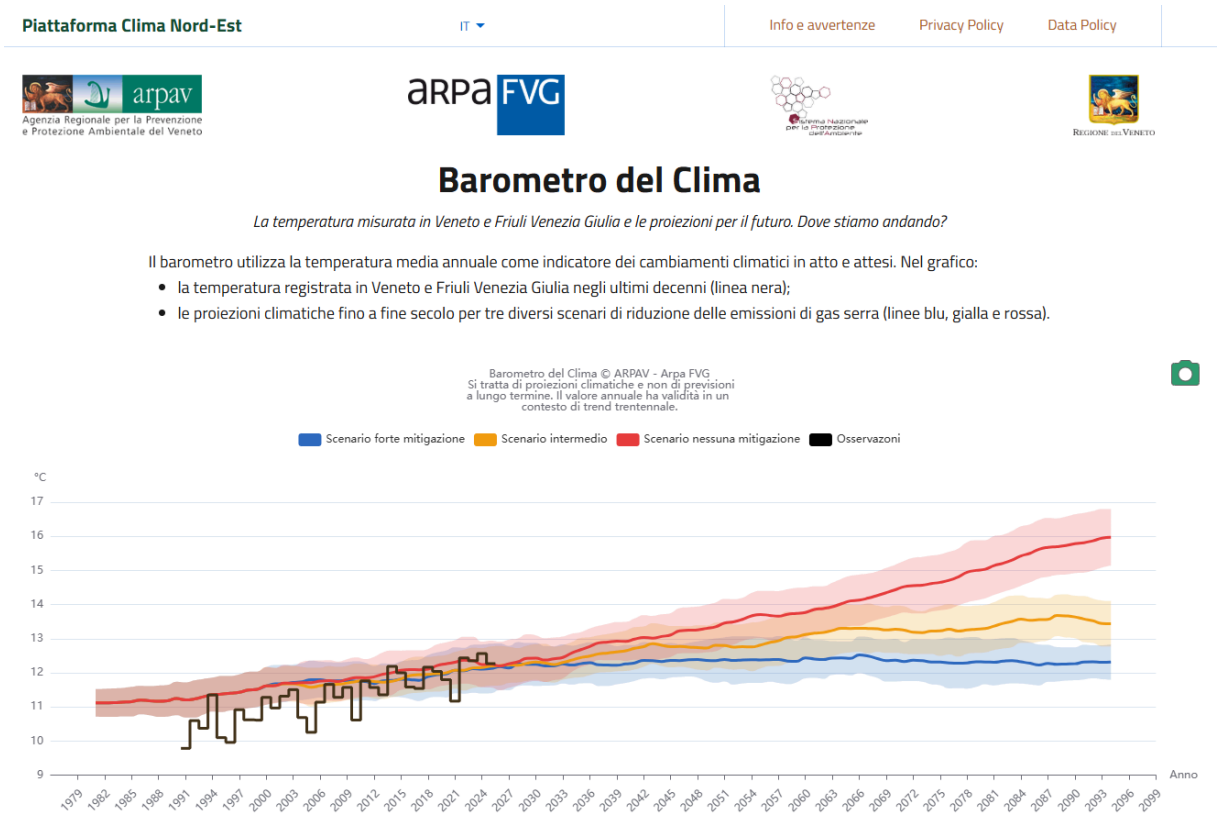


Figura 3. Homepage di CliNE [Piattaforma Clima Nord-Est] con il barometro del clima, che permette di confrontare l'andamento della temperatura annuale osservata a Nord-Est (media su Veneto e FVG) con i vari scenari climatici forniti dai modelli (blu: scenario forte mitigazione; giallo: scenario intermedio; rosso: scenario nessuna mitigazione).

Nelle elaborazioni riportate di seguito sono state calcolate le anomalie trentennali punto per punto della griglia modellistica per i due trentenni futuri (2021-2050 e 2071-2100) rispetto al trentennio di riferimento (1976-2005), che vengono mostrate sotto forma di mappa con indicati i punti dove la proiezione è statisticamente significativa. Per alcune località/stazioni di interesse, vengono mostrate le serie temporali annuali con la rispettiva banda di incertezza sulla proiezione futura.

Le simulazioni sono disponibili per tre differenti scenari climatici (Representative Concentration Pathways, RCP):

- RCP2.6: scenario con forte mitigazione delle emissioni di gas serra, ovvero una concentrazione in atmosfera di CO_2 entro il 2100 pari a quella attuale (circa 420 ppm) e che mira a mantenere il riscaldamento globale entro i 2 °C rispetto ai valori pre-industriali, come previsto dall'Accordo di Parigi (del 2015);
- RCP4.5: scenario intermedio di stabilizzazione, ovvero la concentrazione di CO_2 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 CO_2 entro fine secolo che supera i 900 ppm, come da tendenza attuale.

Le proiezioni climatiche vengono utilizzate esclusivamente per evidenziare i probabili cambiamenti futuri degli indicatori e non devono essere interpretate come previsioni

deterministiche. I risultati sono in linea con gli studi sugli scenari climatici elaborati nell'area del Nord-Est (Gallina e Giorgi, 2018, Massaro e Lionello, 2020).

Confrontabilità tra dati osservati e proiezioni

Alcuni degli indicatori presentati in questo rapporto sono definiti rispetto ad una climatologia di riferimento (ad esempio mediante percentili o anomalie), mentre altri dipendono esclusivamente dai valori assoluti delle variabili meteorologiche. Per gli indicatori appartenenti alla prima categoria è necessario utilizzare come riferimento il periodo climatologico coerente con il dataset impiegato.

Le elaborazioni basate sui dati osservati fanno pertanto riferimento al trentennio climatologico 1991-2020, costruito a partire dalla rete meteorologica automatica di ARPAV. Le proiezioni climatiche, invece, derivano da simulazioni corrette con le osservazioni della rete dell'ex Ufficio Idrografico rispetto al periodo di riferimento 1976-2005, corrispondente al periodo "storico" dei modelli utilizzati.

Per questo motivo, gli indicatori che richiedono una climatologia di riferimento vengono presentati o per il clima osservato o per le proiezioni future, evitando confronti diretti tra elaborazioni costruite su periodi climatologici differenti. Gli indicatori basati su soglie assolute possono invece essere calcolati e confrontati sia per il clima osservato sia per le proiezioni future.

Riferimenti bibliografici citati

Arpa Veneto, (2026). Rapporto sull'andamento climatico e sugli scenari collegati

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., and Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. Global and planetary change, 63(2-3), 90-104.

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.

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.

Massaro, G., Lionello, P., 2020. Regional climate model projections for North-East Italy, tesi Master 2o 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.

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.

Le ondate di calore

Il caldo intenso o il **persistere di temperature elevate per diversi giorni,** condizioni comunemente definite ondate di calore, rappresentano un pericolo naturale diffuso che può determinare **impatti rilevanti sui sistemi umani,** interessando la salute, i mezzi di sussistenza e le infrastrutture. Anche i **sistemi naturali** possono risentire gravemente degli effetti delle ondate di calore, che in molti casi possono protrarsi oltre la durata dell'evento meteorologico.

Un esempio particolarmente significativo è rappresentato dall'ondata di calore che ha interessato l'Europa nell'estate 2003, considerata senza precedenti per intensità ed estensione (Schaer e Jendritzky, 2004). L'evento ha determinato il maggiore impatto sulla mortalità mai registrato in Europa fino ad allora, con oltre 70.000 decessi in eccesso in 12 Paesi europei (Robine et al., 2008). Un evento di analoga rilevanza ha interessato la Federazione Russa nell'estate del 2010.

La rilevanza delle ondate di calore non è tuttavia legata esclusivamente agli eventi eccezionali. Anche episodi di intensità più contenuta possono determinare conseguenze significative quando interessano popolazioni, territori o sistemi particolarmente vulnerabili. Inoltre, **gli effetti del caldo intenso non dipendono esclusivamente dai valori massimi raggiunti dalla temperatura, ma possono essere influenzati dalla durata dell'evento, dalle temperature notturne, dall'umidità atmosferica, dalla ventilazione e dalle caratteristiche climatiche e ambientali della località interessata.**

La definizione e la caratterizzazione delle ondate di calore costituiscono pertanto un problema non univoco. A seconda degli obiettivi dell'analisi, esse possono essere individuate sulla base degli effetti sulla popolazione oppure sulla base dell'anomalia delle condizioni meteorologiche rispetto alla climatologia di riferimento. La scelta dei criteri di identificazione può quindi condurre a definizioni differenti dello stesso fenomeno.

Definizioni di ondata di calore

Non esiste una definizione universalmente accettata di ondata di calore (Robinson, 2001; Perkins e Alexander, 2013). In termini generali, essa può essere descritta come un **periodo di clima insolitamente caldo** e secco oppure caldo e umido, caratterizzato da un inizio e una fine generalmente graduali, da una **durata di almeno due o tre giorni** e da un impatto tangibile sulle attività umane.

Durante questi periodi di caldo intenso, non sono soltanto le temperature diurne a raggiungere valori elevati: anche le temperature notturne ed i livelli di umidità dell'aria possono risultare significativamente superiori alla media climatica di lungo periodo. La combinazione di temperature elevate e umidità può determinare condizioni di stress termico particolarmente gravose, limitando la capacità degli organismi e degli edifici di disperdere il calore accumulato.

Le ondate di calore devono inoltre essere considerate in relazione al clima della località interessata. Le medesime condizioni meteorologiche possono costituire un'ondata di calore in un determinato luogo e non rappresentare un evento eccezionale in un altro. Analogamente, gli eventi non sono necessariamente omogenei all'interno di una stessa regione: la loro intensità e la loro estensione spaziale possono variare considerevolmente (Stefanon et al., 2012).

Secondo il *Vocabolario Meteorologico Internazionale* (WMO n. 182), un'ondata di calore è definita come:

"Un marcato riscaldamento dell'aria, o l'invasione di aria molto calda, su una vasta area; di solito dura da pochi giorni a qualche settimana".

Anche il Glossario dell'IPCC, nell'*AR6 WGII Annex II*, definisce l'ondata di calore come un periodo di caldo anomalo, spesso individuato in riferimento a una soglia relativa di temperatura, della durata compresa tra due giorni e diversi mesi. Il Glossario evidenzia inoltre che le ondate di calore

(*heatwaves*) e i periodi di caldo anomalo (*warm spells*) presentano definizioni differenti, sebbene in alcuni casi possano sovrapporsi.

Ai fini di una distinzione operativa, si può quindi considerare che:

- le **ondate di calore (*heatwaves*)** sono generalmente associate alle elevate temperature del periodo estivo, inteso in senso lato, poiché eventi di questo tipo possono verificarsi anche nella tarda primavera o all'inizio dell'autunno. La loro individuazione è pertanto spesso posta in relazione con i valori termici più elevati caratteristici della stagione calda;

- i **periodi di caldo anomalo (*warm spells*)** possono verificarsi durante tutto il corso dell'anno e sono individuati sulla base di temperature anomale rispetto al normale intervallo di variazione dei valori attorno alla media climatica del periodo considerato, che può essere una decade, un mese o una stagione.

La distinzione tra le due categorie non è tuttavia assoluta e dipende dai criteri utilizzati per definire e individuare gli eventi.

Caratterizzazione delle ondate di calore

La complessità nella definizione delle ondate di calore si riflette anche nelle modalità con cui esse vengono individuate e caratterizzate. In termini generali, è possibile distinguere due principali prospettive di analisi: un approccio epidemiologico e un approccio climatologico.

Approccio epidemiologico

L'approccio epidemiologico parte dalla valutazione degli effetti delle temperature sulla salute umana, considerando, quando necessario, anche l'**azione combinata di temperatura, umidità relativa e vento**. L'obiettivo è individuare, per uno specifico luogo, soglie di temperatura o di temperatura percepita associate, in un determinato periodo, a effetti evidenti sulla mortalità e/o sulla morbilità della popolazione.

Le analisi di questo tipo sono strettamente legate alle condizioni locali. Le caratteristiche climatiche, ma soprattutto le diverse capacità di adattamento delle popolazioni alle temperature elevate, possono infatti determinare una risposta differente a condizioni meteorologiche simili. Di conseguenza, le soglie utilizzate per individuare una situazione di ondata di calore possono variare sensibilmente da una località all'altra e non è possibile definire una soglia epidemiologica universalmente valida.

Questo approccio consente quindi di mettere direttamente in relazione le condizioni termiche con gli effetti osservati sulla popolazione, ma la sua applicazione richiede la disponibilità di dati sanitari adeguati e risente delle specificità della popolazione e del territorio considerati.

Approccio climatologico

L'approccio climatologico considera invece l'**evento di caldo anomalo** in relazione alla climatologia del luogo. Partendo dall'idea di un periodo di caldo anomalo della durata di almeno due o più giorni, l'analisi viene condotta utilizzando una **serie temporale meteorologica sufficientemente lunga**, possibilmente di almeno trent'anni, sulla quale vengono definite la distribuzione dei valori estremi e le relative soglie, espresse ad esempio attraverso massimi e percentili.

Questo metodo non richiede necessariamente la disponibilità di dati relativi alla mortalità o alla morbilità, che non sempre sono disponibili con un'adeguata risoluzione temporale e spaziale. Esso utilizza principalmente osservazioni meteorologiche e climatiche e permette di caratterizzare non soltanto le ondate di calore, ma più in generale i periodi di caldo o freddo anomalo durante l'intero corso dell'anno, configurandosi quindi come uno strumento per l'analisi degli eventi

meteorologici estremi. In figura 4 una foto scattata durante la lunga ondata di calore dell'agosto 2026.

I due approcci non devono essere necessariamente considerati alternativi. Essi rispondono infatti a domande differenti: l'approccio epidemiologico è orientato a individuare le condizioni associate a effetti sulla popolazione, mentre quello climatologico è finalizzato a descrivere l'anomalia dell'evento rispetto alle condizioni climatiche di riferimento. Ne consegue che un evento particolarmente anomalo dal punto di vista climatologico non deve necessariamente corrispondere allo stesso evento identificato attraverso una soglia epidemiologica, e viceversa.



Figura 4. Prati con erba secca sulle Piccole Dolomiti, a Recoaro Terme (VI), il 16 agosto 2026.

Magnitudo, durata ed estensione

Indipendentemente dall'approccio utilizzato per individuare l'evento, un'ondata di calore può essere descritta attraverso alcune proprietà fondamentali, che ne determinano le caratteristiche e la rilevanza: magnitudo, durata ed estensione spaziale.

- **Magnitudo**: misura dello scostamento dell'evento rispetto a un valore di riferimento, quale la media climatica, oppure rispetto a una soglia predefinita;
- **Durata**: in una singola località, corrisponde all'intervallo di tempo compreso tra l'inizio e la fine dell'evento. L'inizio può essere individuato, ad esempio, nel momento in cui la soglia viene superata per la prima volta, mentre la fine corrisponde al momento in cui le condizioni rientrano al di sotto della soglia;
- **Estensione**: corrisponde all'area geografica nella quale l'evento viene osservato e si mantiene, secondo i criteri adottati, dall'inizio alla fine.

Queste caratteristiche possono essere determinate secondo criteri differenti e, di conseguenza, possono contribuire a definire in modo diverso la rilevanza di uno stesso evento. La magnitudo, ad esempio, può essere espressa come scostamento rispetto alla media, a un percentile della distribuzione climatica oppure a una soglia assoluta. Analogamente, la durata dipende dal criterio utilizzato per definire l'inizio e la fine dell'evento.

Alcuni indicatori climatici utilizzano soglie fisse di temperatura, considerando, per esempio, il numero di giorni nei quali la temperatura massima supera i 30 °C e/o la temperatura minima supera i 20 °C. Tali indicatori sono semplici da applicare, facilmente comprensibili e consentono confronti immediati. Tuttavia, anche in questo caso, è necessario considerare la climatologia locale, poiché una stessa soglia assoluta può rappresentare condizioni eccezionali in una località e condizioni relativamente normali in un'altra.

La scelta tra soglie assolute e relative rappresenta quindi uno degli aspetti che contribuiscono alla varietà degli indicatori utilizzabili per identificare e caratterizzare le ondate di calore.

Tipologie meteorologiche delle ondate di calore

Oltre alle caratteristiche di intensità, durata ed estensione, le ondate di calore possono essere ulteriormente caratterizzate sulla base delle condizioni termoigrometriche che le accompagnano.

Dal punto di vista meteorologico è possibile distinguere, in termini generali, due tipologie di eventi: ondate di calore secche e ondate di calore umide.

Le **ondate di calore secche**, caratterizzate da temperature elevate associate a bassi valori di umidità relativa, sono spesso collegate a periodi di tempo stabile, con cielo sereno e un elevato apporto di radiazione solare. Le condizioni calde e secche possono essere accompagnate anche dalla presenza di vento, che può modificare, in senso positivo o negativo, le condizioni di stress termico. Questo tipo di evento si verifica generalmente in aree caratterizzate da clima continentale o mediterraneo oppure in situazioni nelle quali l'aria viene riscaldata attraverso processi adiabatici.

Le **ondate di calore umide**, caratterizzate dalla concomitanza di temperature e umidità relativa elevate, determinano condizioni particolarmente opprimenti sia durante il giorno sia durante la notte. La presenza di copertura nuvolosa nelle ore notturne, inversioni termiche, foschie e nebbie può aggravare ulteriormente il disagio, riducendo la dispersione del calore accumulato durante il giorno. In tali condizioni viene quindi limitato il sollievo notturno e ostacolato il raffrescamento degli edifici. Le ondate di calore umide sono frequentemente associate ai climi temperati e marittimi delle medie latitudini e possono verificarsi con particolare frequenza in alcune regioni (Hunt, 2007).

La distinzione tra eventi secchi e umidi evidenzia ulteriormente come la temperatura dell'aria, considerata isolatamente, non sia sempre sufficiente a descrivere le condizioni di stress termico. L'umidità atmosferica e il vento possono infatti modificare sensibilmente gli scambi di calore tra l'ambiente e il corpo umano e, più in generale, la percezione e gli effetti del caldo.

Sulla base di queste caratteristiche, le ondate di calore hanno maggiori probabilità di verificarsi nelle località caratterizzate da una marcata variabilità delle condizioni estive oppure da una stagione calda ben definita. La loro formazione può essere associata a diverse configurazioni meteorologiche di ampia scala (es. anticiclone subtropicale africano), la cui combinazione determina l'intensità, la durata e l'estensione spaziale dell'evento.

Interazioni tra aspetti sanitari e dinamiche meteorologiche

Data la rilevanza a scala globale del problema ondate di calore, pur nell'immenso panorama di pubblicazioni e lavori scientifici, si segnala che la World Meteorological Organization (W.M.O) e la World Health Organization (W.H.O.) hanno curato congiuntamente la realizzazione del documento: Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development (WMO 1142-2015).

Tale documento mira ad evidenziare in primo luogo la portata che questi fenomeni hanno sulla salute umana determinando anche conseguenti impatti sui sistemi sanitari delle aree interessate, ma viene inoltre evidenziata l'importanza di strutturare sistemi e procedure di previsione delle ondate di calore e di allertamento sia delle strutture sanitarie sia della popolazione che, se sensibilizzata adeguatamente, può ridurre l'esposizione e la vulnerabilità a tali eventi meteorici.

Il documento descrive il fenomeno nella sua complessità, riporta indicazioni circa gli effetti del calore sulla mortalità e morbilità, elenca dettagliatamente i principali indici meteo-climatici. Un'ampia sezione del documento fornisce informazioni e spunti per la strutturazione di sistemi di allertamento dei medici e della popolazione sottolineando l'importanza della comunicazione sia delle condizioni meteorologiche di emergenza sia della informazione alla popolazione delle misure di adattamento.

Questi sistemi e procedure di allertamento devono essere basati su solidi studi delle situazioni pregresse, devono essere preventivamente organizzati, devono essere specificatamente adattati alle condizioni locali e devono prevedere anche azioni di sensibilizzazione e formazione oltreché di comunicazione verso gli utenti.

L'Ufficio Regionale per l'Europa dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (W.H.O.) ha inoltre aggiornato il Report Heat and health in the WHO European Region: updated evidence for effective prevention, Regional Office for Europe WHO, 2021 che raccoglie e sintetizza le prove epidemiologiche e ambientali sugli effetti delle ondate di calore a partire dal 2008, allo scopo di fornire le basi conoscitive per aggiornare le linee guida sui piani d'azione per la salute e il calore (comprehensive heat-health action plan HHAP).

Questo documento di riferimento si articola su 8 elementi fondamentali per la prevenzione:

- Governance e coordinamento
- Sistemi di allerta meteo-climatica tempestivi
- Campagne e strategie di comunicazione efficaci
- Riduzione dell'esposizione al calore (es. pianificazione urbana a lungo termine)
- Protezione mirata dei gruppi e delle popolazioni vulnerabili
- Resilienza e preparazione dei servizi sanitari e sociali
- Sistemi di sorveglianza in tempo reale
- Monitoraggio e valutazione dei piani.

A livello nazionale si segnala il documento: Ministero della Salute. (2026, luglio). Linee di indirizzo per la prevenzione: Ondate di calore e inquinamento atmosferico. Centro nazionale per la prevenzione e il controllo delle malattie (CCM) che aggiorna il precedente piano del 2019 integrandolo in modo sistematico con le più recenti evidenze epidemiologiche e con le linee guida del W.H.O.. Questo documento affronta in modo congiunto l'impatto delle ondate di calore e dell'inquinamento atmosferico come un'unica emergenza sanitaria integrata. In particolare vengono fornite:

- raccomandazioni e modelli operativi per attuare e ottimizzare i piani locali di prevenzione;

- indicazioni per migliorare il coordinamento sul territorio nazionale tra amministrazioni regionali, locali e strutture sanitarie;
- indicazioni per rafforzare il ruolo dei medici di medicina generale, dei pediatri, dei servizi territoriali e degli operatori socio-sanitari nelle emergenze ambientali.

Il rischio ondate di calore – come viene gestito dalla Protezione Civile Regionale

Nella Regione Veneto con D.G.R. n. 300 del 28 aprile 2026 la giunta Regionale ha ridefinito il sistema di allertamento e le modalità operative del Centro Funzionale Decentrato delle Protezione Civile.

In aggiunta ai rischi già gestiti come dissesto idrogeologico, temporali, alluvioni e valanghe, il nuovo *bollettino multirischio regionale* considera anche il rischio ondate di calore con specifica valenza in ambito sanitario. Questo bollettino effettua la valutazione del rischio per ciascuna delle zone di allertamento in cui è stato suddiviso il territorio Veneto e per le ondate di calore fa riferimento al Protocollo per la prevenzione delle patologie da elevate temperature nella popolazione anziana della Regione Veneto, che ha lo scopo di attivare procedure di carattere esclusivamente socio-sanitario, principalmente inerenti alla tutela delle persone fragili in presenza di eventi intensi di disagio fisico per ondata di calore.

arpav
Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto

Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - UMC

PREVISIONE DEL DISAGIO FISICO E DELLA QUALITA' DELL'ARIA (OZONO) PER LA REGIONE VENETO

Emissione: Martedi 12 Agosto 2025 entro le ore 15

Copertura: regione del Veneto - Frequenza: giornaliera - Periodicità: da giugno a settembre

Martedi 12 Agosto	ZONE MONTANE	ZONE PEDEMONTANE	ZONE PIANEGGIANTI	ZONE COSTIERE
DISAGIO FISICO PREVALENTE	DEBOLE / MODERATO	INTENSO	INTENSO	INTENSO
QUALITA' DELL'ARIA (OZONO)	SCADENTE	BUONA / DISCRETA	BUONA / DISCRETA	BUONA / DISCRETA
Osservazioni	Giornata non umida ma parecchio calda, con un disagio fisico che sulle zone montane è debole/moderato e altrove è intenso. Qualità dell'aria localmente scadente su zone montane e pedemontane, per il resto in genere buona discreta.			

Mercoledi 13 Agosto	ZONE MONTANE	ZONE PEDEMONTANE	ZONE PIANEGGIANTI	ZONE COSTIERE
DISAGIO FISICO PREVALENTE	INTENSO	INTENSO	INTENSO	INTENSO
QUALITA' DELL'ARIA (OZONO)	SCADENTE	SCADENTE	BUONA / DISCRETA	BUONA / DISCRETA
Osservazioni	Soprattutto per un contenuto aumento delle temperature diurne, il disagio fisico subisce un leggero incremento; il suo dato prevalente giornaliero è da debole/moderato ad intenso sulle zone montane e generalmente intenso altrove. Qualità dell'aria almeno localmente scadente su zone montane e pedemontane, perlopiù buona/discreta altrove.			

Giovedi 14 Agosto Venerdi 15 Agosto	Situazione sostanzialmente invariata dal punto di vista del disagio fisico, il cui dato prevalente giornaliero è intenso soprattutto su zone costiere, pianeggianti e pedemontane. Qualità dell'aria da buona/discreta a localmente scadente.

ARPAV - Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio - UMC - via Marconi, 55 - 35037 Teolo (PD)
Telefoni: 049 999 8128 (sala operativa), 049 999 8111 (centralino) - email: cmt.meteo@arpa.veneto.it - web: www.arpa.veneto.it

Figura 5. Previsione del disagio fisico prodotta da ARPAV, esempio del 12 agosto 2025. Dal 2026 la previsione è confluita nel nuovo bollettino multirischio regionale.

La problematica “ondate di calore” viene definita come: rischio derivante dal permanere di elevate temperature, associate a tassi elevati di umidità, forte irraggiamento solare e assenza di ventilazione

L’indicatore primario utilizzato per la valutazione del rischio ondate di calore è l’indice Humidex, un indicatore del disagio termico che corregge il dato di temperatura integrandolo con un fattore dipendente dall’umidità. Dell’indice Humidex viene considerato il valore medio giornaliero, che è indicativo del disagio fisico massimo e della sua continuità nelle diverse fasi del giorno, incluse le ore notturne.

La previsione del disagio fisico è effettuata per gli ambiti morfo-climatici in cui è suddiviso il territorio regionale: costa, pianura, zone pedemontana e montana (esempio in figura 5).

Per questi ambiti morfo-climatici vengono attribuite tre classi di disagio fisico:

- classe -: disagio fisico assente/debole;
- classe 1: disagio fisico moderato;
- classe 2: disagio fisico intenso.

Per l’attribuzione della classe di disagio fisico, come già indicato, si considera la condizione media giornaliera dell’indice Humidex, calcolato sui dati di temperatura e umidità relativa registrati dalle stazioni della rete di monitoraggio ARPAV rappresentative per le diverse zone, o previsto sulla base dei dati dei modelli meteorologici di riferimento. Nella seguente tabella sono riportate le soglie dell’indice Humidex medio giornaliero per la determinazione della classe di disagio fisico.

	ZONA MONTANA	ZONA PEDEMONTANA	PIANURA	COSTA
Classe -	< 30 °C	< 30 °C	< 30 °C	< 30 °C
Classe 1	30-33 °C	30-35 °C	30-35 °C	30-35 °C
Classe 2	> 33 °C	> 35 °C	> 35 °C	> 35 °C

Valori di soglia indice humidex medio giornaliero limite per zona e per classe di disagio fisico

La classe 1 indica una situazione di disagio fisico superiore alle condizioni di benessere, ma definibile come “precritico”, in quanto di solito (da letteratura tematica e analisi sviluppate internamente) non associato a un rilevante impatto sulle normali attività.

La classe 2 indica una situazione di disagio fisico rilevante e pertanto definito intenso. Per l’attribuzione della classe 2, in determinati casi, in aggiunta all’indice Humidex, viene considerata anche la temperatura minima giornaliera registrata dalle stazioni, o prevista dai modelli meteorologici; in particolare si considera il valore di 20 °C come soglia per la definizione di “notte tropicale”, che fornisce una indicazione ulteriore per l’attribuzione della classe disagio fisico intenso.

L’attribuzione del livello di allerta avviene in base all’eventuale persistenza della classe 2, ovvero del disagio fisico intenso. In generale, qualora si presentino almeno 2 giornate consecutive di disagio fisico intenso verrà attribuito il livello di allerta gialla.

Il Centro Funzionale Decentrato, sentito il medico reperibile del Servizio Urgenza Emergenza medica (ai sensi della D.G.R. n. 1367 del 16.09.2020 rinnovata con D.G.R. n. 970 del 26 agosto 2025), procede all'allertamento per ondate di calore.

L'allertamento per ondate di calore viene effettuato solo nei periodi dell'anno in cui il fenomeno risulta rilevante, ordinariamente dal 1° giugno al 15 settembre. Al di fuori del periodo considerato, qualora ritenuto rilevante, previo avviso, verrà comunque effettuata la valutazione meteorologica e il conseguente allertamento.

Il rischio ondate di calore - blocco delle attività lavorative sul territorio regionale

Le **autorità regionali** inoltre mediante ordinanze contingibili ed urgenti firmate dal Presidente della Giunta Regionale **possono prevedere il blocco di alcune tipologie di attività lavorative** durante le ondate di calore.

L'iter normativo che nel corso dell'estate 2026 ha portato a questo tipo di interventi restrittivi risulta così articolato:

- Con D.G.R. n. 376 del 19 maggio 2026 è stato approvato il Protocollo d'Intesa per la gestione del rischio calore e radiazione solare nei luoghi di lavoro, siglato tra Regione Veneto, istituzioni (INAIL, INPS, Ispettorato del Lavoro, ANCI) e parti sociali.
- Con D.G.R. n. 568 del 16 giugno 2026 sono state recepite formalmente le *Linee di indirizzo per la protezione dei lavoratori dal calore* approvate dalla Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome.
- Con Ordinanza del Presidente della Giunta Regionale n. 58 del 16 giugno 2026 è stato istituito il primo blocco delle attività (attivo dal 17 giugno al 31 agosto 2026) per i settori lavorativi ritenuti più critici quali: agricolo e florovivaistico, cantieri edili all'aperto e cave.
- Con Ordinanze del Presidente della Giunta Regionale n. 71 del 1° luglio 2026 ed estensioni successive, visto il perdurare dell'emergenza disagio fisico, le restrizioni per le attività lavorative sono state reiterate nel tempo ed estese anche ad altre tipologie di attività quali: cantieri stradali, logistica di piazzale, rider/consegne urbane su due ruote ed alla produzione del vetro artistico (per personale che opera nei pressi di forni fusori).

L'eventuale blocco delle attività lavorative non scatta in modo automatico su base quotidiana fissa per tutto il territorio regionale, ma viene attivato secondo una procedura che considera anche indici di rischio oggettivi localizzati sul territorio.

In particolare il divieto di lavoro riguarda:

- la fascia oraria più critica che va dalle ore 12.30 alle 16:00;
- l'analisi oggettiva delle condizioni di disagio fisico che consente di individuare le giornate e le aree del territorio per cui la piattaforma online Worklimate (sviluppata da INAIL e CNR) segnala, alle ore 12:00, un livello di rischio "ALTO" per i lavoratori esposti al sole impegnati in attività fisica intensa (figura 6).

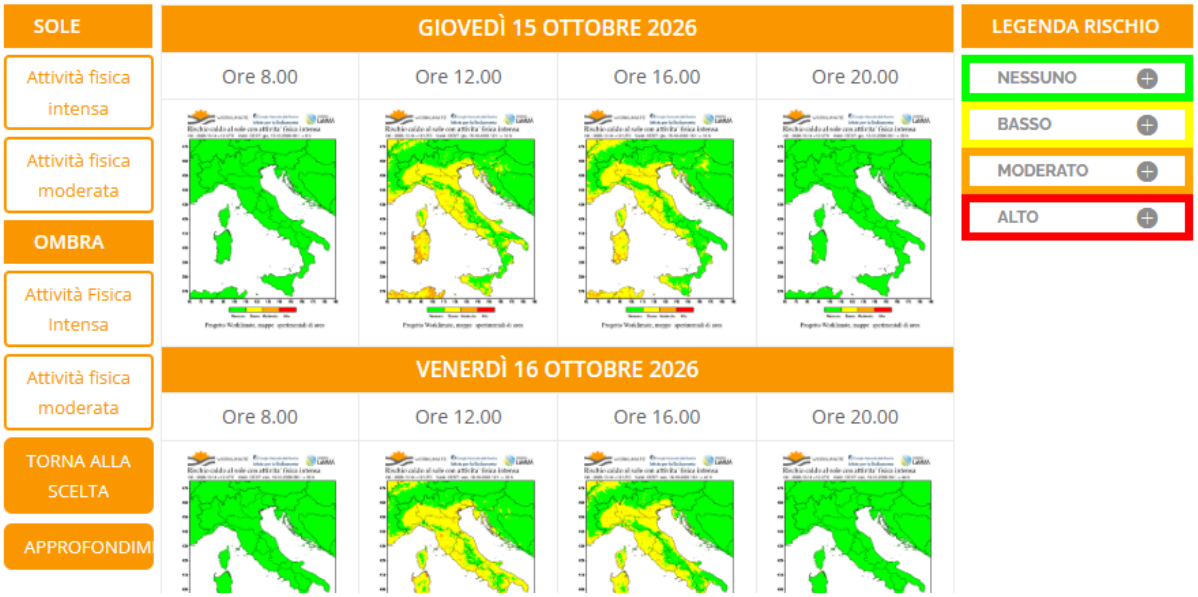


Figura 6. Interfaccia della piattaforma Worklimate per la scelta del tipo di esposizione al sole ed intensità dell'attività fisica per la consultazione delle mappe di previsione del rischio calore.

Riferimenti bibliografici citati

Hunt, B.G., 2007: A climatology of heat waves from a multimillennial simulation. Journal of Climate, 20(15), 3802-3821.

IPCC, 2022: Annex II: Glossary [Möller, V., R. van Diemen, J.B.R. Matthews, C. Méndez, S. Semenov, J.S. Fuglestvedt, A. Reisinger (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2897-2930, doi:10.1017/9781009325844.029.

McGregor, G.R., Bessemoulin, P., Ebi, K. and Menne, B. eds., 2015. Heatwaves and health: guidance on warning-system development (WMO-No. 1142). Geneva: World Meteorological Organization.

Perkins, S.E. and L.V. Alexander, 2013: On the measurement of heatwaves. Journal of Climate, 26, 4500-4517.

Robine, J.M., S.L.K. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, C. Griffiths, J.P. Michel and F.R. Herrmann, 2008: Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. Comptes Rendus Biologies, 331(2), 171-178.

Robinson, P.J., 2001: On the definition of a heat wave. Journal of Applied Meteorology, 40, 762-765.

Schaer, C. and G. Jendritzky, 2004: Climate change: hot news from summer 2003. Nature, 432(7017), 559-560.

Stefanon, M., F. D'Andrea and P. Drobinski, 2012: Heatwave classification over Europe and the Mediterranean region. Environmental Research Letters, 7(1), 014023.

La siccità

La siccità è uno dei fenomeni naturali più complessi e meno facilmente definibili e, a livello mondiale, rappresenta uno dei pericoli con il maggiore impatto sulla popolazione. Già Hagman (1984) la definiva come **il disastro naturale che colpisce più persone di qualsiasi altro pericolo**. La complessità del fenomeno è stata sottolineata anche da Donald A. Wilhite, storico studioso delle problematiche legate alla siccità, che ha significativamente intitolato *The Enigma of Drought* il primo capitolo del volume *Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies* (Wilhite, 1993). Analogamente, in un lavoro ormai classico, Tannehill (1947) ha descritto la siccità come un **"fenomeno strisciante" (*creeping phenomenon*)**.

Nel grafico in figura 7, che evidenzia per il Veneto l'ultimo importante periodo siccitoso tra gennaio 2021 e giugno 2023, i mesi in surplus sono indicati in blu e quelli in deficit in rosso. Sebbene si tratti raramente di valori estremi, la loro somma progressiva porta il deficit cumulato in mm (linea arancione) a mostrare una forte carenza di precipitazioni.

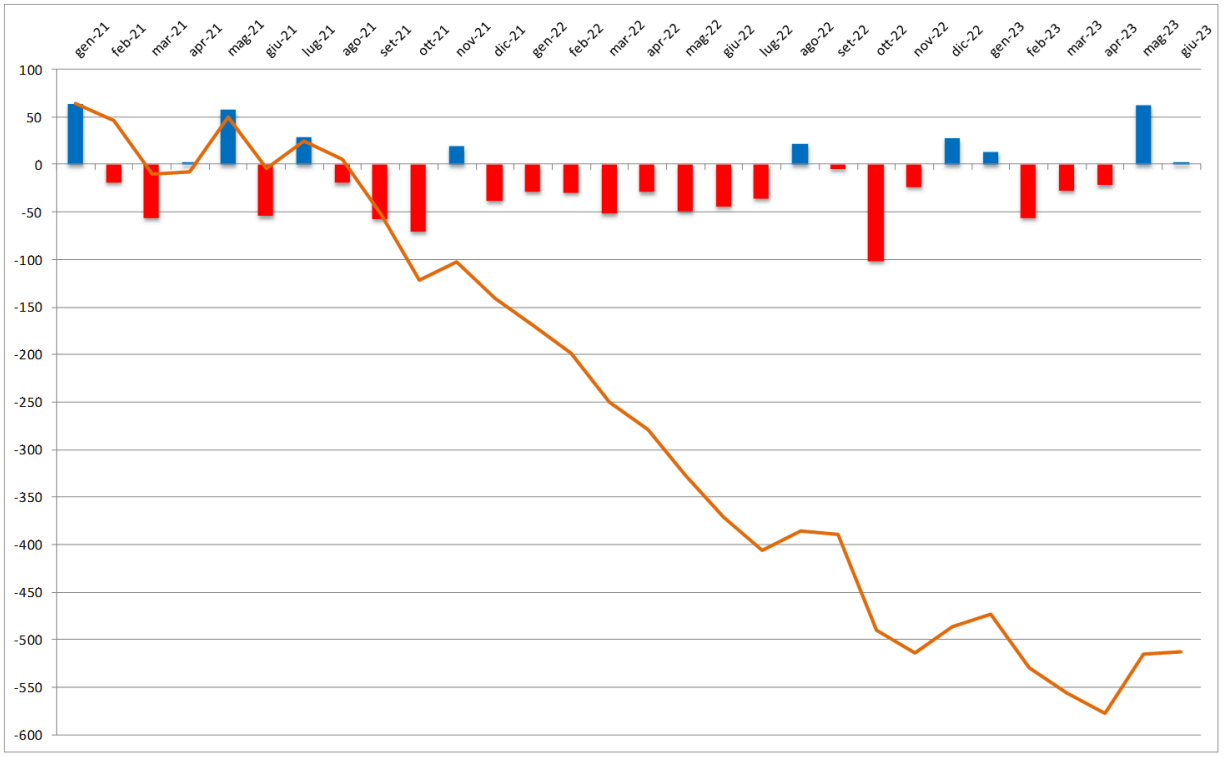


Figura 7. Grafico del surplus (blu) o deficit (rosso) delle precipitazioni mensili [mm] e curva (arancione) dell'ammanco cumulato [mm] da gennaio 2021 a giugno 2023.

La definizione di siccità come fenomeno "strisciante" è particolarmente significativa perché, a differenza di molti altri pericoli naturali, la siccità non presenta generalmente un inizio improvviso e facilmente riconoscibile. I suoi effetti tendono ad accumularsi progressivamente nel tempo e possono manifestarsi con ritardo rispetto alle condizioni meteorologiche che li hanno determinati. Allo stesso modo, le conseguenze possono persistere anche dopo la fine del deficit pluviometrico.

La siccità è quindi, a livello mondiale, un fenomeno di grande rilevanza, ma allo stesso tempo difficile da definire, identificare, monitorare e prevenire. I sistemi sociali, più frequentemente che nel caso di altri pericoli naturali, possono incontrare difficoltà nell'individuazione tempestiva del fenomeno e nella predisposizione di adeguate misure di prevenzione, previsione e adattamento.

Il VI Rapporto di valutazione dell'IPCC definisce la siccità come:

"un periodo di tempo anormalmente secco abbastanza lungo da causare un grave squilibrio idrologico".

La definizione evidenzia due elementi fondamentali del fenomeno: l'anomalia delle condizioni di disponibilità idrica e la loro persistenza nel tempo. In termini generali, la siccità può essere associata a una **riduzione delle precipitazioni rispetto alle condizioni normali per un periodo sufficientemente prolungato**, generalmente una stagione o più.

Tuttavia, la sola precipitazione non è sempre sufficiente a descrivere il fenomeno. Altri fattori meteorologici e climatici, quali temperature elevate, forte ventilazione e bassa umidità relativa, possono infatti contribuire ad aumentare il deficit idrico e, conseguentemente, la gravità della siccità.

La siccità è inoltre strettamente legata alla dinamica temporale e alle caratteristiche del territorio. La stagione nella quale si verifica, le fasi fenologiche delle colture interessate, le caratteristiche dei suoli e l'efficacia delle precipitazioni, determinata, tra l'altro, dall'intensità e dalla distribuzione temporale delle piogge, possono modificare significativamente gli effetti di uno stesso deficit pluviometrico.

La gravità di un episodio di siccità dipende quindi non soltanto dalla sua durata, intensità ed estensione geografica, ma anche dalla domanda di risorse idriche da parte delle attività umane e degli ecosistemi. Il significato stesso della siccità non può pertanto essere completamente separato dal contesto sociale, economico e ambientale nel quale il fenomeno si verifica.

La vulnerabilità della popolazione e dei sistemi interessati può infatti modificare sensibilmente gli effetti prodotti da condizioni meteorologiche simili. Di conseguenza, episodi di siccità successivi nella stessa regione possono determinare impatti differenti anche quando presentano caratteristiche comparabili in termini di intensità, durata ed estensione spaziale.

Perché la siccità è difficile da gestire

La complessità della siccità e dei suoi effetti rende particolarmente difficile la gestione del fenomeno. In particolare, possono essere individuati tre fattori principali.

- **Lenta evoluzione e persistenza degli effetti.** Gli effetti della siccità tendono ad accumularsi lentamente nel corso di periodi prolungati e possono, in alcuni casi, estendersi anche su più anni. Un esempio è rappresentato dalla situazione osservata nel Nord Italia tra febbraio 2021 e aprile 2023. Inoltre, gli effetti negativi possono persistere per periodi considerevoli anche dopo la conclusione dell'evento meteorologico. Questa caratteristica rende spesso difficile individuare con precisione l'inizio e la fine di un periodo siccitoso.

- **Assenza di una definizione univoca.** La siccità è un fenomeno complesso, per il quale non esiste una definizione scientifica unica che consenta di stabilire in modo universale se un evento sia in corso, quale sia la sua estensione spazio-temporale e quale sia la sua gravità. Le definizioni devono essere adattate alla scala di analisi e alla finalità dello studio, tenendo conto delle condizioni locali, delle risorse disponibili e degli impatti considerati. Questa necessaria contestualizzazione, pur essendo fondamentale, rende più complessa la gestione e il confronto tra eventi differenti.

- **Diffusione e difficoltà di quantificazione dei danni.** Gli impatti della siccità sono generalmente diffusi nello spazio e nel tempo e non si manifestano necessariamente

attraverso danni strutturali immediatamente riconoscibili. La quantificazione degli effetti può quindi risultare complessa e il problema può essere individuato con ritardo. Anche gli interventi di risposta e soccorso risultano, di conseguenza, differenti e spesso più articolati rispetto a quelli richiesti da altri tipi di calamità naturali caratterizzate da effetti più concentrati e immediatamente visibili.

Questi elementi spiegano perché la siccità richieda un approccio che non si limiti alla semplice osservazione delle precipitazioni, ma consideri l'intero sistema di disponibilità e domanda della risorsa idrica.

Siccità e cambiamento delle condizioni di vulnerabilità

La vulnerabilità alla siccità è influenzata anche dalle trasformazioni demografiche e dall'aumento della domanda di risorse idriche. A livello mondiale, la crescita della popolazione e delle attività produttive può aumentare la pressione sulle risorse idriche disponibili, rendendo maggiormente rilevanti anche deficit di precipitazione che, in condizioni differenti, avrebbero prodotto effetti più contenuti.



Figura 8. Fiume Tagliamento in secca il 9 agosto 2026.

A questi fattori si aggiungono le conseguenze del cambiamento climatico. L'aumento delle temperature può infatti contribuire a incrementare la domanda evaporativa dell'atmosfera e, in determinate condizioni, ad aumentare la gravità e la durata dei fenomeni siccitosi. Il rapporto tra cambiamento climatico e siccità è tuttavia complesso e dipende dalle caratteristiche climatiche e territoriali considerate, nonché dalla componente della siccità analizzata.

La rilevanza della disponibilità idrica non dipende inoltre esclusivamente dalla quantità di acqua presente. La normativa europea di riferimento per la gestione delle acque considera congiuntamente gli aspetti quantitativi e qualitativi della risorsa. Una carenza idrica può infatti derivare anche dalla presenza di contaminanti o da fenomeni quali l'intrusione del cuneo salino, che possono rendere inutilizzabili risorse idriche altrimenti disponibili. Al contrario, interventi di trattamento, depurazione e, in determinati contesti, desalinizzazione possono contribuire ad aumentare la disponibilità effettiva della risorsa e ad attenuare gli effetti della siccità.

Questo aspetto evidenzia ulteriormente come la siccità non possa essere considerata esclusivamente come una condizione meteorologica, ma debba essere interpretata in relazione alla disponibilità effettiva della risorsa e alla domanda da parte dei diversi utilizzatori.

Definizione di siccità (*Drought*)

Una delle definizioni storicamente utilizzate è quella dell'Assemblea generale delle Nazioni Unite, secondo la quale la siccità è il fenomeno naturale che si verifica quando le precipitazioni sono significativamente inferiori ai livelli normali registrati, causando gravi squilibri idrologici che influiscono negativamente sui sistemi di produzione delle risorse del suolo (UNGA, 1994).

La definizione evidenzia quindi il legame tra precipitazioni, disponibilità idrica e conseguenze sui sistemi naturali e produttivi. Tuttavia, proprio la molteplicità delle componenti coinvolte rende necessario distinguere diverse forme di siccità, a seconda del comparto interessato e della fase del ciclo idrologico nella quale si manifesta il deficit.

Le principali tipologie di siccità

La siccità può essere descritta attraverso diverse tipologie, che rappresentano differenti fasi o componenti del processo di deficit idrico. Le principali sono la siccità meteorologica, agricola, ecologica, idrologica e socio-economica.

- La **siccità meteorologica** si verifica quando le precipitazioni relative a un determinato periodo risultano inferiori, oltre una soglia predefinita, alla media o alla distribuzione climatica di lungo periodo delle precipitazioni caratteristiche di una determinata area (Wilhite, 2002). Essa rappresenta generalmente la componente più direttamente collegata alle condizioni atmosferiche e può costituire il punto di partenza di una sequenza di deficit che, attraverso il sistema suolo-pianta e il ciclo idrologico, può successivamente interessare altri comparti.

- La **siccità agricola** mette in relazione le caratteristiche della siccità meteorologica o idrologica con gli effetti sui sistemi agricoli. L'analisi considera, tra gli altri elementi, le differenze tra precipitazione effettiva e domanda evaporativa, l'evapotraspirazione, il contenuto idrico e il deficit idrico del suolo e le esigenze delle colture (NDMC, 2021; IPCC, 2021). In questo caso assumono particolare importanza la stagione e la fase fenologica della coltura, poiché uno stesso deficit idrico può produrre effetti molto differenti a seconda del momento nel quale si verifica.

- La **siccità idrologica** (figura 8) si manifesta quando la disponibilità di risorse idriche superficiali e sotterranee, inclusi corsi d'acqua, laghi e altre componenti del sistema idrologico, scende al di sotto di una soglia definita (Wilhite, 2002). Rispetto alla siccità meteorologica, essa può presentare un ritardo temporale, poiché la risposta dei sistemi idrologici al deficit di precipitazione non è immediata e dipende dalle caratteristiche del bacino, dei suoli, della copertura vegetale e delle condizioni precedenti all'evento.



Figura 9. Cortile del Centro Meteo ARPAV a Teolo (PD) il 20 agosto 2026. L'erba del cortile è completamente ingiallita e si nota a terra anche un letto di foglie secche.

- La **siccità ecologica** (figura 9) può essere definita come una carenza prolungata e diffusa di risorse idriche naturali in grado di determinare molteplici condizioni di stress negli ecosistemi (NDMC, 2021; Vicente-Serrano et al., 2021; IPCC, 2021). La sua valutazione richiede pertanto di considerare non soltanto la disponibilità della risorsa idrica, ma anche le esigenze degli ecosistemi e la loro risposta alle condizioni di deficit.

- La **siccità socio-economica** si verifica quando la disponibilità di acqua per la società risulta insufficiente rispetto alla domanda, anche in relazione a condizioni meteorologiche avverse (Mishra e Singh, 2010). Questa tipologia mette in evidenza in modo particolarmente diretto la relazione tra disponibilità della risorsa, domanda e vulnerabilità del sistema socio-economico. Un determinato deficit della risorsa può infatti produrre conseguenze differenti a seconda della domanda idrica, delle infrastrutture disponibili e delle possibilità di gestione e redistribuzione della risorsa. Gli enti gestori delle risorse idropotabili in Veneto segnalano che nella realtà regionale le condizioni di carenza idrica che si verificano nelle situazioni di emergenza vengono tendenzialmente aggravate dall'incremento dei prelievi di acqua potabile per usi non strettamente legati alla persona quali per esempio: l'irrigazione di giardini, l'annaffiamento di piante ed orti e il riempimento di piscine private. A causa della concomitanza di situazioni di disagio fisico

per elevate temperature può aumentare sensibilmente nelle aree ad alta densità abitativa l'uso di acqua potabile per uso igienico (docce prolungate).

Una forma particolare di siccità è rappresentata dalla **siccità improvvisa (*flash drought*)**, caratterizzata dalla rapida insorgenza o dalla rapida intensificazione delle condizioni di deficit idrico. Il fenomeno può essere associato a precipitazioni inferiori alla norma accompagnate da temperature, vento e radiazione solare insolitamente elevati, condizioni che possono determinare un rapido aumento della domanda evaporativa e una veloce riduzione dell'umidità del suolo (Ford e Labosier, 2017; Mo e Lettenmaier, 2015; Christian et al., 2021).

La *flash drought* si distingue quindi dalle forme di siccità caratterizzate da una progressiva evoluzione su periodi più lunghi soprattutto per la rapidità con cui il deficit si sviluppa e raggiunge condizioni di severità rilevanti.

La distinzione tra le diverse tipologie evidenzia come la siccità non rappresenti un fenomeno unico, ma una sequenza o combinazione di condizioni di deficit che possono interessare comparti differenti del sistema climatico, idrologico, ambientale e socio-economico. Le diverse componenti possono inoltre presentare tempi di risposta differenti, rendendo possibile che un deficit meteorologico si manifesti successivamente come deficit agricolo, idrologico o socio-economico, senza che necessariamente tutte le componenti raggiungano contemporaneamente la stessa intensità.

Differenza tra siccità e aridità

Un'ulteriore distinzione fondamentale è quella tra siccità e aridità.

- La **siccità** rientra nella normale variabilità del clima e può verificarsi pressoché in ogni regime climatico. Si tratta, in generale, di una condizione temporanea e anomala di deficit rispetto alle condizioni normalmente osservate in una determinata località.

- L'**aridità**, al contrario, è una caratteristica climatica permanente o di lungo periodo, associata a un marcato e stabile deficit tra precipitazione ed evapotraspirazione. Mentre la siccità rappresenta quindi un'anomalia rispetto alle condizioni climatiche abituali, l'aridità descrive una condizione climatica strutturale. Un esempio per il basso Veneto, limitatamente al periodo estivo, è riportato in figura 10.

Questa distinzione è particolarmente importante perché una regione può essere caratterizzata da un clima arido e, allo stesso tempo, sperimentare episodi di siccità quando le condizioni osservate risultano significativamente più secche rispetto alla propria climatologia.

L'aridità può essere identificata attraverso diversi indici climatici. Tra questi, l'indice FAO-UNEP (United Nations Environment Programme, 1977) utilizza il rapporto tra precipitazione media annua e evapotraspirazione di riferimento (ET_0): P/ET_0, dove P rappresenta la precipitazione media annua climatica ed ET_0 l'evapotraspirazione di riferimento media annua climatica.

Esistono diverse classificazioni delle condizioni di aridità. Una classificazione riportata da Thomas e Middleton (1994), basata sul rapporto P/ET_0, distingue le seguenti categorie:

Zona	Valori di P/ET_0
Arida	Compresi tra 0.03 e 0.20
Semiarida	Compresi tra 0.20 e 0.75
Sub-Umida	Maggiori di 0.75

I valori riportati devono essere interpretati come una classificazione delle condizioni climatiche medie, e non come una misura della presenza o dell'intensità di un episodio di siccità.

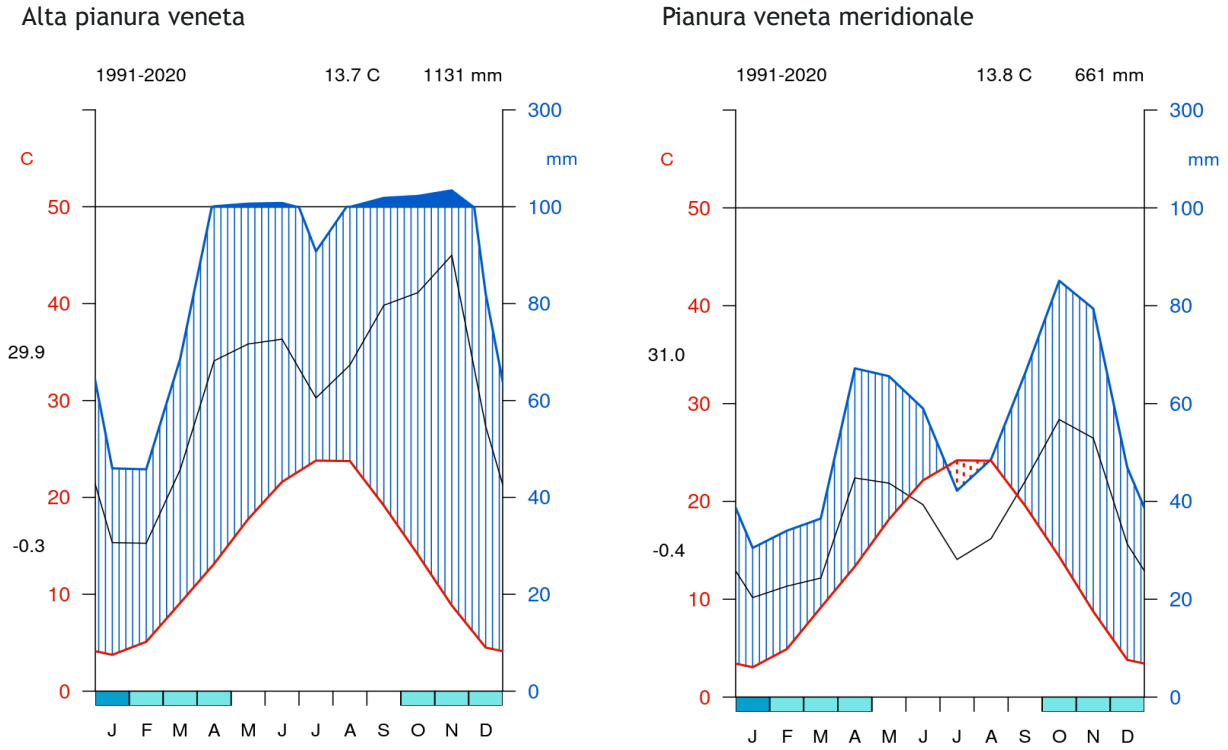


Figura 10. confronto tra i diagrammi climatici di Walter & Lieth della alta pianura veneta (sinistra) e pianura veneta meridionale (destra) per il trentennio 1991-2020. Mentre per l'alta pianura spiccano i periodi piovosi in primavera ed autunno, per la pianura meridionale si osserva tipicamente un periodo arido tra luglio e metà agosto e semi-arido da giugno ad inizio settembre.

Un esempio: il Veneto

La distinzione tra siccità e aridità può essere chiarita attraverso un esempio territoriale. Per il Veneto è possibile calcolare il rapporto P/ET_0 utilizzando i valori areali medi di precipitazione e di evapotraspirazione di riferimento relativi al periodo 1991–2020.

BACINO IDROGRAFICO	ADIGE: VENETO	BACINO SCOLANTE IN LAGUNA DI VENEZIA	BRENTA: VENETO	FTC: VENETO	LEMENE: VENETO	LIVENZA: VENETO	PIANURA TRA LIVENZA E PIAVE	PIAVE: VENETO	PO: VENETO	SILE	TAGLIAMENTO: VENETO	REGIONE
Superficie km^2	1452	2522	4574	2596	511	673	452	3904	872	761	96	18413
P/ET_0	1.41	1.06	1.47	0.83	1.23	1.61	1.14	2.03	1.06	1.20	1.37	1.37

Il valore medio regionale del rapporto risulta pari a 1.37, evidenziando condizioni climatiche complessivamente differenti da quelle delle aree classificate come aride o semi-aride secondo la classificazione riportata.

All'interno della regione si osserva tuttavia una significativa variabilità spaziale. Il settore più meridionale del Veneto, rappresentato dal bacino del Fissero - Tartaro - Canal Bianco (FTC, parte veneta), presenta un valore del rapporto pari a 0.83, mentre il bacino più settentrionale del Piave raggiunge un valore pari a 2.03.

Questa variabilità mostra come anche all'interno di una stessa regione possano esistere condizioni climatiche differenti in termini di rapporto tra precipitazione ed evapotraspirazione. Essa

evidenzia inoltre la necessità di considerare la climatologia locale quando si analizzano fenomeni di deficit idrico: un determinato quantitativo di precipitazione o un determinato deficit possono infatti assumere significati differenti in funzione delle condizioni climatiche di riferimento.

Riferimenti bibliografici citati

Christian, J.I., Basara, J.B., Hunt, E.D., et al., 2021: Global distribution, trends, and drivers of flash drought occurrence. Nature Communications, 12, 6330. https://doi.org/10.1038/s41467-021-26692-z

Ford, T.W. and C.F. Labosier, 2017: Meteorological conditions associated with the onset of flash drought in the Eastern United States. Agricultural and Forest Meteorology, 247, 414-423. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.031

Hagman, G., 1984: Prevention Better than Cure: Report on Human and Natural Disasters in the Third World. Swedish Red Cross, Stockholm.

IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Mishra, A.K. and V.P. Singh, 2010: A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391(1-2), 202-216.

Mo, K.C. and D.P. Lettenmaier, 2015: Heat wave flash droughts in decline. Geophysical Research Letters, 42, 2823-2829. https://doi.org/10.1002/2015GL064018

NDMC, 2021: Drought Basics. National Drought Mitigation Center, University of Nebraska-Lincoln.

Tannehill, I.R., 1947: Drought: Its Causes and Effects. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

Thomas, D.S.G. and N.J. Middleton, 1994: Desertification: Exploding the Myth. John Wiley & Sons, Chichester.

UNEP, 1977: Draft Plan of Action to Combat Desertification. United Nations Conference to Combat Desertification, United Nations Environment Programme.

UNGA, 1994: Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. Final Text of the Convention. United Nations General Assembly, New York.

Vicente-Serrano, S.M., Quiring, S.M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S. and L. Domínguez-Castro, 2021: A review of environmental droughts: causes, impacts and management. [Riferimento da verificare in base alla fonte bibliografica utilizzata.]

Walter H & Lieth H (1960): Klimadiagramm Weltatlas. G. Fischer, Jena.

Wilhite, D.A., 1993: Drought Assessment, Management, and Planning: Theory and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Boston.

Wilhite, D.A., 2002: Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. In: D.A. Wilhite (ed.), Drought: A Global Assessment, Routledge, London.

Temperature e precipitazioni sul Veneto

Premesso che i temi delle temperature e delle precipitazioni sono più estesamente trattati nel rapporto tecnico-scientifico "Clima e cambiamenti climatici in Veneto" allegato alla SRACC, si ritiene opportuno fornire qualche elemento generale sugli andamenti di queste variabili che sono strettamente correlati agli incrementi di frequenza e magnitudo degli eventi estremi.

Temperatura media annuale

Le due mappe in figura 11 delle isoterme mostrano sulla Regione Veneto la distribuzione spaziale delle temperature medie annue considerando le medie del trentennio 1991-2020 e le medie sul decennio 2016-2025.

Il confronto tra le mappe evidenzia chiaramente il riscaldamento verificatosi nell'ultimo decennio, mentre la distribuzione spaziale dei valori evidenzia la complessità del territorio regionale che passa dalla costa adriatica (a Est) al lago di garda (Ovest) e dalla Pianura meridionale (Sud) alle prealpi e successivamente alle Alpi (Nord). Dal punto di vista altimetrico si passa da aree in prossimità della costa che sono sotto il livello del mare (zone di bonifica) alla sommità della Marmolada a 3343 m s.l.m.

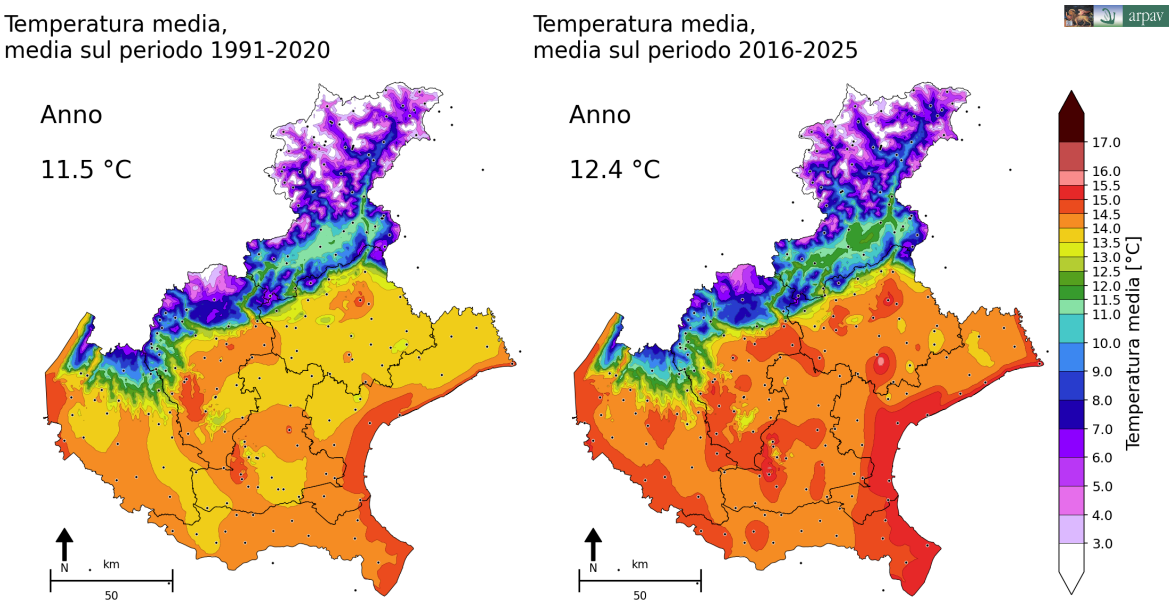


Figura 11. Temperatura media annua nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Il grafico a barre riportato in figura 12 è ricavato dai dati spazializzati di 110 stazioni termometriche automatiche operative sul Veneto nel periodo 1991-2025.

Si osserva molto chiaramente l'aumento dei valori di temperatura media annua nel tempo con una netta differenza tra gli andamenti dei primi anni e i valori degli anni più recenti; i 4 valori più elevati dei 35 anni considerati si collocano nel periodo 2022-2025. I valori minimi sono stati osservati negli anni iniziali della serie.

Le rette rosse tratteggiate rappresentano le medie decennali degli ultimi 30 anni ed evidenziano un costante e progressivo aumento dei valori termici in tale periodo.

La retta nera rappresenta il trend lineare delle temperature medie annue sul Veneto nell'ultimo trentennio, è statisticamente significativo vale +0.60 °C per decennio, valore molto elevato che conferma l'ipotesi che il mediterraneo rappresenti uno degli hot-spot del riscaldamento globale.

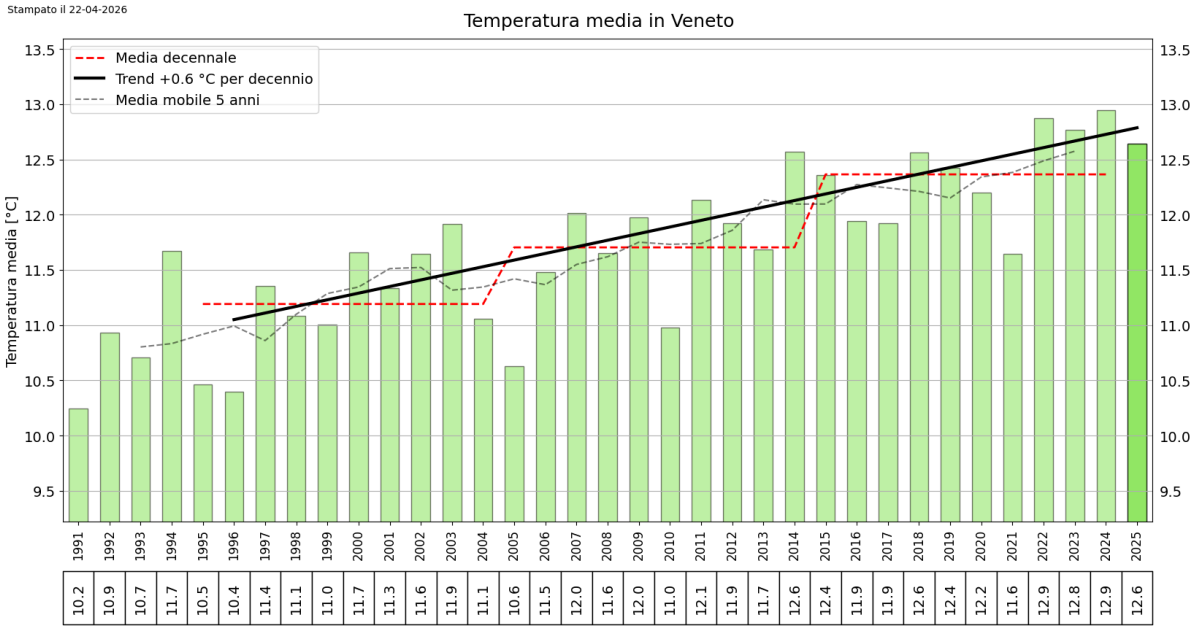


Figura 12. Grafico a barre della temperatura media annuale del Veneto. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Precipitazioni annuali

La carta delle isoiete (figura 13) mostra come le precipitazioni medie annue sul Veneto oscillino tra i 650-700 mm del Veneto Meridionale ed i 1700-2000 mm delle Prealpi centrali ed orientali. Un massimo secondario si colloca oltre la val Belluna sulle Dolomiti meridionali (1700-1800 mm) per scendere più a nord nel settore delle Dolomiti centrali ed ancor più sulle Dolomiti settentrionali (1200 mm).

Il grafico a barre in figura 14, ricavato dai dati spazializzati osservati dalla rete di stazioni pluviometriche di ARPAV, riporta i valori delle piogge cumulate annualmente riferite all'intero territorio regionale. Nel periodo 1991-2025 non esiste un trend lineare statisticamente significativo ed anche le medie decennali (rette rosse tratteggiate) mostrano delle oscillazioni piuttosto che tendenze apprezzabili.

L'elemento forse più interessante che riguarda gli apporti pluviometrici annuali consiste nell'aumento delle variabilità interannuale nel corso del periodo considerato; in particolare tra il 2002 ed il 2025 si alternano anni con piovosità molto elevata con anni caratterizzati da apporti molto inferiori alla media. Abbiamo quindi una successione di anni che presentano condizioni di surplus pluviometrico con anni deficitari. Analizzando la variabilità della serie storica si osserva nel periodo 1991-2025 un trend di aumento statisticamente significativo della Deviazione standard.

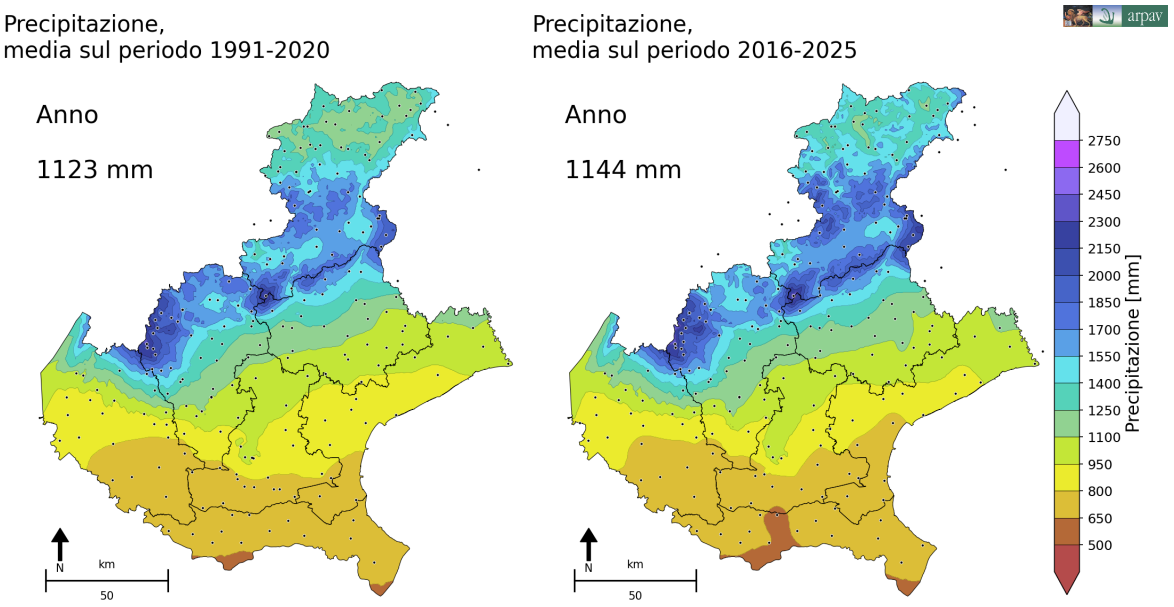


Figura 13. Precipitazione annua mediamente cumulata nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

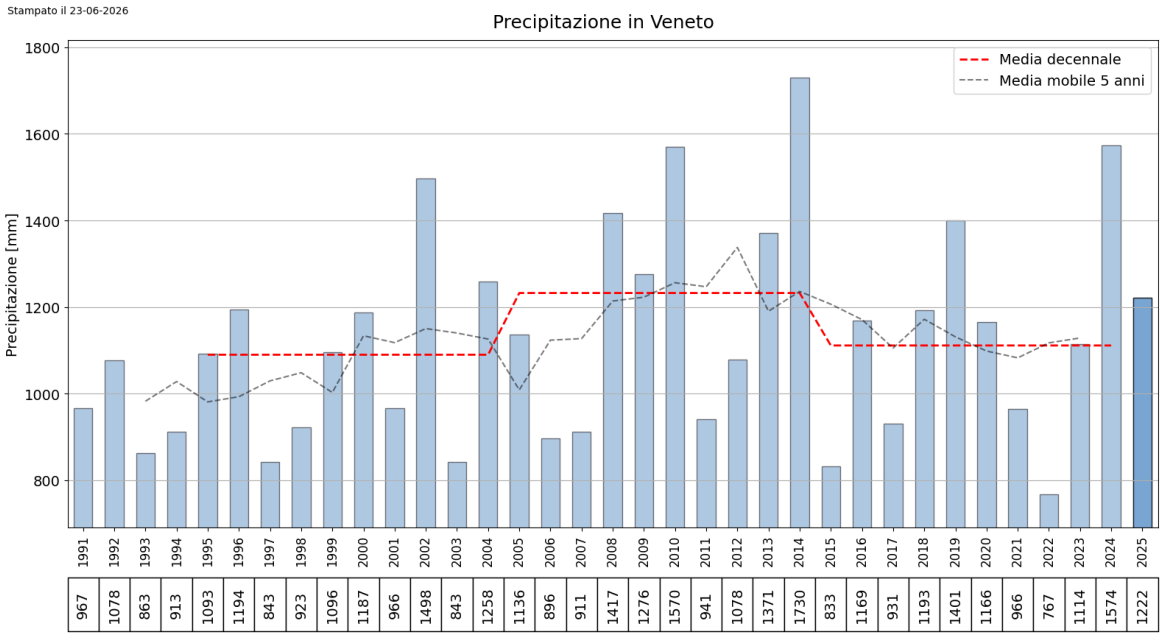


Figura 14. Grafico a barre della precipitazione annua in Veneto. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Indicatori calore e disagio fisico

La varietà delle definizioni e dei criteri utilizzati per individuare e caratterizzare le ondate di calore evidenzia la complessità del fenomeno. Un'ondata di calore non può infatti essere descritta attraverso la sola temperatura dell'aria o mediante una soglia universalmente valida: la sua identificazione dipende dalla climatologia locale, dalla durata dell'evento, dalla sua intensità e dalla sua estensione, nonché dalle condizioni di umidità e di ventilazione che possono modificarne significativamente le caratteristiche e gli effetti.

La scelta del criterio di identificazione dipende inoltre dalla finalità dell'analisi. Un indicatore sviluppato per descrivere l'anomalia climatica di un evento può rispondere a una domanda diversa rispetto a un indicatore costruito per rappresentare le condizioni di stress termico o il rischio per la salute umana. Di conseguenza, diversi indicatori possono identificare eventi differenti, oppure attribuire una diversa rilevanza allo stesso evento, pur riferendosi alle medesime condizioni meteorologiche.

Questa pluralità di prospettive non rappresenta quindi una semplice difficoltà terminologica, ma riflette la natura complessa del fenomeno e la necessità di descriverlo attraverso metriche coerenti con l'obiettivo dell'analisi. La scelta dell'indicatore costituisce pertanto un passaggio importante per garantire coerenza tra il fenomeno che si intende studiare, i dati disponibili e la finalità dell'analisi.

Nei capitoli successivi saranno quindi esaminati i principali indicatori utilizzati per identificare e caratterizzare le ondate di calore, evidenziandone i criteri di definizione, le variabili considerate, le modalità di calcolo e i principali ambiti di applicazione.

Giorni Estivi (SU30) e Giorni Torridi (SU35)

Questi indicatori derivano dall'indice dei Summer Days (SU) definito dall'ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) e presente sul dizionario degli indici di Copernicus, che considera come giorno estivo una giornata con temperatura massima superiore a 25 °C.

Nel contesto climatico dell'Europa meridionale tale soglia risulta tuttavia poco discriminante; per questo motivo vengono comunemente utilizzate le soglie di 30 °C (SU30) e 35 °C (SU35), più rappresentative rispettivamente delle giornate molto calde e di quelle torride.

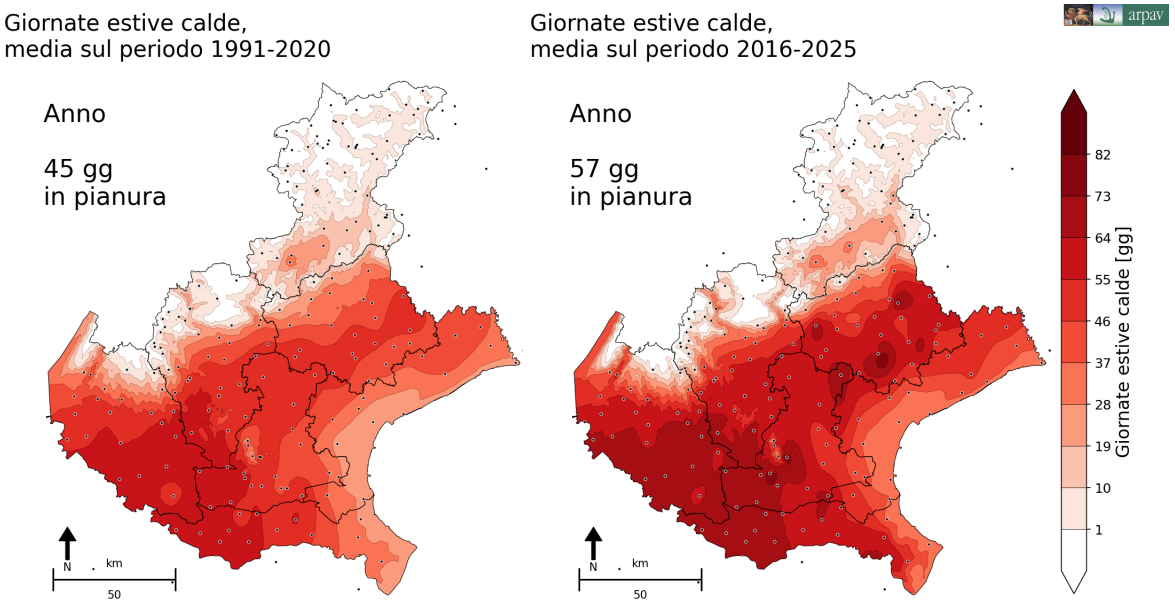


Figura 15. Giornate calde estive (SU30) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Si tratta di indicatori semplici e robusti, il cui calcolo richiede esclusivamente la temperatura massima giornaliera, confrontata con un valore soglia, e non necessita della definizione di un periodo climatologico di riferimento o del calcolo di percentili. Possono essere analizzati su base giornaliera, mensile, stagionale o annuale e consentono un confronto diretto tra territori e periodi differenti.

Sebbene il superamento di tali soglie sia tipicamente concentrato nei mesi estivi, negli ultimi decenni si osserva un progressivo ampliamento della stagione calda, con un numero crescente di giornate superiori a 30 °C già nel mese di maggio e ancora nel mese di settembre. Questo andamento rappresenta uno dei segnali più evidenti del riscaldamento climatico osservato sul territorio regionale.

Le mappe in figura 15 confrontano la distribuzione spaziale del numero medio annuo di giorni con temperatura massima superiore a 30 °C nel trentennio climatico di riferimento 1991-2020 con quella dell'ultimo decennio disponibile (2016-2025). L'incremento risulta evidente su gran parte della pianura veneta ed è confermato anche dal valore medio calcolato per le aree poste al di sotto dei 50 m di quota, dove si passa da circa 45 giorni annui nel trentennio di riferimento a circa 57 giorni nel periodo più recente.

La distribuzione spaziale evidenzia i valori più elevati nella pianura sud-occidentale e nei settori interni della pianura centro-orientale, mentre il numero di giornate calde diminuisce progressivamente avvicinandosi alla fascia costiera e aumentando di quota.

L'incremento è confermato anche dalla serie storica relativa alla pianura. Il grafico in figura16 mostra un trend crescente statisticamente significativo, stimato mediante il metodo robusto di Theil-Sen, pari a circa 8 giorni aggiuntivi per decennio nell'ultimo trentennio. La significatività del trend è stata verificata mediante il test non parametrico di Mann-Kendall. Fino al 2025 il primato del maggior numero di giornate con temperatura massima superiore a 30 °C rimane associato al 2003, seguito dal 2022, dal 2012 e dal 2024.

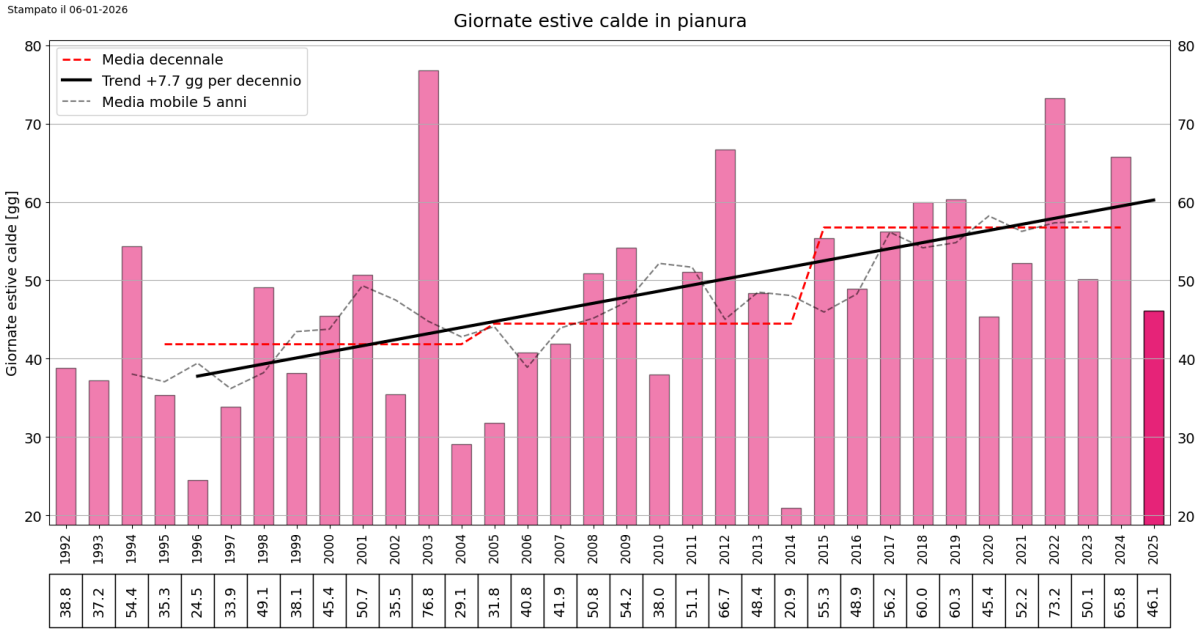


Figura 16. Grafico a barre del numero di giornate estive calde (SU30) in pianura. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

L'indicatore SU35 dei giorni torridi individua le giornate con temperatura massima superiore a 35 °C. Sebbene il numero medio annuo di questi eventi sia ancora relativamente contenuto, essi assumono particolare rilevanza poiché rappresentano una soglia oltre la quale aumentano rapidamente gli impatti sul territorio.

Temperature superiori a 35 °C determinano infatti un marcato incremento dello stress termico per la popolazione, in particolare per anziani, bambini, lavoratori esposti all'aperto e persone con patologie croniche. Nello stesso tempo aumentano gli effetti negativi sulla zootecnia e sulle colture agricole, con riduzioni della produttività e maggior fabbisogno irriguo.

Gli effetti si estendono anche alle infrastrutture. Nei periodi più caldi cresce contemporaneamente la domanda di acqua ed energia elettrica, mentre le elevate temperature riducono l'efficienza di numerosi componenti degli impianti idrici ed elettrici, incrementando il rischio di guasti, incendi e disservizi. Il surriscaldamento delle apparecchiature, il maggiore carico della rete elettrica dovuto all'uso dei sistemi di climatizzazione e la diminuzione dell'efficienza delle linee di distribuzione costituiscono fattori che possono amplificare la vulnerabilità dei servizi essenziali proprio durante gli eventi di calore più intenso. Gli enti gestori delle risorse idropotabili hanno evidenziato la rilevanza di questi fenomeni che possono portare a importanti interruzioni nella continuità dei servizi da loro garantiti alla popolazione.

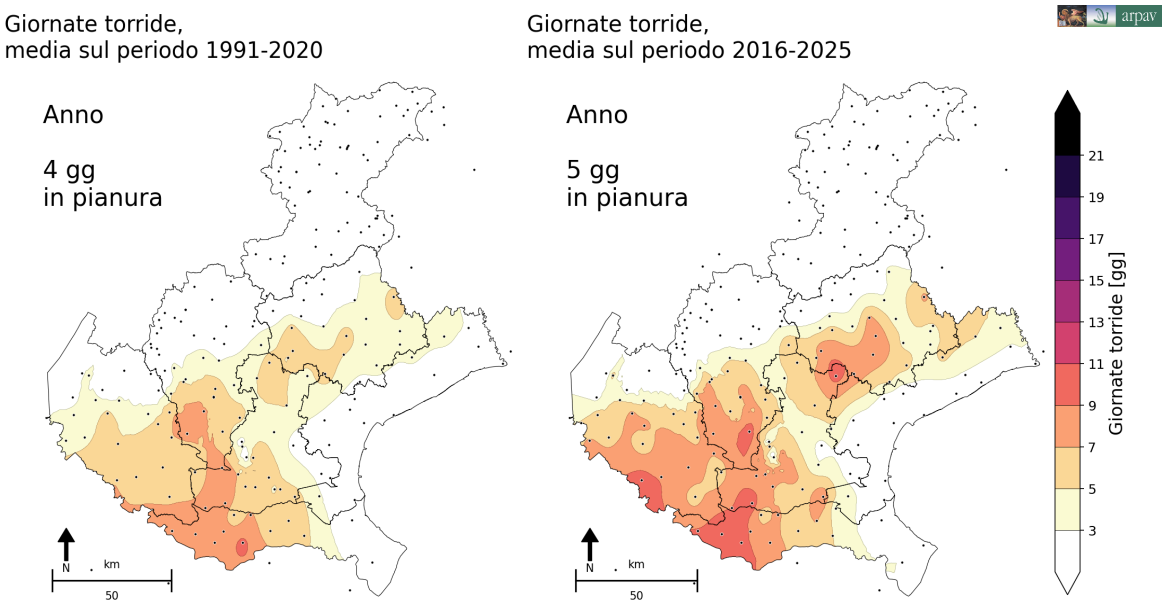


Figura 17. Giornate torride (SU35) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Le mappe relative all'indicatore SU35 (figura 17) mostrano una distribuzione spaziale analoga a quella osservata per SU30, con i valori maggiori localizzati nella pianura sud-occidentale. Nel periodo più recente emerge tuttavia un'estensione delle aree interessate a gran parte della pianura occidentale e ai settori interni della pianura centro-orientale. Pur trattandosi di un numero medio annuo ancora limitato di giornate, l'incremento osservato è determinato dalla crescente frequenza di anni caratterizzati da episodi eccezionalmente caldi, intervallati da stagioni relativamente meno estreme.

Considerando il futuro atteso, la distribuzione geografica della media di ensemble dell'anomalia dei giorni caldi è presentata nella figura 18 per i due periodi futuri 2021-2050 (parte alta) e 2071-2100 (parte bassa) e i due scenari a basse emissioni RCP2.6 (sinistra) ed alte emissioni RCP8.5 (destra). Le croci nella mappa indicano i punti di griglia dove l'accordo tra i modelli è basso, ovverosia la media di ensemble risulta minore della deviazione standard dei modelli.

Per tutti gli scenari i modelli sono statisticamente in accordo su quasi l'intero dominio. Si vede che l'area più colpita risulta la pianura interna e si nota 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 nel trentennio a fine secolo.

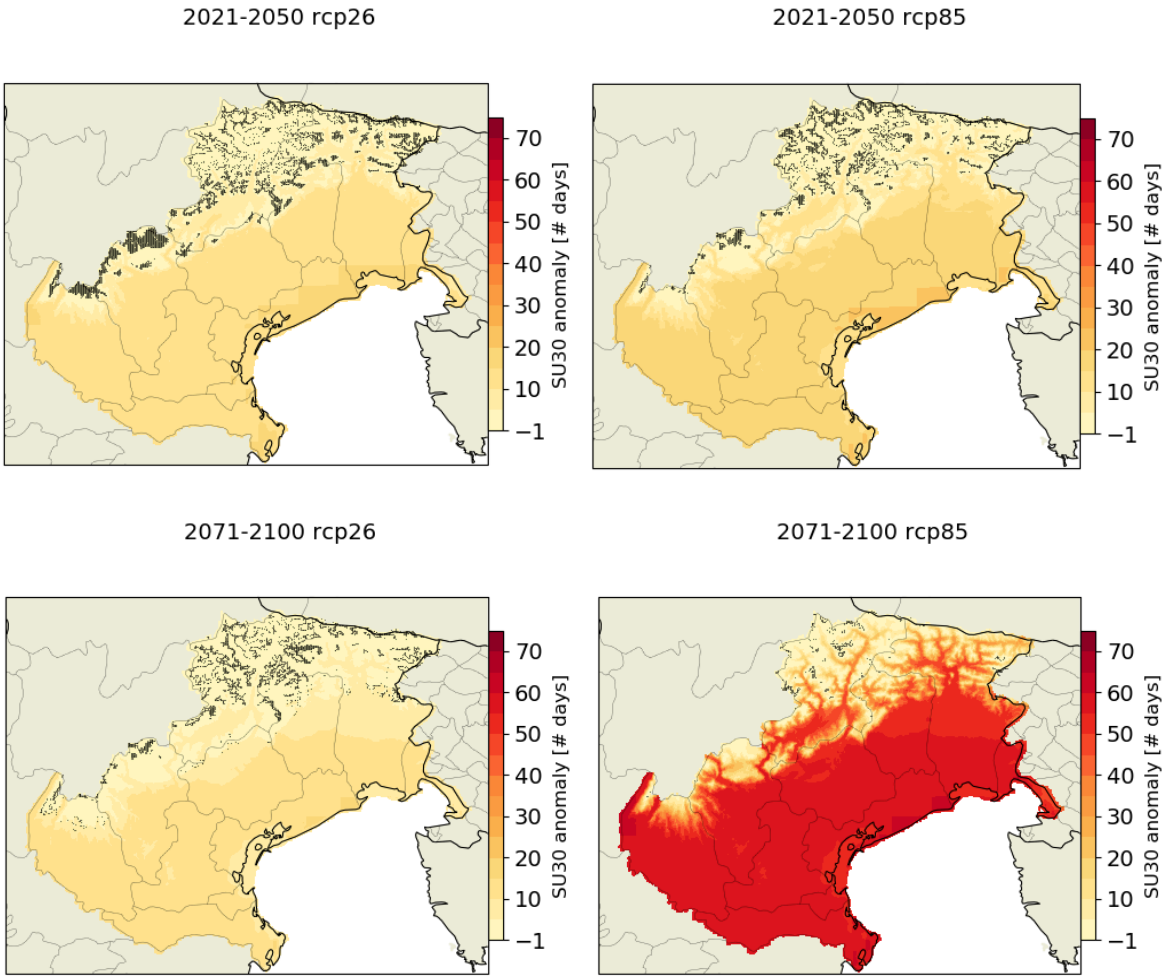


Figura 18. Distribuzione geografica dell'anomalia del numero di giorni caldi, definiti come giorni con temperatura massima maggiore di 30 °C (SU30) (unità: n. giorni/anno), per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

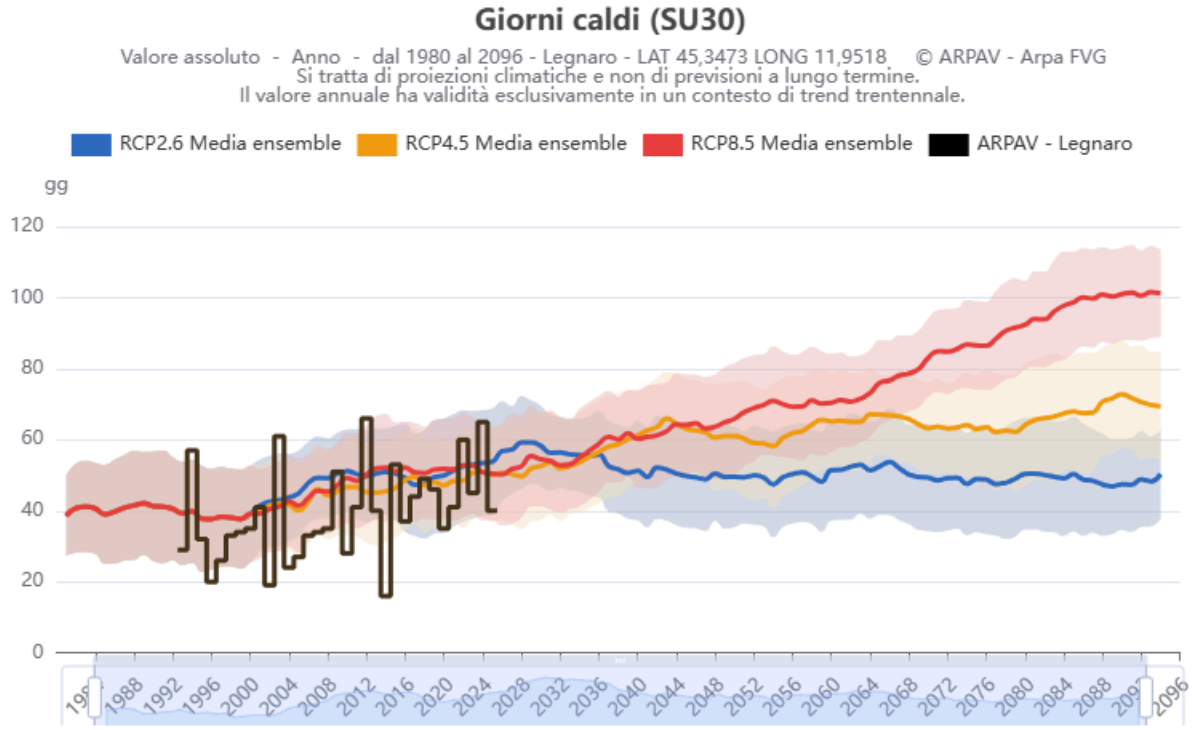


Figura 19. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei giorni caldi (unità: #giorni/anno) a Legnaro (PD) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa). La linea nera dal 1992 al 2025 rappresenta le osservazioni annuali presso la stazione meteorologica di Arpa Veneto - Legnaro.

Se si considera la stazione di Legnaro (PD) identificativa dell'area della pianura centrale si nota che si passa da valori osservati attorno ai 40 gg/anno nello storico 1991-2020 fino a valori oltre i 100 gg/anno a fine secolo per lo scenario con nessuna mitigazione (figura 19).

La distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni torridi (SU35) è mostrata in figura 20 per i trentenni 2021-2050/2071-2100 (parte superiore/inferiore) con il confronto RCP2.6/RCP8.5 (sinistra/destra).

Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e che la parte più colpita risulta essere la pianura sud-occidentale e, a seguire, la pianura centrale: per l'area sud-occidentale si passa da un aumento contenuto entro +5 giorni/anno per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a +40 giorni/anno per le stesse aree con RCP8.5.

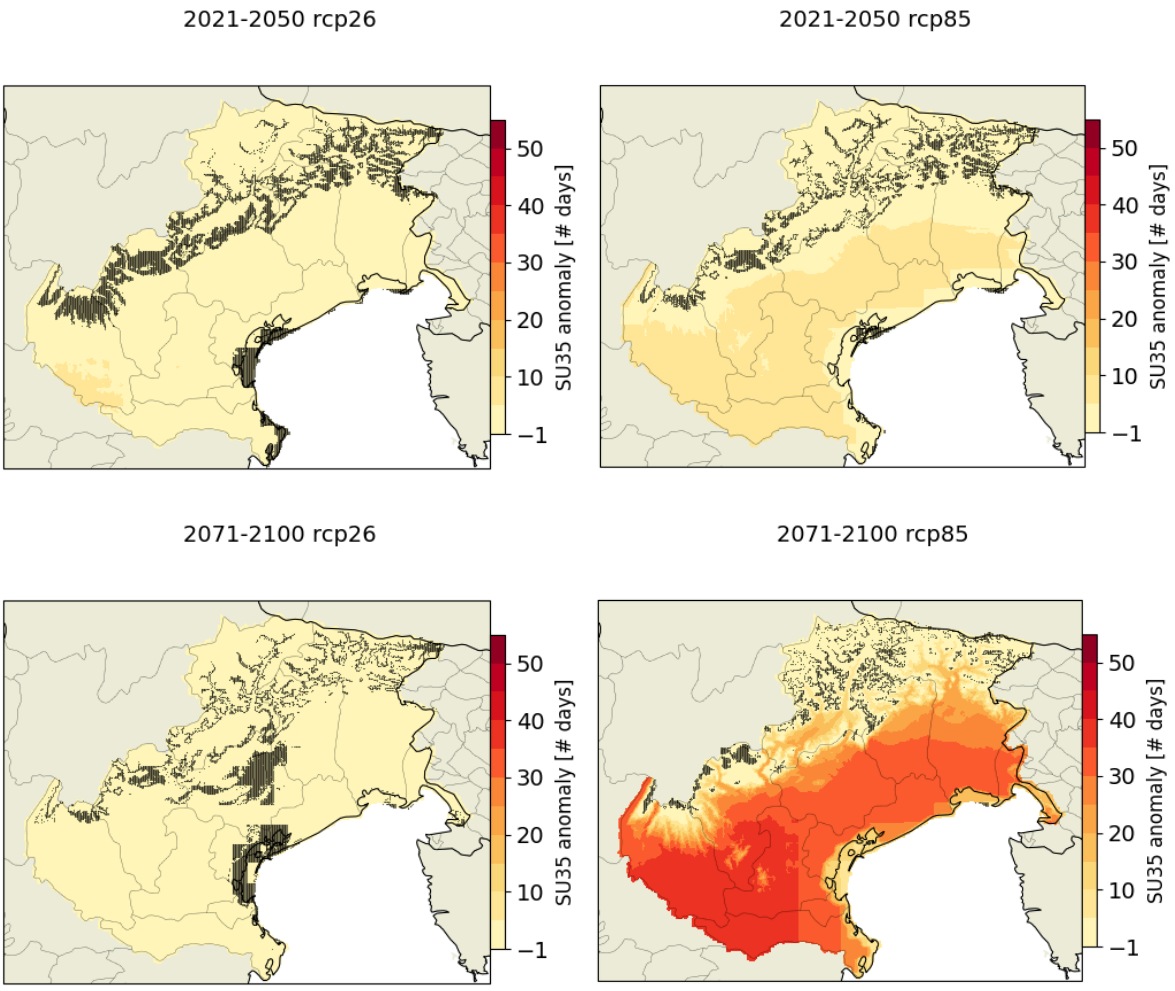


Figura 20. Distribuzione geografica dell'anomalia del numero di giorni torridi, definiti come giorni con temperatura massima maggiore di 35 °C (SU35) (unità: n. giorni/anno), per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

Se si considera la stazione di Legnaro (PD) identificativa dell'area della pianura centrale si nota, nella figura 21, che si passa da valori attorno ai 5 gg/anno nello storico di riferimento 1976-2005 fino a valori oltre i 45 gg/anno a fine secolo nello scenario con nessuna mitigazione.

Interessante è il caso in figura 22 che riporta il grafico di Feltre (BL), nella val Belluna e identificativa di un'area alpina di fondovalle. Si nota che si passa da un numero di eventi trascurabile nello storico di riferimento 1976-2005 fino a valori oltre i 25 gg/anno a fine secolo nello scenario con nessuna mitigazione.

L'indicatore SU30 è disponibile sulla piattaforma CliNE sia per il periodo storico sia per le proiezioni climatiche future ed è riportato nel Bollettino meteoclimatico mensile e stagionale per il periodo estivo e nel riepilogo annuale. Gli indicatori SU30 e SU35 sono inoltre disponibili per il download tramite API.

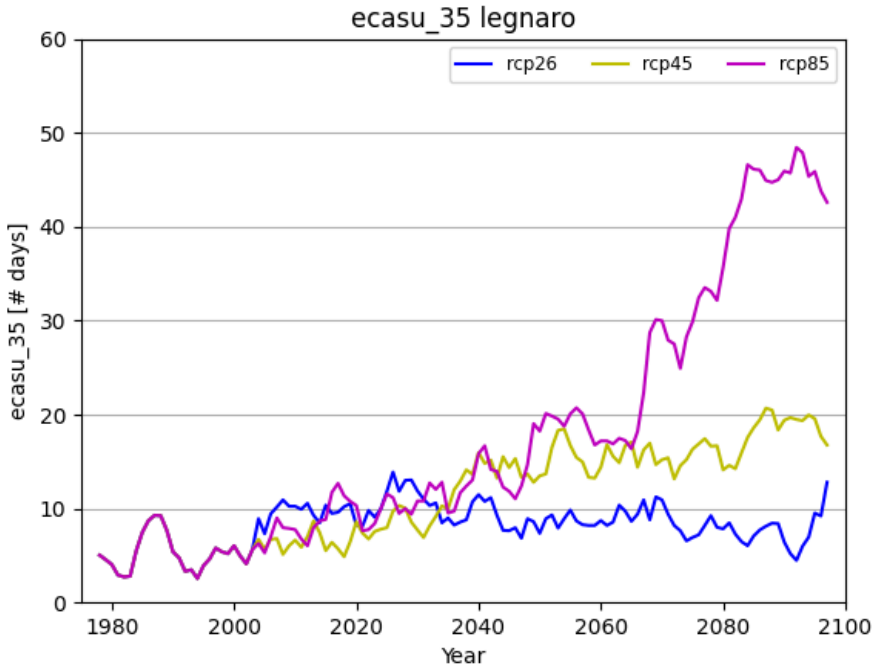


Figura 21. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei giorni torridi (unità: #giorni/anno) a Legnaro (PD) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati. Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa).

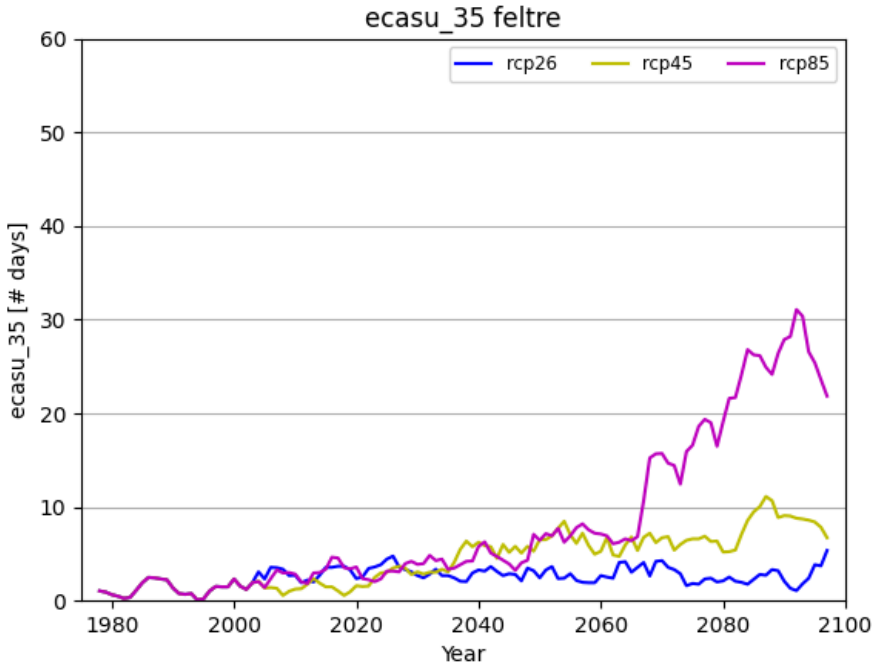


Figura 22. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei giorni torridi (unità: #giorni/anno) a Feltre (BL) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati. Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa).

Warm-Spell Duration Index (WSDI) e Heat-Wave Duration Index (HWDI)

Il Warm Spell Duration Index, WSDI, descrive le ondate di calore in funzione della loro durata. La definizione utilizzata è presente nel sito web Copernicus alla pagina relativa agli indicatori (Indices dictionary). Viene definita WSDI, misurata in giorni, la somma dei periodi di almeno 6 giorni consecutivi nei quali la temperatura massima giornaliera registrata supera il 90° percentile calcolato su una finestra mobile di 5 giorni centrata sul giorno in esame considerando tutto il trentennio di riferimento 1991-2020.

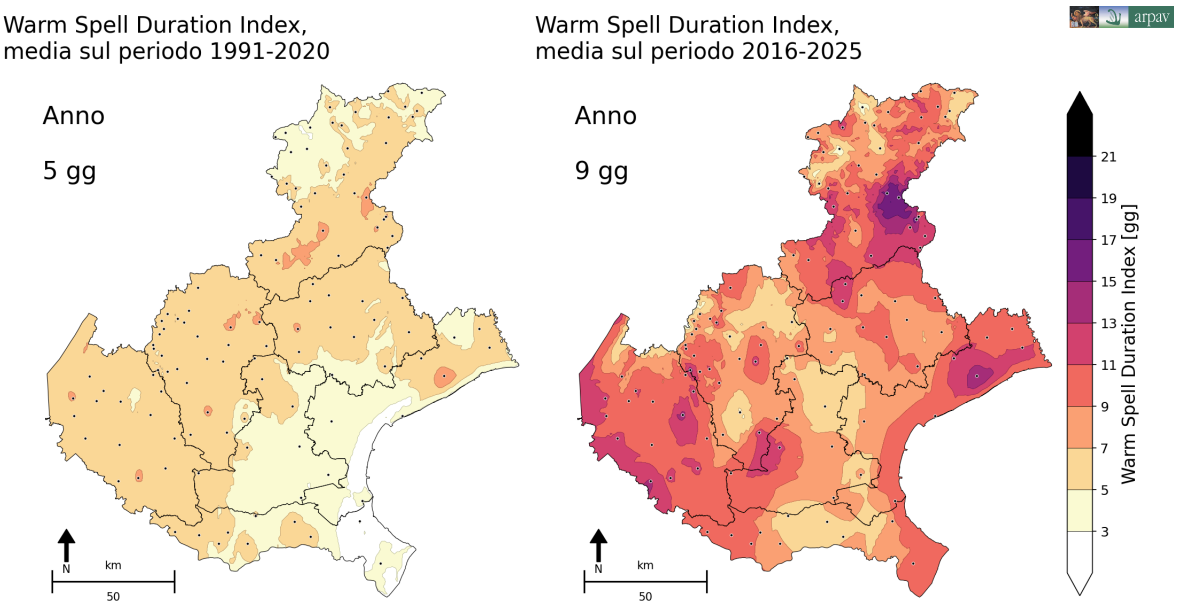


Figura 23. Lunghe ondate di calore o caldo anomalo (WSDI) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

La figura 23 mostra come sul Veneto l'indicatore sia quasi raddoppiato negli ultimi 10 anni, dal 2016 al 2025, rispetto al periodo di riferimento 1991-2020 passando da 5 giorni a 9 giorni. Questo indica che è in atto un aumento della frequenza e durata delle ondate di calore più lunghe.

Per come questo indicatore è definito, considerando solo le ondate di calore con più di 6 giorni consecutivi con temperature massime oltre il novantesimo percentile valutato sul trentennio di riferimento, risulta molto selettivo ed il grafico che si ricava (figura 24) presenta numerosi anni con valori bassi e non permettendo di individuare un trend robusto. Si percepisce però, guardando alla media decennale, la linea rossa tratteggiata, un incremento nella frequenza delle lunghe ondate di calore.

Un ulteriore indicatore utilizzato per descrivere la persistenza delle ondate di calore è l'Heat Wave Duration Index (HWDI). Nella definizione originaria proposta da Frich et al. (2002), l'HWDI rappresenta la durata del più lungo periodo dell'anno costituito da almeno cinque giorni consecutivi nei quali la temperatura massima giornaliera supera di almeno 5 °C la corrispondente temperatura massima climatologica del giorno.

Nel presente lavoro e sulla piattaforma CliNE è stata adottata una formulazione leggermente diversa (Gallina and Giorgi, 2018). L'indicatore considera infatti periodi di almeno cinque giorni consecutivi nei quali la temperatura massima supera di almeno 5 °C la temperatura massima climatologica, quest'ultima calcolata mediante una finestra mobile centrata di 5 giorni sul periodo di riferimento 1976-2005.

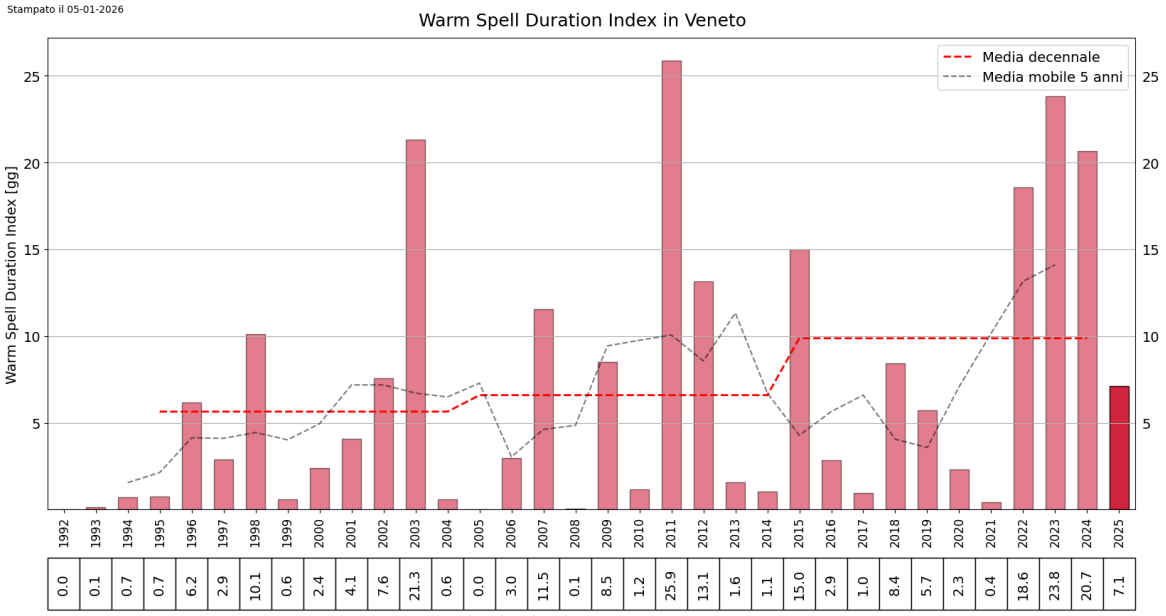


Figura 24. Grafico a barre del numero di giorni con ondata di calore o periodo di caldo anomalo di lunga durata (WSDI). La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Si tratta di un indicatore particolarmente selettivo, che nella climatologia storica individua un numero limitato di eventi.

Le proiezioni climatiche mostrano invece un marcato incremento della durata delle ondate di calore individuate dall'HWDI, con aumenti progressivamente maggiori al crescere dello scenario emissivo considerato.

La figura 25 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 2071-2100 per RCP2.6 l'anomalia rimane compresa tra 0 e +5 giorni/anno, ma per RCP8.5 aumenta fortemente: entro i +25 giorni/anno nelle aree costiere, fino a +25/30 giorni/anno in pianura e fino a +35 giorni/anno in alcune aree di pianura del Friuli-Venezia Giulia e delle Dolomiti.

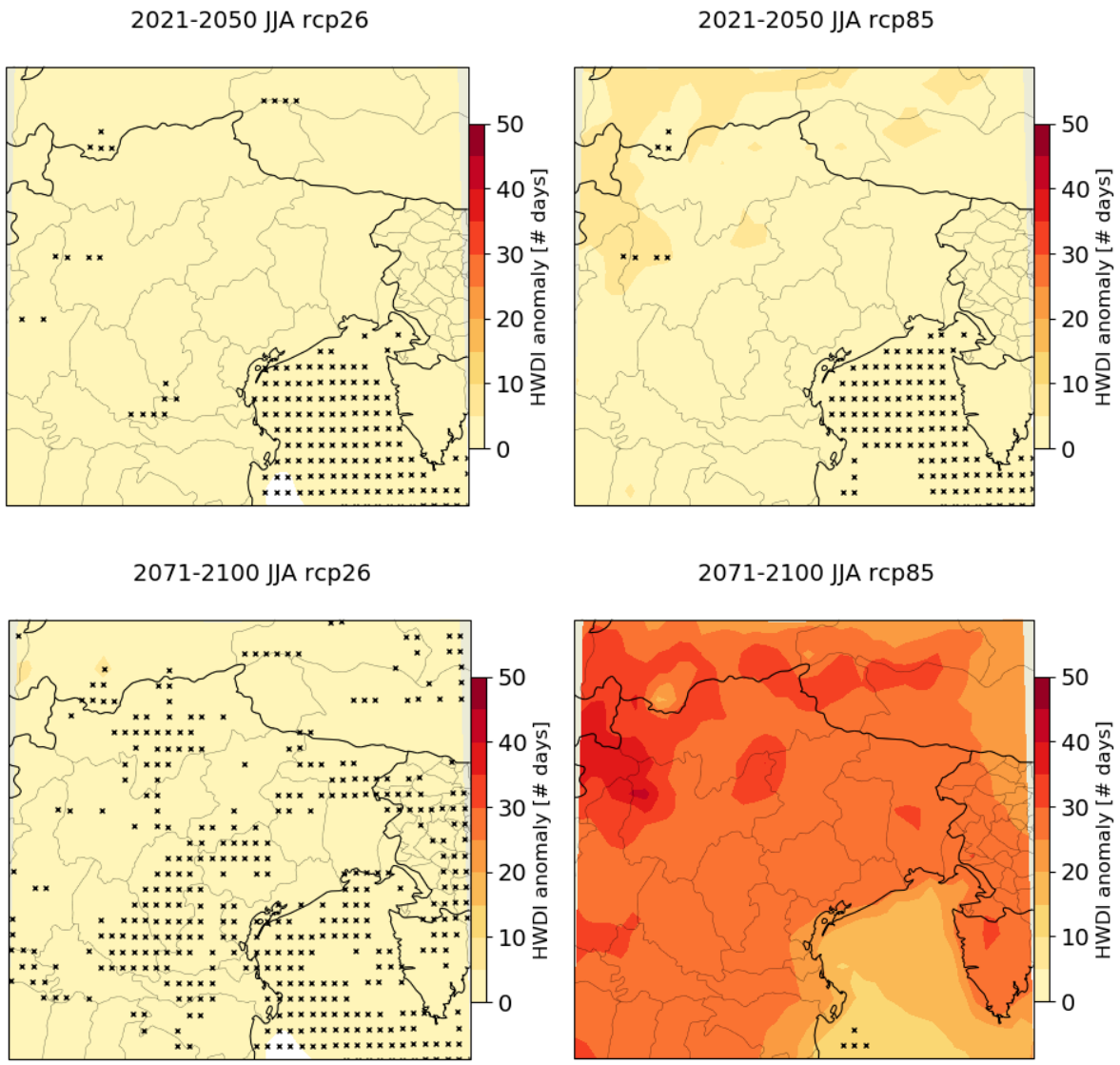


Figura 25. Distribuzione geografica dell'anomalia dell'indice di durata delle ondate di calore (HWDI) (unità: n. giorni/anno) in estate per il periodo 2021-2050 (pannelli superiori) e 2071-2100 (pannelli inferiori) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005; il lato sinistro/destro si riferiscono a RCP2.6/RCP8.5. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo fra i modelli è basso.

L'indicatore WSDI è disponibile tramite API e viene riportato nel Bollettino meteoclimatico annuale. L'indicatore HWDI è disponibile sulla piattaforma CliNE per le proiezioni climatiche future.

Heat-Wave Magnitude Index (HWMI) e Heat-Wave Magnitude Index daily (HWMId)

L'Heat Wave Magnitude Index (HWMI) è un metodo di stima delle ondate di calore che punta a descriverne, tramite specifici sotto-indicatori, sia l'intensità sia la durata.

L'implementazione adottata si basa, in particolare, sulle definizioni presenti nell'articolo Indexing of Heatwaves in Ukraine (Shevchenko et al, 2020), dove vengono applicate all'estate del 2010 in Ucraina. Per conferma e per risolvere alcuni dubbi metodologici, è stato preso in considerazione anche l'articolo: Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world (Russo et al, 2014), che analizza le più estese ondate di calore del passato e applica le procedure di calcolo ai modelli climatici per prevederne i trend futuri.

Le ondate di calore vengono individuate quando la temperatura massima giornaliera registrata supera per almeno 3 giorni consecutivi il 90° percentile, calcolato su una finestra mobile di 31 giorni centrata sul giorno in esame e considerando l'intero trentennio di riferimento 1991-2020.

Le ondate di calore così individuate vengono poi suddivise in sub-ondate della durata di 3 giorni. Nel caso in cui il numero di giorni dell'ondata non sia un multiplo di 3, vengono aggiunti alla parte finale 1 o 2 giorni in modo da completare l'ultima sub-ondata.

A ciascuna sub-ondata viene assegnato un valore pari alla somma delle 3 temperature massime giornaliere, successivamente trasformato in una probabilità di non superamento su una scala da 0 a 1. A tale scopo si applica il Kernel Density Estimator (KDE), un metodo non parametrico per la stima della funzione di densità di probabilità, accoppiato alla funzione di distribuzione cumulata empirica (ECDF). I valori assegnati alle sub-ondate appartenenti alla stessa ondata di calore vengono infine sommati per ottenere la magnitudo complessiva dell'ondata.

Con i valori così ottenuti è possibile calcolare, sul periodo scelto, una serie di indicatori statistici che descrivono molti degli aspetti caratterizzanti delle ondate di calore:

- HWMI: la somma delle magnitudo di tutte le ondate.
- HWX: la massima magnitudo registrata.
- HWN: il numero totale di ondate. Questo indicatore conteggia indifferentemente le ondate di calore estive o invernali, lunghe o brevi.
- HWD: la durata (in giorni) dell'ondata di calore più lunga.
- HWF: la somma di tutti i giorni di tutte le ondate di calore.
- HWM: la media delle magnitudo delle ondate.
- HWA: la massima temperatura massima registrata durante la sub-ondata con la magnitudo più alta.

Questo indicatore, unitamente a tutti i sotto-indicatori ad esso collegati, valuta le ondate di calore come anomalie termiche positive che possono verificarsi in qualsiasi stagione. Di conseguenza, non va interpretato come un indice di disagio fisico o bioclimatico umano, specialmente se valutato sull'intero arco dell'anno.

Con una attenta analisi si evidenziano i limiti intrinseci di alcuni sotto-indicatori: la media delle magnitudo (HWM) risulta potenzialmente fuorviante e poco rappresentativa se non abbinata al numero totale di eventi (HWN), mentre la temperatura massima della sub-ondata più intensa (HWA) offre una descrizione solo parziale e poco funzionale del fenomeno nel suo complesso, specie quando si confrontano diverse annate della serie storica.

Il sotto-indice **HWF (Heat Wave Frequency)** risulta il migliore da utilizzare per introdurre semplificazioni rispetto al concetto di magnitudo ma al contempo ben individua i periodi con ondate di calore. Per il calcolo dell'HWF si conteggiano tutti i giorni, almeno 3, con temperatura massima giornaliera oltre al 90° percentile delle temperature massime della climatologia di riferimento 1991-2020, valutato su finestra mobile di 31 giorni centrata sul giorno in esame.

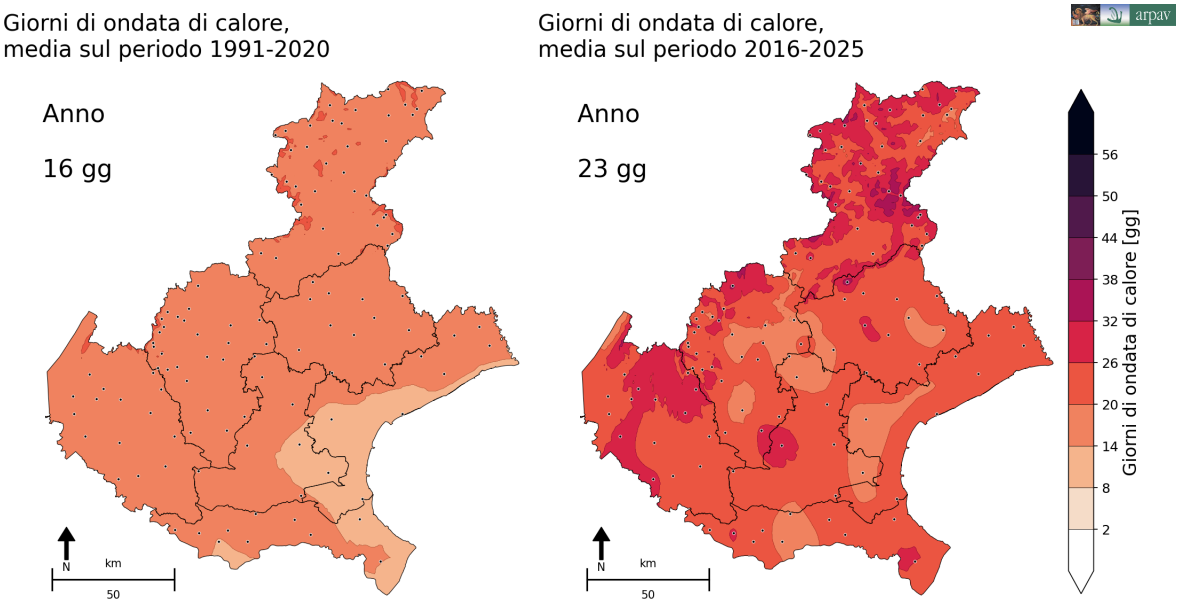


Figura 26. Frequenza delle ondate di calore o periodi di caldo anomalo (HWF) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Nelle mappe in figura 26, dal confronto tra la frequenza delle ondate di caldo anomalo nel periodo di riferimento 1991-2020 e nell'ultimo decennio 2016-2025, risulta evidente un importante incremento dei giorni affetti da ondata di calore, che interessa l'intero territorio regionale.

Il grafico a barre in figura 27, per l'intera regione, evidenzia un trend di aumento statisticamente significativo di quasi +4 giorni per decennio. La linea rossa tratteggiata, che rappresenta la media decennale, è caratterizzata da un forte incremento proprio nell'ultimo decennio, con diverse annate che si posizionano tra i primi posti dell'intera serie storica.

Anche per l'HWMId, Heat Wave Magnitude Index daily, l'implementazione adottata si basa sulle definizioni presenti nel citato articolo Indexing of Heatwaves in Ukraine (Shevchenko et al, 2020).

Come per l'HWMI, la definizione di ondata di calore prevede che la temperatura massima giornaliera superi per almeno 3 giorni consecutivi il 90° percentile, calcolato su una finestra mobile di 31 giorni nel trentennio di riferimento 1991-2020.

A differenza del precedente, tuttavia, questo indicatore assegna a ogni singolo giorno un valore che ne descrive la magnitudo. Questa magnitudo giornaliera viene determinata confrontando la temperatura massima del giorno con la variabilità climatica del trentennio di riferimento. Nello specifico, se la temperatura massima giornaliera è superiore al 25° percentile della serie storica, la magnitudo è definita dal rapporto tra lo scarto della temperatura rispetto a questo 25° percentile e l'intervallo interquantile compreso tra il 75° e il 25° percentile delle temperature massime del trentennio. Nel caso in cui, invece, la temperatura massima giornaliera risulti minore o uguale al 25° percentile, alla magnitudo del giorno viene assegnato un valore pari a zero.

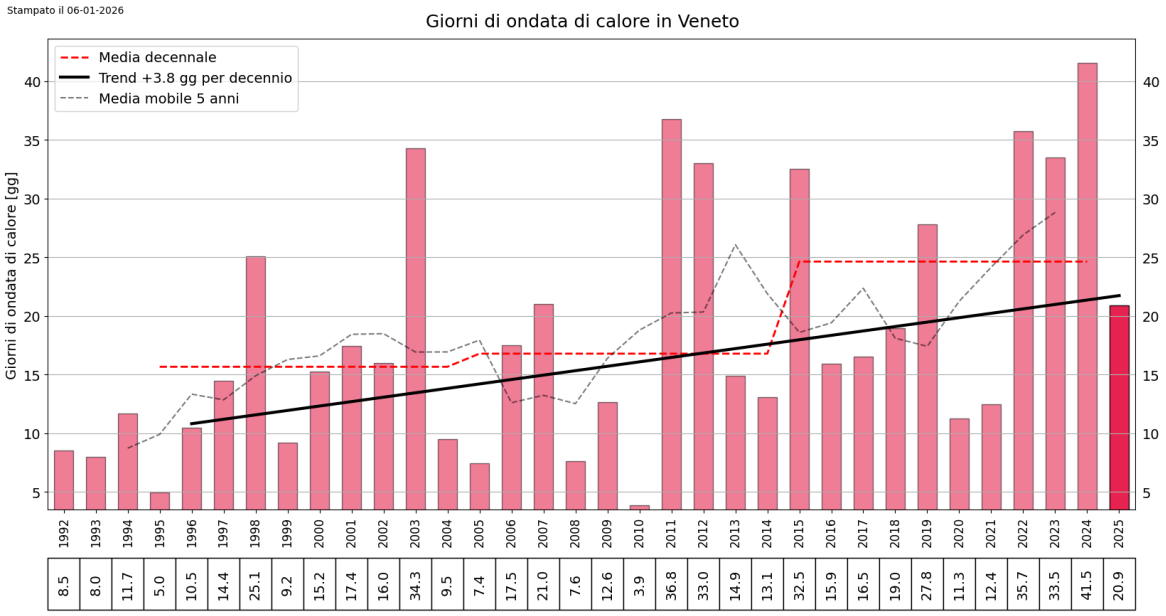


Figura 27. Grafico a barre del numero di giorni con ondata di calore o periodo di caldo anomalo (HWF). La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Nella routine di calcolo, una volta individuate le ondate di calore di almeno 3 giorni, si determinano i valori del 25° e del 75° percentile di tutte le temperature massime registrate nel periodo di riferimento e si applica questo criterio di proporzionalità per ricavare la magnitudo giornaliera. Infine, l'indicatore globale HWMId sul periodo scelto è dato dalla sommatoria di tutti i valori di magnitudo giornalieri così ottenuti.

L'andamento dell'HWMId risulta molto simile a quello dell'HWMI, in quanto il metodo di calcolo differisce solo nella granularità temporale dell'assegnazione della magnitudo (giornaliera anziché per sub-ondate tridurne). La valutazione di HWMI e HWMId sull'intero anno, oltre a limitare la presenza di valori nulli nel dataset, ha il vantaggio di assegnare un peso (la magnitudo) maggiore alle ondate estive e comparativamente minore ai periodi caldi anomali che si verificano nelle altre stagioni.

Concludendo questa prima analisi comparativa tra i diversi metodi di stima, emergono differenze sostanziali nella capacità descrittiva dei parametri considerati:

- Il WSDI (Warm Spell Duration Index) si rivela inadeguato per un monitoraggio continuo, in quanto strutturalmente caratterizzato da un numero eccessivo di valori nulli all'interno delle serie storiche.
- Anche l'indice HWDI si dimostra troppo stringente per la climatologia storica e per il monitoraggio meteoclimatico.
- L'HWMI e i suoi sotto-indicatori offrono una panoramica più robusta, individuando e ben descrivendo le anomalie termiche positive sull'intero arco dell'anno, risentendo però di una elevata complessità nel calcolo.

Tra tutti i parametri esaminati, l'indicatore HWF (la somma di tutti i giorni di tutte le ondate di calore) si dimostra la scelta migliore e più funzionale. A differenza di indici complessi o mediati,

l'HWF fornisce una misura cumulativa diretta ed estremamente rappresentativa della persistenza del fenomeno. Evitando le distorsioni statistiche delle medie e i limiti di rappresentatività degli indici di magnitudo pura, l'HWF riesce a sintetizzare efficacemente sia la frequenza sia l'estensione temporale delle anomalie termiche, configurandosi come lo strumento più solido per la descrizione e il confronto delle ondate di calore nel periodo scelto.

Gli indicatori HWMI e HWMId, insieme ai relativi sottoindici, sono disponibili tramite API. Il Bollettino meteoclimatico riporta inoltre l'indicatore HWF nei riepiloghi stagionali e annuali.

Ondate di forte disagio fisico

Questo indicatore trae spunto e semplifica le valutazioni che portano i previsori del Servizio Meteo dell'ARPAV a segnalare l'arrivo di un periodo di forte disagio fisico. Per questo indicatore l'ondata di calore si definisce come il superamento per il valore dell'Humidex medio giornaliero della soglia dei 35 °C per almeno due giorni consecutivi, alternati da notti tropicali con temperatura minima superiore ai 20 °C, tali da non consentire il recupero dall'effetto del calore diurno.

Definite così le ondate di calore, per ogni periodo, è possibile calcolare l'ondata di calore più lunga e la somma di tutti i giorni con ondate di calore. Per come viene definito l'indice, le ondate di calore legate al disagio fisico si riscontrano quasi esclusivamente durante la stagione estiva.

Nella figura 28, il confronto tra la mappa del trentennio di riferimento 1991-2020 e l'ultimo decennio mostra un forte aumento dei giorni di forte disagio fisico, che sulla pianura mediamente raddoppiano passando da 5 a 10 giorni. Appare evidente come le ondate di forte disagio fisico siano sempre più presenti nella pianura interna.

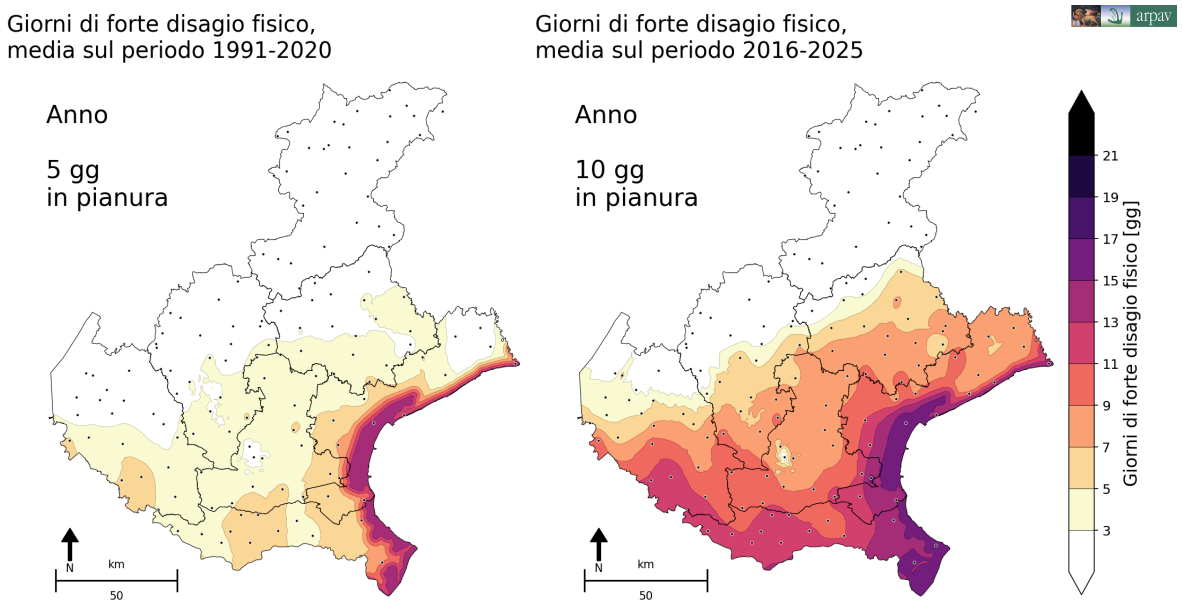


Figura 28. Frequenza delle ondate di forte disagio fisico (HuxWF) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dalla interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Il grande aumento delle ondate di forte disagio fisico è testimoniato anche dal grafico a barre (figura 29) che dal 1991 mostra il numero di giorni mediamente interessati dal fenomeno sulla pianura veneta.

Se nel passato si avevano tra i 2 e i 3 giorni all'anno, ora, nell'ultimo decennio, si contano mediamente 10 giornate per anno. L'aumento è particolarmente evidente nell'ultimo decennio ed è confermato dal trend che risulta statisticamente significativo con +3.6 giorni per decennio.

Data l'elevata rilevanza di questo indicatore per la salute della popolazione in particolare umana ma anche animale e vegetale, ARPAV e la Protezione Civile del Veneto hanno integrato la gestione del disagio fisico nei propri strumenti operativi. In particolare, il monitoraggio delle ondate di calore e del disagio bioclimatico è entrato a far parte del Bollettino Multirischio regionale, fornendo un supporto fondamentale per l'attivazione dei piani di risposta e di emergenza sul territorio. Parallelamente, sul sito web di ARPAV è presente una sezione dedicata all'Indice di

Disagio Fisico (Humidex), consultabile con aggiornamenti su base oraria per seguire in tempo reale l'andamento del fenomeno attraverso la rete di stazioni meteo.

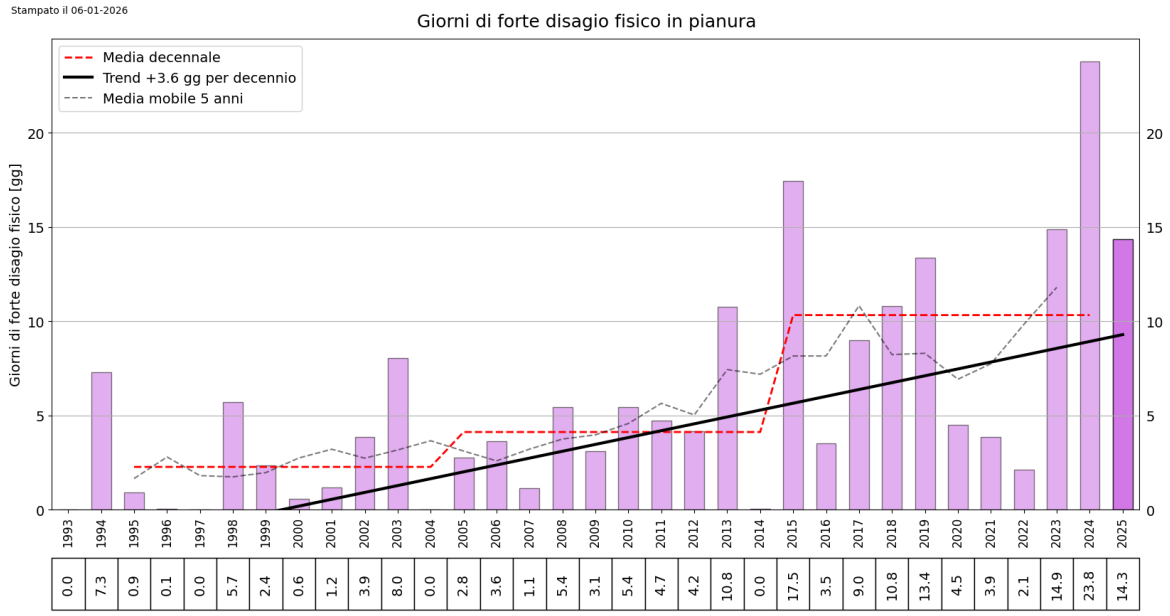


Figura 29. Grafico a barre del numero di giorni con ondata di forte disagio fisico (HuxWF) in pianura. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Va tuttavia precisato che per questo indicatore non sono disponibili proiezioni climatiche in quanto si è scelto di non utilizzare l'umidità fornita dai modelli per l'elaborazione degli scenari futuri. L'umidità relativa è infatti una variabile estremamente fluttuante e fortemente influenzata dalle micro-condizioni locali (come l'uso del suolo, l'evapotraspirazione o i regimi di brezza); ciò rende particolarmente complessa l'applicazione delle tecniche di downscaling e bias correction, necessarie per adattare i dati dei modelli globali e regionali alla scala di dettaglio del territorio veneto.

Per superare questo limite metodologico e stimare l'evoluzione del disagio fisico sul lungo periodo, si ricorre all'andamento delle notti tropicali (TR) come efficace proxy (indicatore indiretto).

Le notti tropicali si verificano infatti in presenza di masse d'aria calde e umide che impediscono il raffrescamento notturno, registrando un andamento storico del tutto paragonabile a quello delle ondate di forte disagio fisico.

Le figure 30 e 31 sono tratte dalla sezione del sito ARPAV dedicata all'Indice di Disagio Fisico, che consente di consultare in tempo reale i dati della rete di stazioni automatiche. Attraverso una mappa interattiva è possibile monitorare la situazione sul territorio: ciascuna stazione è contraddistinta da una colorazione che riflette il livello di disagio biometrico rilevato, basato su una scala cromatica che va dalla classe "Assente" (Humidex inferiore a 27 °C) fino a "Molto intenso" (Humidex superiore a 45 °C).

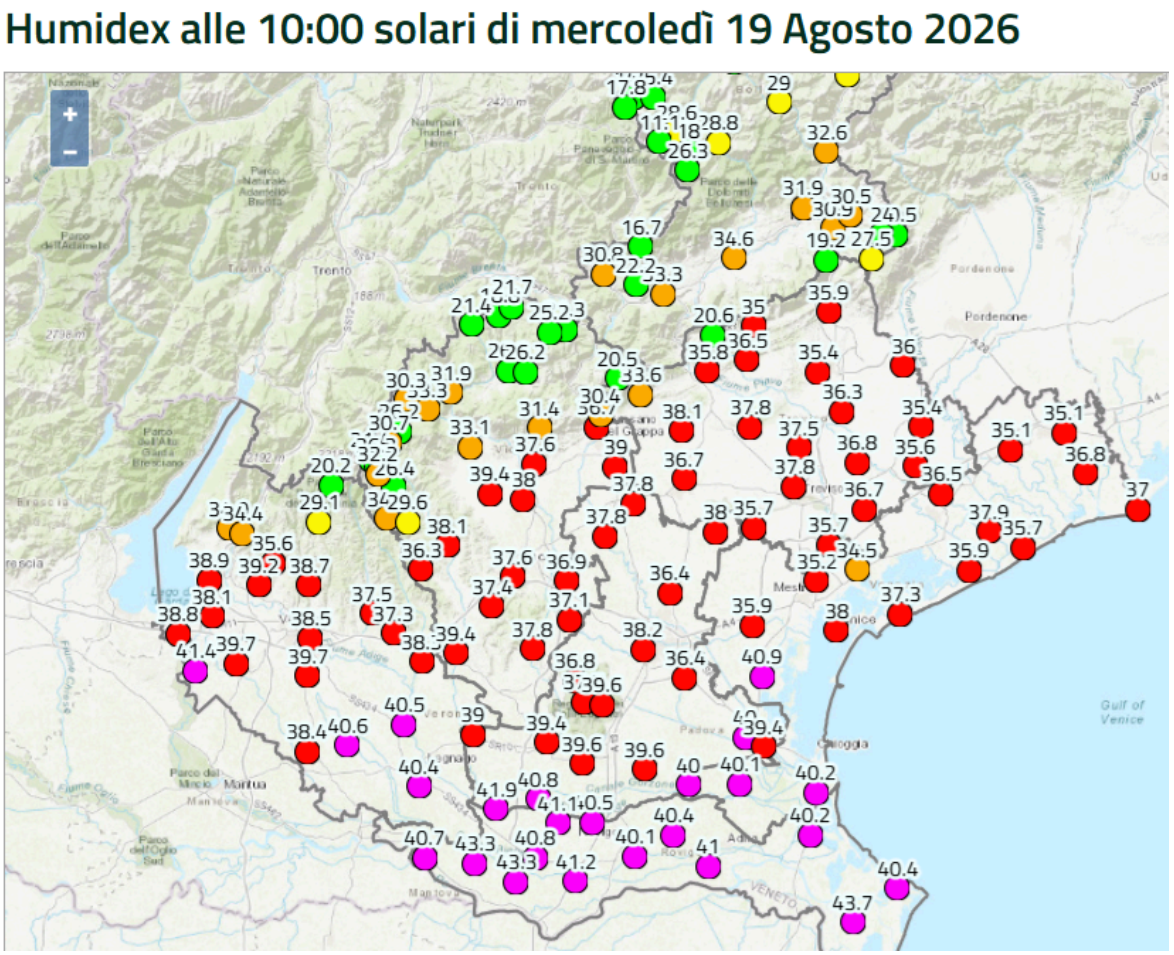
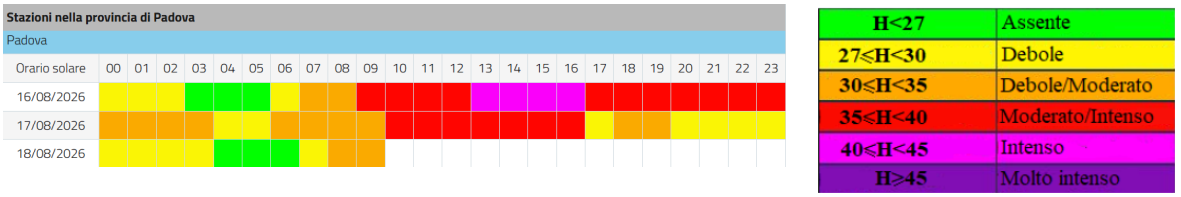


Figura 30. Mappa dell'indice Humidex aggiornata ogni ora, consultabile nel periodo estivo sul sito web di ARPAV nella sezione "Indice disagio fisico" tra i "bollettini meteo".



Stazioni nella provincia di Padova																							
Padova																							
Orario solare	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
16/08/2026																								
17/08/2026																								
18/08/2026																								

H<27	Assente
27≤H<30	Debole
30≤H<35	Debole/Moderato
35≤H<40	Moderato/Intenso
40≤H<45	Intenso
H≥45	Molto intenso

Figura 31. A sinistra, tabella con la classe oraria di disagio fisico degli ultimi tre giorni per ciascuna stazione, suddivisa per provincia, consultabile in calce alla mappa dell'indice Humidex. A destra, la legenda che associa i diversi colori alle classi di disagio fisico.

Al di sotto della mappa, una tabella dinamica, integrata con la selezione direttamente da mappa, permette di analizzare nel dettaglio l'andamento orario dell'indice e la sua distribuzione nelle diverse classi di Humidex negli ultimi tre giorni per tutte le stazioni monitorate.

L'indicatore HuxWF è disponibile tramite API ed è riportato nel Bollettino meteoclimatico nei riepiloghi stagionali estivi e annuali.

Notti tropicali (TR)

Una notte viene definita “tropicale” (TR) quando la temperatura minima dell'aria non scende mai al di sotto dei 20 °C nell'arco delle 24 ore.

Questo valore soglia rappresenta un limite critico per il benessere fisiologico: quando la temperatura esterna si mantiene pari o superiore ai 20 °C, le abitazioni non riescono a disperdere l'accumulo termico della giornata, portando le temperature interne degli ambienti domestici a stabilizzarsi frequentemente attorno o al di sopra dei 30 °C. In tali condizioni, la ventilazione naturale dei locali diventa inefficace.

L'impossibilità di rinfrescare gli ambienti impedisce al corpo umano di rilasciare il calore accumulato durante il giorno. Viene così a mancare la fondamentale fase di recupero termico e metabolico notturno, appesantendo l'organismo e determinando uno stress fisiologico continuativo che aumenta significativamente i rischi per la salute, in particolare per le persone fragili, gli anziani e i soggetti con patologie croniche.

Anche il numero di notti tropicali in pianura è raddoppiato nell’ultimo decennio rispetto al valore normale del trentennio di riferimento 1991-2020. Le aree maggiormente affette dal fenomeno sono quelle di pianura e collina, con valori più elevati sulla costa e sulla pedemontana (figura 32).

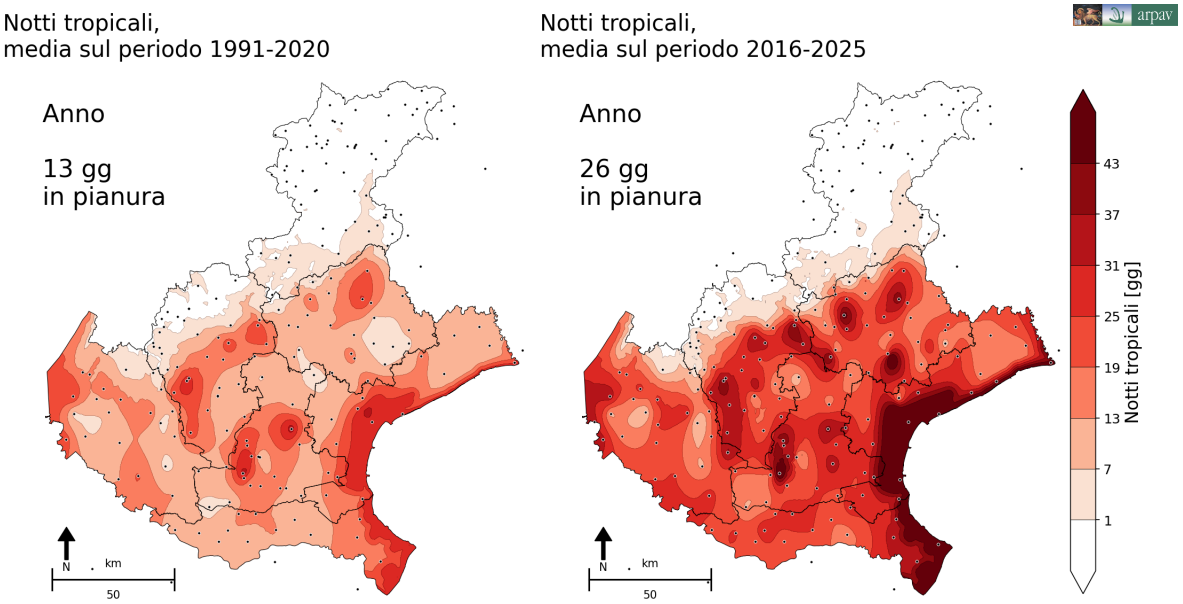


Figura 32. Notti tropicali (TR) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell’ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall’interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Il grafico a barre in figura 33 evidenzia un trend per la pianura che è in crescita e statisticamente significativo. Vale +8.4 giorni per decennio; da meno di 10 notti tropicali all’anno negli anni ‘90, infatti, si è passati a 26 notti tropicali nell’ultimo decennio, ma si è raggiunto un picco eccezionale nel 2024 con quasi 50 notti tropicali.

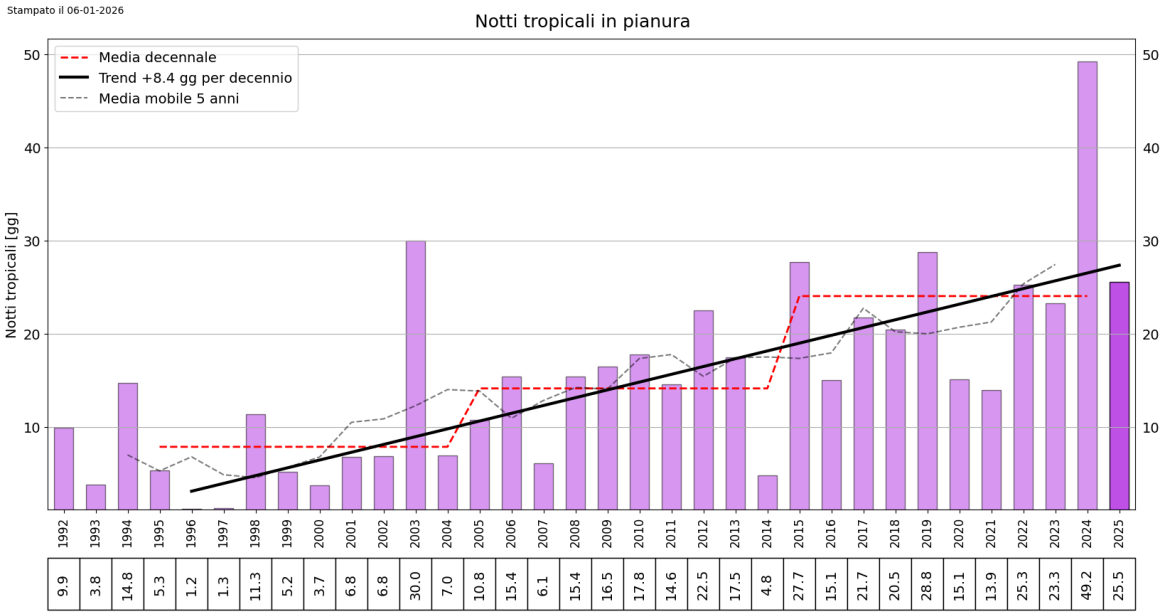


Figura 33. Grafico a barre del numero di giorni notti tropicali (TR) in pianura. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Dal punto di vista metodologico, la notte tropicale costituisce un parametro solido ed efficace per monitorare e proiettare lo stress bioclimatico sia nelle analisi storiche sia negli scenari futuri:

- Affidabilità modellistica: La temperatura minima notturna è una variabile puramente termica, esente dalle forti fluttuazioni e dalle complessità di downscaling e bias correction tipiche dell'umidità relativa.

- Valore di proxy: Le notti tropicali si registrano prevalentemente in concomitanza con masse d'aria calde e altamente umide che bloccano il raffrescamento serale. Per questo motivo, l'andamento delle notti TR rispecchia in modo fedele l'evoluzione e la frequenza delle condizioni di grave disagio fisico da caldo-umido sul territorio.

L'analisi di questo indice consente dunque di ricostruire in modo coerente le variazioni del clima passato e di valutare con buona precisione quali saranno le traiettorie e le frequenze del fenomeno negli scenari climatici futuri.

Passando alle proiezioni climatiche future, la distribuzione geografica dell'anomalia delle notti tropicali è mostrata nella figura 34 per i trentenni 2021-2050/2071-2100 (parte superiore/inferiore) e RCP2.6/RCP8.5 (sinistra/destra). Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e un segnale climatico più marcato per l'area costiera. A fine secolo si passa da un aumento fino a +15 giorni/anno in pianura e +20 giorni/anno nell'area costiera nello scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a +65 giorni/anno in pianura e +70 giorni/anno per la costa con RCP8.5.

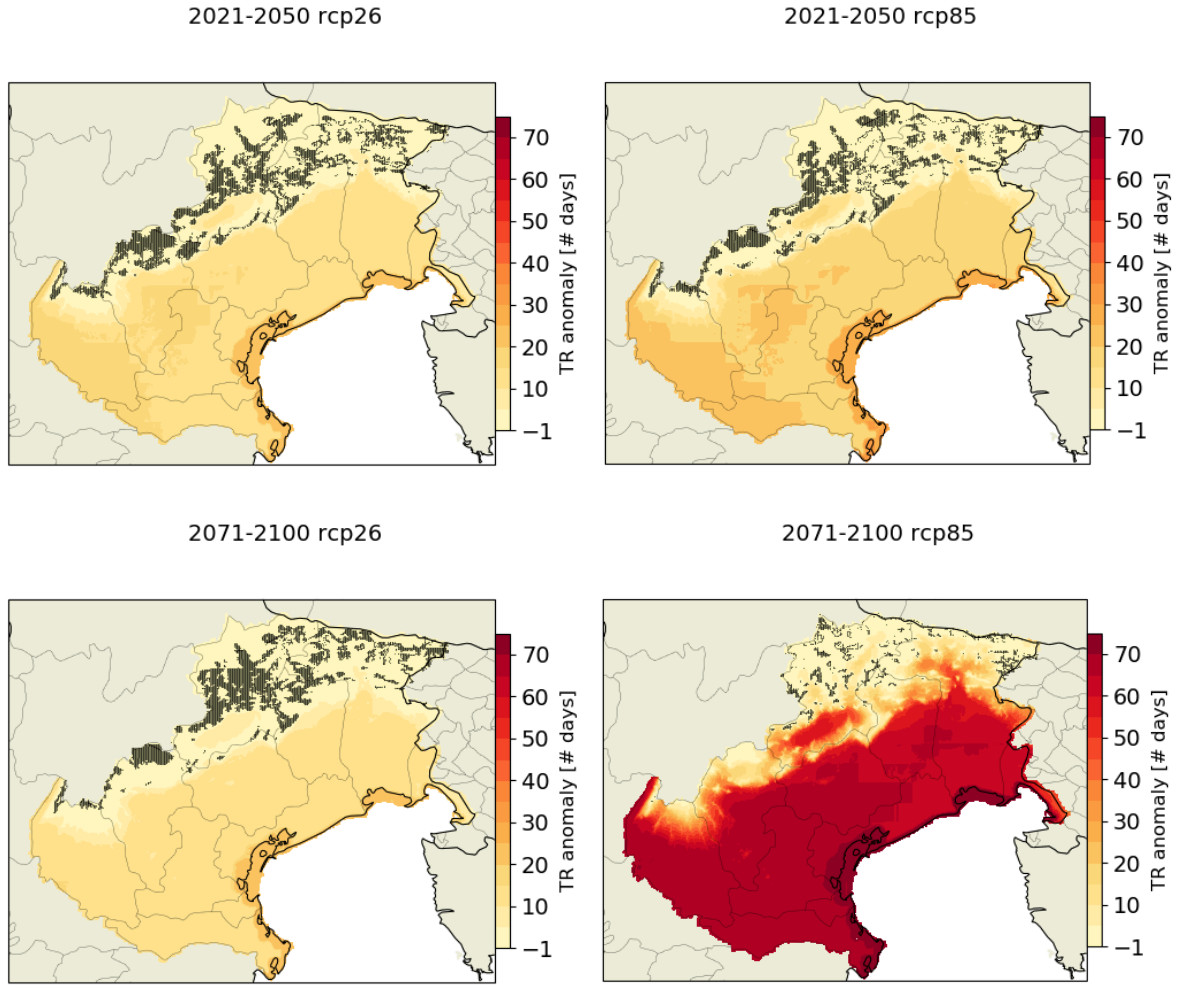


Figura 34. Distribuzione geografica dell'anomalia delle notti tropicali, ovvero i giorni con temperatura minima maggiore di 20 °C (TR) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) e per lo scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli è basso.

Se si considera la stazione di Cavallino-Treporti (VE) identificativa dell'area del litorale centrale si nota che si passa da valori osservati attorno ai 30 gg/anno nello storico 1991-2020 fino a valori oltre i 110 gg/anno a fine secolo nello scenario senza nessuna mitigazione (figura 35).

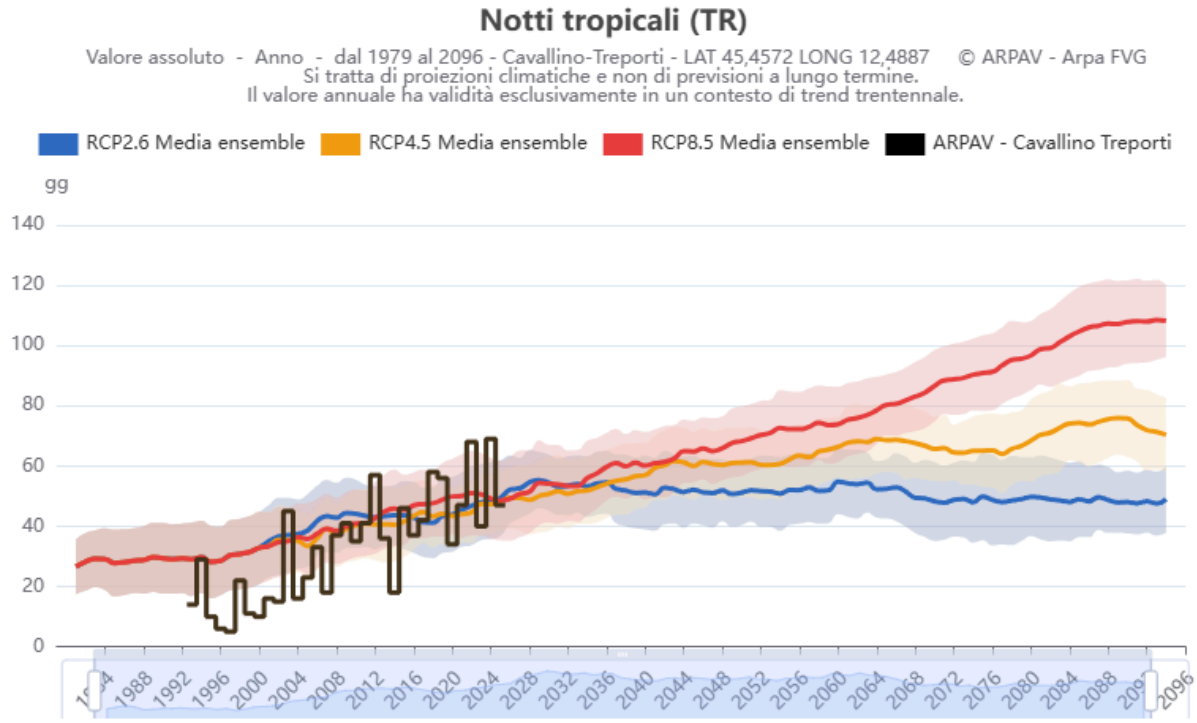


Figura 35. Serie annuale (media mobile su 11 anni) delle notti tropicali (unità: #giorni/anno) a Cavallino-Treporti (VE) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa). La linea nera dal 1992 al 2025 rappresenta le osservazioni annuali presso la stazione meteorologica di Arpa Veneto - Cavallino Treporti.

L'indicatore TR è disponibile sulla piattaforma Cline sia per il periodo storico sia per le proiezioni climatiche future ed è riportato nel Bollettino meteoclimatico mensile e stagionale per il periodo estivo e nel riepilogo annuale. L'indicatore è inoltre disponibile per il download tramite API.

Giorni di gelo (FD)

L'indice dei giorni di gelo (noto a livello internazionale come Frost Days, FD) definisce il numero di giorni in un anno in cui la temperatura minima dell'aria scende al di sotto della soglia dello zero termico.

Sebbene non sia strettamente un indicatore di calore, inserire questo parametro all'interno di un'analisi sullo stress termico e sulla siccità può essere sensato: la progressiva riduzione dei giorni di gelo è infatti una testimonianza diretta di come il riscaldamento globale stia alterando anche la stagione fredda, con ripercussioni a cascata che vanno ad aggravare proprio le criticità legate alle disponibilità idriche nei mesi caldi.

Il confronto delle mappe in figura 36 (media 1991-2020 e ultimo decennio 2016-2025) evidenzia una riduzione delle giornate di gelo che passano da 55 a 42 in pianura,

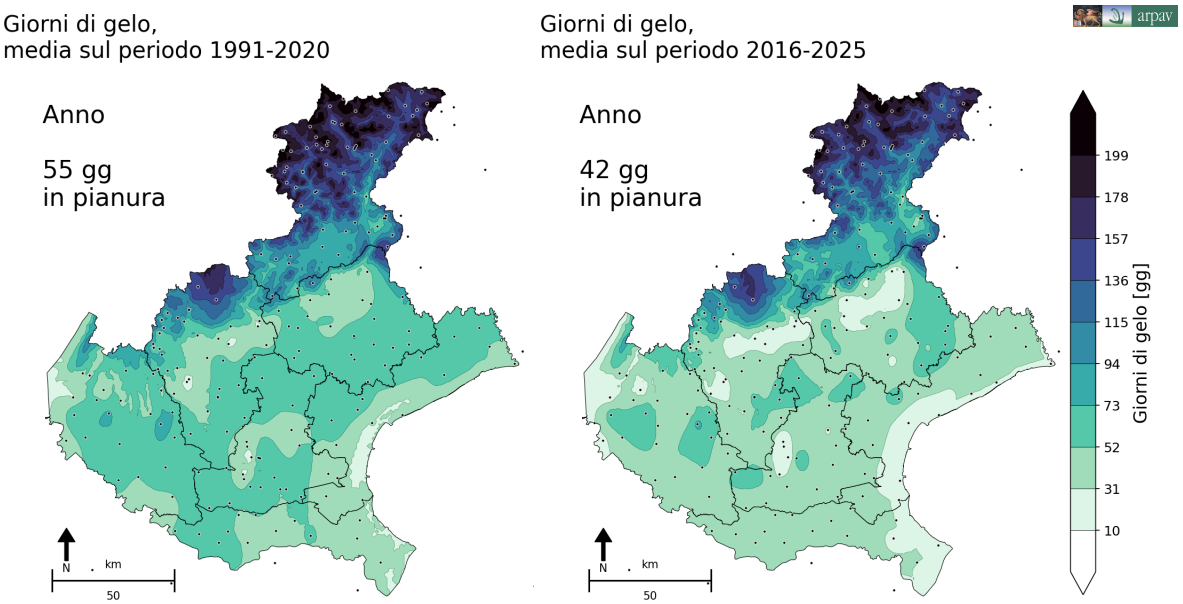


Figura 36. Giorni di gelo (FD) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

La contrazione delle giornate con temperature sotto lo zero influisce in modo determinante sul bilancio idrico del territorio ed è ben visibile nel grafico a barre dei giorni di gelo in pianura in figura 37, portato ad esempio.

Il progressivo rialzo delle temperature minime invernali fa sì che una quota sempre maggiore di precipitazioni sui rilievi cada sotto forma di pioggia anziché di neve, limitando sensibilmente la formazione del manto nevoso in quota. Allo stesso tempo, la frequente assenza di gelo accelera lo scioglimento della poca neve accumulata già verso la fine dell'inverno e l'inizio della primavera.

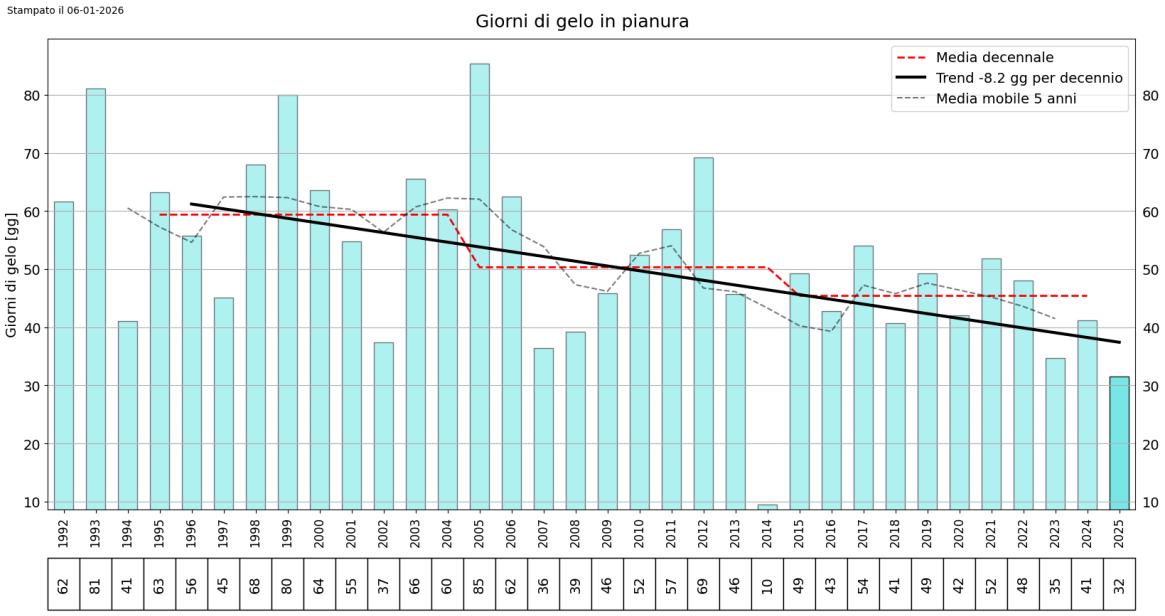


Figura 37. Grafico a barre del numero di giorni di gelo (FD) in pianura. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Questo dinamismo altera profondamente la disponibilità della risorsa idrica. Il manto nevoso e i ghiacciai rappresentano infatti un vero e proprio "serbatoio naturale", capace di rilasciare gradualmente l'acqua verso i fiumi e le falde di pianura proprio durante i mesi estivi, quando le precipitazioni scarseggiano.

La loro fusione precoce provoca la dispersione di questa preziosa riserva con largo anticipo rispetto al periodo di massimo fabbisogno, quando la domanda per l'agricoltura, il turismo e l'uso idropotabile raggiunge i picchi più elevati e il rischio di siccità si fa più concreto.

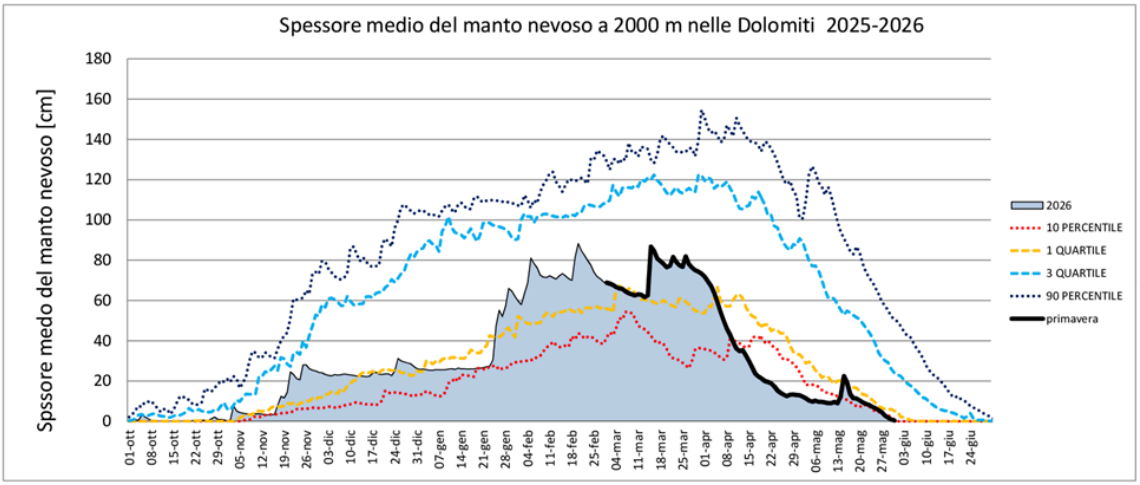


Figura 38. Spessore medio del manto nevoso a 2000 m sulle Dolomiti nella stagione 2025-2026 e confronto con la climatologia 1991-2020. Con la linea più spessa si evidenzia la rapida fusione nel periodo primaverile.

Un chiaro esempio di questo fenomeno è rappresentato dalla stagione 2025-2026 in figura 38. I dati relativi allo spessore medio del manto nevoso sulle Dolomiti mostrano come nel 2026,

classificatasi come la seconda primavera più calda mai registrata da ARPAV dall'inizio delle serie storiche dei primi anni '90, il manto nevoso sia andato incontro a una fusione estremamente rapida.

Come si evince dai grafici di confronto pubblicati nei Bollettini meteoclimatici di ARPAV, l'altezza della neve è scesa rapidamente su valori inferiori al 10° percentile, a testimonianza di un esaurimento precoce ed eccezionale della riserva nivale già all'inizio della stagione primaverile.

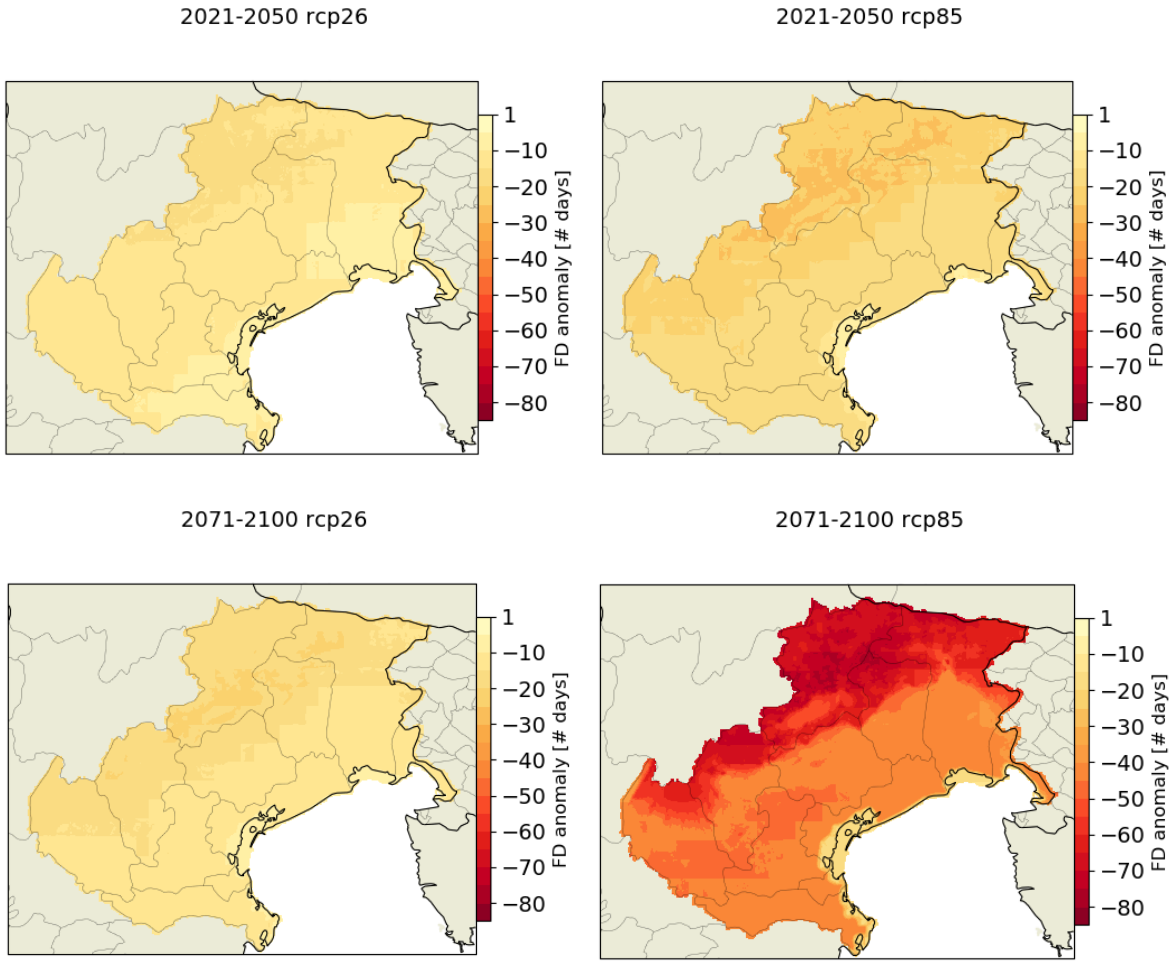


Figura 39. Distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni di gelo, ovvero i giorni con temperatura minima inferiore a 0 °C (FD) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) e per lo scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli è basso.

Passando alle proiezioni climatiche per il futuro vicino e lontano, la distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni di gelo è mostrata nella figura 39 per i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 (parte superiore e inferiore) con il confronto RCP2.6 e RCP8.5 (sinistra e destra). Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e un segnale climatico più marcato per l'area alpina.

A fine secolo si passa da una diminuzione fino a -20 giorni/anno nell'area dolomitica nello scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a -80 giorni/anno nell'RCP8.5.

La figura 40 considera la stazione di Cortina d'Ampezzo-Gilardon (BL, 1271 m s.l.m.) rappresentativa di una località dolomitica di fondo valle. Si nota il passaggio da valori osservati attorno ai 140 gg/anno nello storico 1991-2020 che scendono su valori inferiori a 80 gg/anno a fine secolo nello scenario nessuna mitigazione.

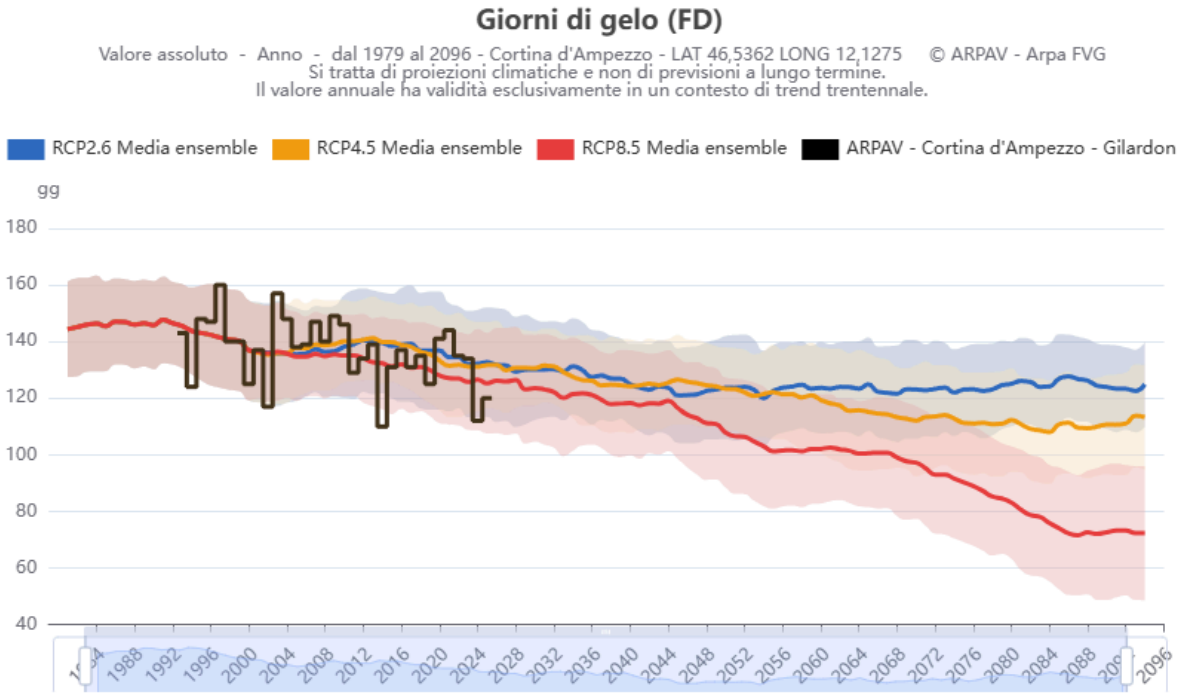


Figura 40. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei giorni di gelo (unità: #giorni/anno) a Cortina d'Ampezzo (BL) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa). La linea nera dal 1992 al 2025 rappresenta le osservazioni annuali presso la stazione meteorologica di Arpa Veneto - Cortina d'Ampezzo Gilardon (1271 m s.l.m.).

L'indicatore FD è disponibile sulla piattaforma Cline sia per il periodo storico sia per le proiezioni climatiche future ed è riportato nel Bollettino meteoclimatico mensile e stagionale per il periodo invernale e nel riepilogo annuale. L'indicatore è inoltre disponibile per il download tramite API.

Somme termiche per l'agricoltura

Dal 2026 è stata aggiunta al report meteoclimatico mensile anche una sezione dedicata all'agrometeorologia dove si monitorano, fra gli altri, anche le somme termiche in base 0 e 10.

La sommatoria termica dei gradi utili giorno è un indicatore che misura quanto calore accumulano le piante per crescere. I gradi utili giorno si calcolano sottraendo alla temperatura media del giorno un valore soglia detto "zero di vegetazione" che varia da specie a specie e che rappresenta la soglia minima sotto la quale la pianta resta a riposo.

Ogni pianta ha bisogno di una quantità specifica di energia per completare ciascuna fase vegetativa: monitorare l'accumulo di calore permette di prevedere le varie fasi di sviluppo.

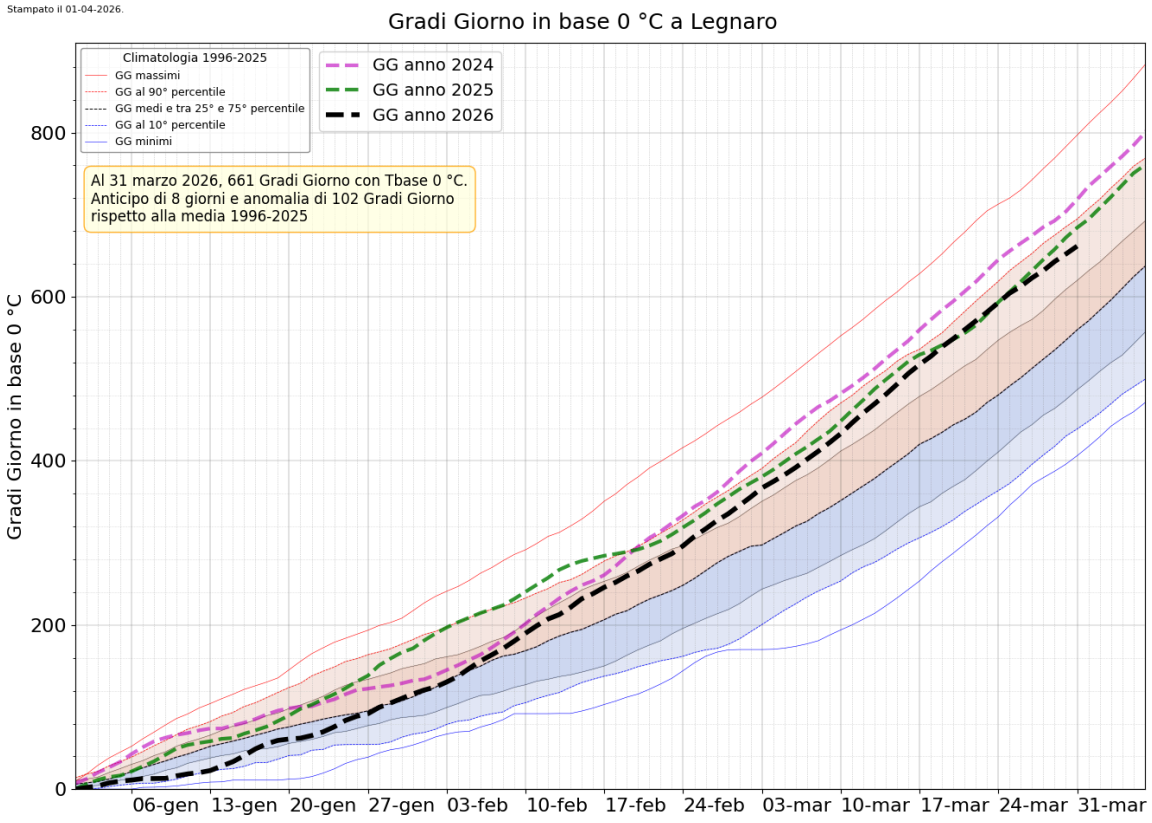


Figura 41. Sommatoria giornaliera delle differenze positive tra la temperatura media e la temperatura base di 0 °C. Il grafico mostra l'andamento dei gradi giorno presso la stazione di Legnaro nel trimestre gennaio-marzo 2026 (curva nera), confrontato con lo stesso periodo dei due anni precedenti e con la climatologia dell'ultimo trentennio. Nel riquadro giallo sono riportati, al 31 marzo, il valore raggiunto, l'anomalia e l'anticipo o il ritardo rispetto al valore mediano dell'ultimo trentennio.

Oltre alla sommatoria termica in base 0 °C (un esempio in figura 41), utile per stabilire se il ciclo vegetativo sia in anticipo o in ritardo per le specie vegetali maggiormente resistenti al freddo (es. frumento, orzo e specie foraggere), dal mese di aprile, viene pubblicata anche la sommatoria in base 10 °C (si riporta un esempio in figura 42), più adatta a colture che iniziano la loro attività biologica in primavera e con temperature più elevate (es. colture frutticole, pomodoro, olivo).

Al momento, l'indicatore viene calcolato per alcune stazioni di riferimento dislocate nelle diverse aree della pianura veneta; nel bollettino viene mostrata la stazione di Legnaro, rappresentativa della pianura centrale.

Sullo sfondo è indicata la climatologia dell'ultimo trentennio tramite le mediane, i massimi, i minimi e i percentili 10°, 25°, 75° e 90°. L'anno in corso è rappresentato da una linea nera tratteggiata, ma sono inseriti anche i due anni precedenti per un rapido confronto con il recente passato, ancora vivo nella memoria degli utenti. Infine, un riquadro a sfondo giallo mostra, per la stazione in oggetto, il valore della sommatoria dei gradi giorno utili e l'eventuale anticipo o ritardo della stagione rispetto alla mediana storica.

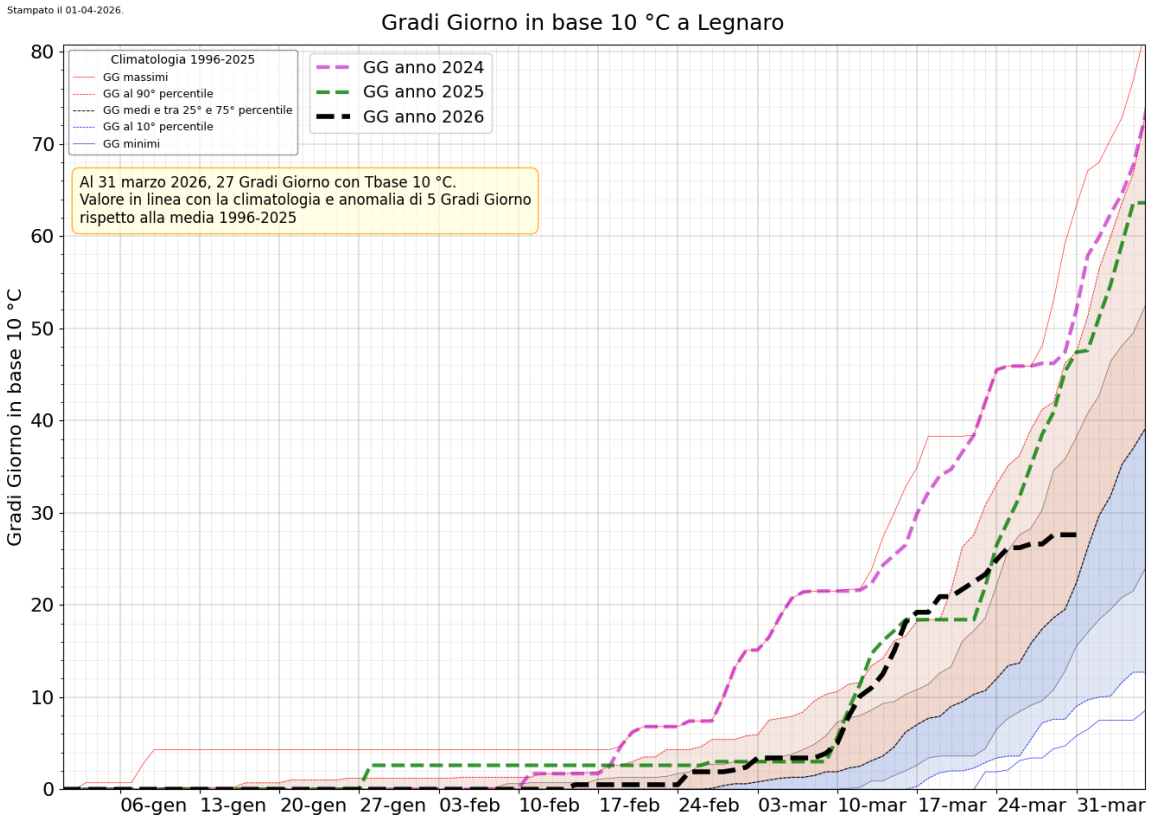


Figura 42. Sommatoria giornaliera delle differenze positive tra la temperatura media e la temperatura base di 10 °C. Il grafico mostra l'andamento dei gradi giorno presso la stazione di Legnaro nel trimestre gennaio-marzo 2026 (curva nera), confrontato con lo stesso periodo dei due anni precedenti e con la climatologia dell'ultimo trentennio. Nel riquadro giallo sono riportati, al 31 marzo, il valore raggiunto, l'anomalia e l'anticipo o il ritardo rispetto al valore mediano dell'ultimo trentennio.

Le somme termiche sono disponibili nel Bollettino meteoclimatico mensile. L'indicatore calcolato con temperatura base pari a 0 °C è riportato fino alla fine della primavera, mentre quello con temperatura base pari a 10 °C è riportato fino all'inizio dell'autunno.

Indicatori per energia CDDs e HDDs

L'indicatore CDDs (Cooling Degree Days) e il complementare HDDs (Heating Degree Days) vengono calcolati come somme termiche delle differenze positive tra la temperatura misurata e una temperatura "base" individuata come soglia. I gradi giorno di raffrescamento e riscaldamento vengono utilizzati per la stima del fabbisogno energetico necessario per mantenere temperature accettabili all'interno degli edifici, sia nella stagione estiva, stimando il consumo di elettricità per i climatizzatori, sia in quella invernale, stimando il consumo di gas metano ed elettricità per caldaie e condizionatori. Gli enti gestori delle acque soprattutto in riferimento ai CDDs segnalano che forti assorbimenti di energia per raffrescamento degli edifici causati dalle ondate di calore possono determinare interruzioni di fornitura di energia elettrica che hanno importanti ripercussioni anche sulla continuità dei servizi di fornitura di acqua idropotabile basati sull'uso di sistemi di pompaggio. Temperature estreme possono portare al danneggiamento temporaneo o permanente degli impianti elettrici.

Esistono diverse definizioni per il calcolo di questi indici che variano in base alla disponibilità dei dati e alla regione considerata; in particolare, la frequenza della variabile temperatura (oraria, giornaliera o mensile) e le soglie adottate influiscono direttamente sulla procedura di calcolo.

Tra i diversi approcci basati sui dati giornalieri di temperatura, la formulazione storicamente più semplice e diffusa è quella proposta dall'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), consistente in una semplice somma termica delle differenze positive tra la temperatura media giornaliera e la temperatura di riferimento. Tuttavia, poiché tale impostazione si presta a differenti interpretazioni sia sulle soglie da adottare sia sull'introduzione di eventuali condizioni operative, nei contesti di analisi più articolati si preferisce ricorrere a standard maggiormente definiti.

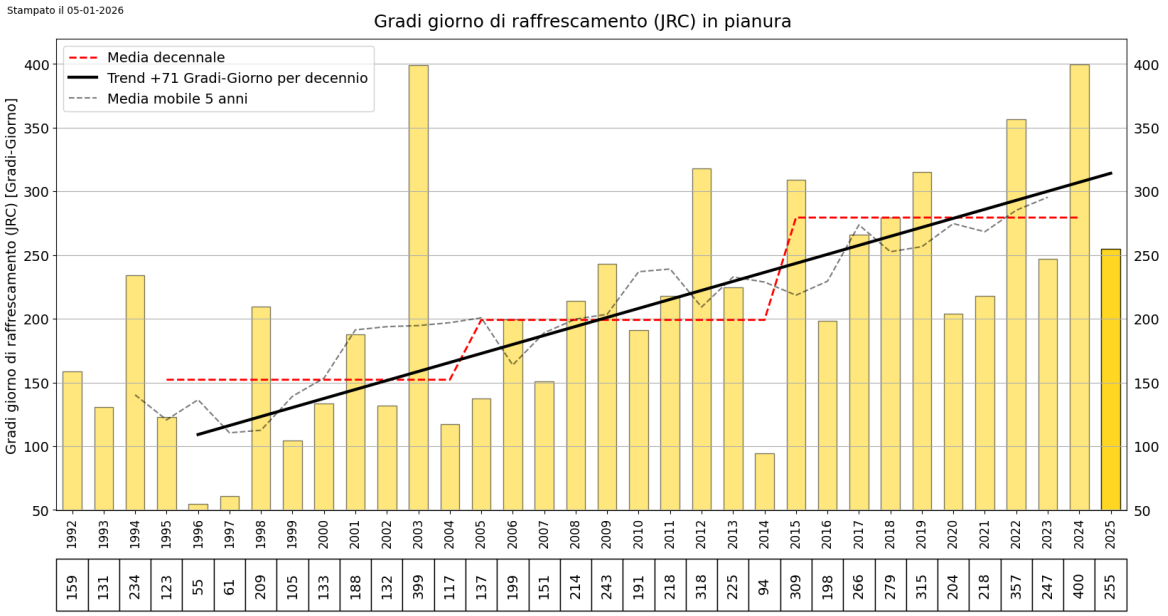


Figura 43. Grafico a barre dei Gradi Giorno di Raffrescamento (CDDs) in pianura calcolati con la definizione proposta dal Joint Research Centre. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Proprio per adottare una definizione condivisa e metodologicamente solida, l'ISPRA, all'interno del lavoro "*Consumi energetici e heating degree days (HDD) a confronto. Proiezioni al 2050 degli HDD in differenti scenari climatici*", ha scelto di fare riferimento alle indicazioni fornite dal JRC (Joint Research Centre), il servizio scientifico interno della Commissione Europea. In questo ambito, l'ISPRA apporta alcune precise modifiche alla definizione lineare dell'ASHRAE pur continuando a utilizzare la temperatura media giornaliera ricavata dagli estremi del giorno. Nello specifico, per il calcolo dell'HDDs viene adottata una temperatura base di 18 °C, conteggiando l'indice solo quando la temperatura media scende al di sotto dei 15 °C. Analogamente, per il CDDs si fissa una temperatura base di 21 °C, attivando il calcolo solo laddove la temperatura media del giorno superi la soglia dei 24 °C.

Accanto all'impostazione europea del JRC, esiste una declinazione dell'indice specificamente legata al contesto normativo e scientifico italiano. Questa metodologia, adottata anche nei monitoraggi di ISPRA sulla Piattaforma Nazionale Adattamento Cambiamenti Climatici, si fonda sui principi stabiliti dal DPR 412/1993 e si avvale dei parametri individuati nello studio di De Rosa et al. (2015) per adattare la formulazione ASHRAE alla realtà nazionale.

In questo modello, per quanto riguarda la stagione invernale, i gradi giorno di riscaldamento vengono calcolati sommando le sole differenze positive tra la temperatura convenzionale dell'ambiente interno, stabilita per legge a 20 °C, e la temperatura media giornaliera esterna.

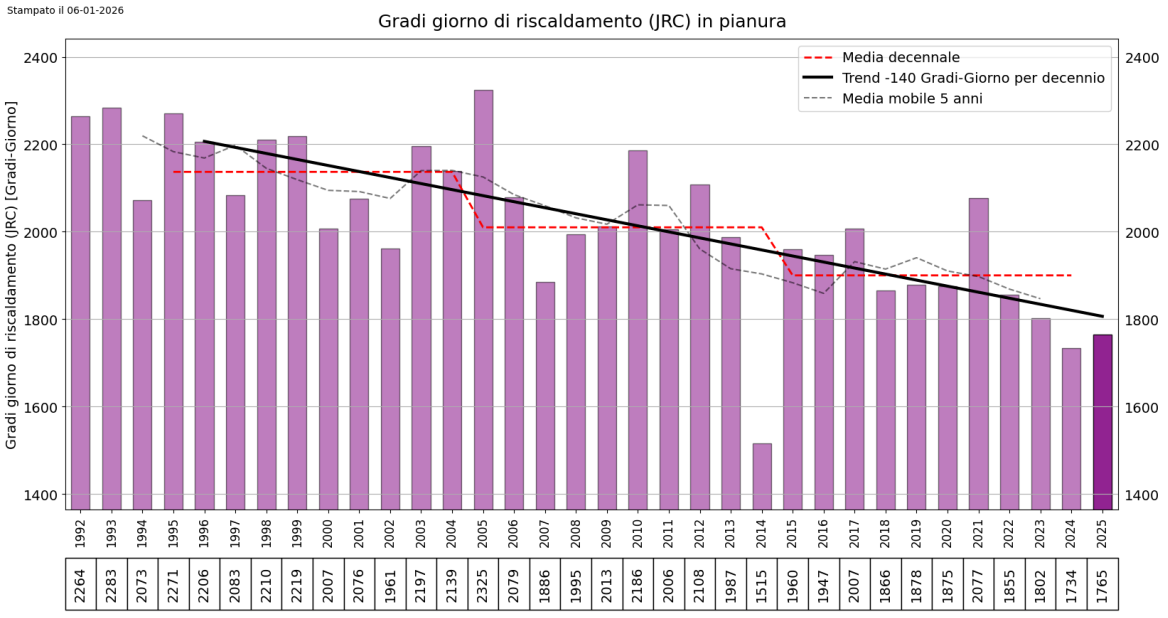


Figura 44. Grafico a barre dei Gradi Giorno di Riscaldamento (HDDs) in pianura calcolati con la definizione proposta dal Joint Research Centre. La linea rossa indica la media degli ultimi tre decenni, la linea nera tratteggiata la media mobile centrata quinquennale e la linea nera continua, se presente, il trend trentennale statisticamente significativo.

Le figure 43 e 44 riportano rispettivamente i Gradi Giorno di Raffrescamento e Riscaldamento per la pianura sull'anno solare dal 1991 al 2025, calcolati col metodo e le soglie proposte dal JRC. Entrambi rilevano un trend statisticamente significativo legato all'incremento delle temperature che quindi è positivo per il raffrescamento e negativo per il riscaldamento.

L'analisi dei trend storici di HDDs e CDDs non si limita a un puro esercizio statistico, ma consente di correlare l'andamento climatico passato ai consumi energetici effettivamente richiesti per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. In questo senso, un incremento del CDDs si traduce direttamente in una maggiore domanda di energia per la climatizzazione estiva.

Il passaggio metodologico successivo consiste nell'estrapolare questi indicatori verso l'orizzonte di medio e fine secolo proiettandoli all'interno dei diversi scenari climatici futuri, così da stimare l'evoluzione del fabbisogno energetico nei prossimi decenni.

Tuttavia, stabilire una relazione solida tra dati storici e proiezioni future del fabbisogno energetico presenta diverse criticità analitiche.

La prima difficoltà risiede nella scarsa disponibilità di dati pubblici relativi ai consumi energetici su scala regionale e su serie storiche sufficientemente ampie. A questo limite informativo si aggiungono le dinamiche di evoluzione tecnologica e costruttiva: occorre infatti considerare sia il costante progresso che porta sul mercato apparecchiature per la climatizzazione sempre meno energivore, ma che spingono ad un maggiore utilizzo, sia il continuo miglioramento delle tecniche di progettazione urbanistica e degli edifici in un'ottica di efficienza energetica.

Allo stesso tempo, le stime future devono fare i conti con la progressiva transizione della matrice energetica verso fonti pulite a scapito dei combustibili fossili, nonché con il cosiddetto *effetto lock-in*. Quest'ultimo fenomeno tende a ritardare l'adozione di soluzioni efficienti, vincolando il sistema a tecnologie del passato più dispendiose finché queste non completano la loro vita utile o finché la sostituzione non risulti economicamente vantaggiosa. Infine, non si possono trascurare le mutazioni socio-demografiche, legate sia alla crescita della popolazione sia all'innalzamento degli standard di benessere e comfort abitativo richiesti a livello locale e globale.

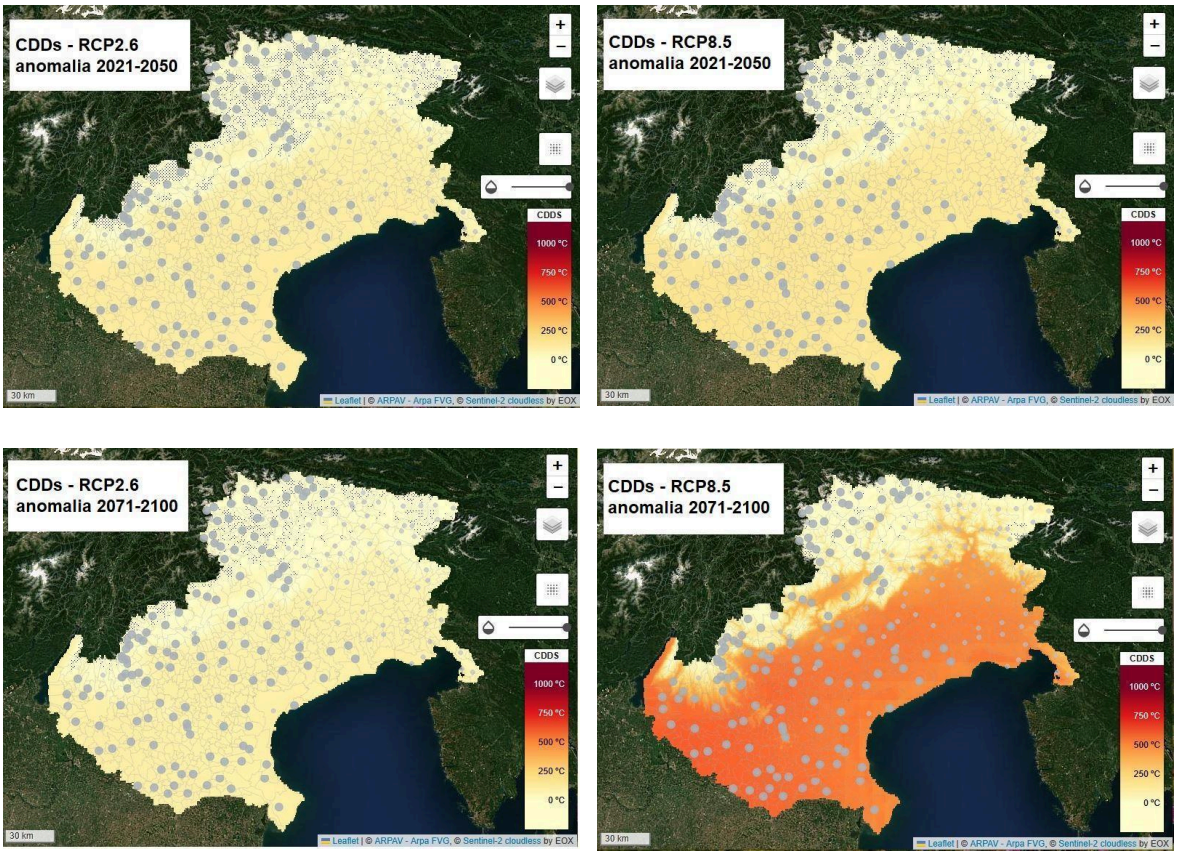


Figura 45. Distribuzione geografica dell'anomalia dei gradi giorno di raffrescamento (CDDs, unità: °C) per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) e per lo scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli è basso.

Se si considera il futuro atteso, la distribuzione geografica dell'anomalia dei gradi giorni di raffrescamento mostra un deciso e statisticamente significativo aumento su tutto il Nord-Est che si

traduce, conseguentemente, in un aumento della domanda di energia per la climatizzazione estiva. L'anomalia futura è mostrata in figura 45 per i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 (parte superiore e inferiore) con il confronto RCP2.6 e RCP8.5 (sinistra e destra).

Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e si evince che la parte più colpita risulta essere la pianura sud-occidentale e, a seguire, la pianura centrale: per la pianura si passa da un aumento contenuto entro +100 gradi giorno per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a +550 gradi giorno nell'RCP8.5.

Se si considera la stazione di Legnaro (PD) identificativa dell'area della pianura centrale si nota che si passa da valori osservati attorno ai 170 gradi giorni nel trentennio 1991-2020 fino a valori oltre i 800 gradi giorno a fine secolo nello scenario con nessuna mitigazione (figura 46).

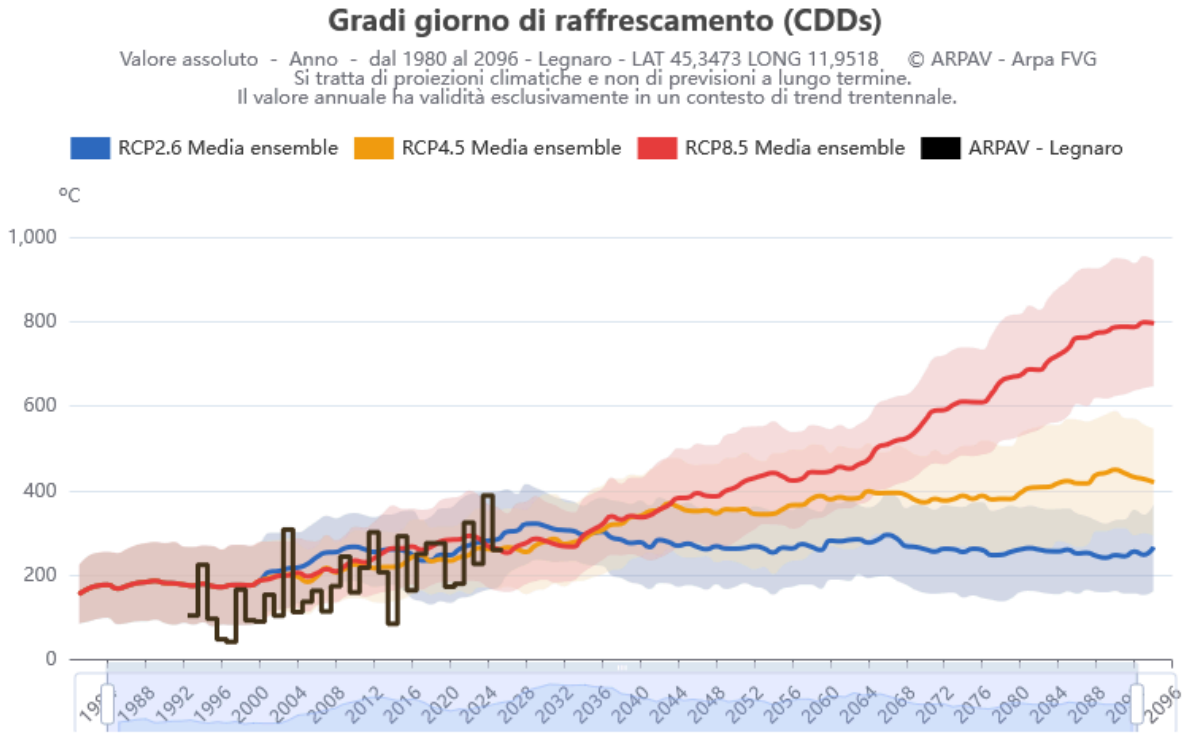


Figura 46. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei gradi giorno di raffrescamento (unità: °C) a Legnaro (PD) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa). La linea nera dal 1992 al 2025 rappresenta le osservazioni annuali presso la stazione meteorologica di Arpa Veneto - Legnaro.

La distribuzione geografica dell'anomalia dei gradi giorni di riscaldamento mostra una decisa e statisticamente significativa diminuzione su tutto il Nord-Est che si traduce, conseguentemente, in una diminuzione della domanda di energia per il riscaldamento invernale.

L'anomalia futura è mostrata in figura 47 per i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 (parte superiore e inferiore) con il confronto RCP2.6 e RCP8.5 (sinistra e destra). Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e si evince che la parte più colpita risulta essere l'area alpina: si passa da valori compresi tra -400 e -250 gradi giorno, rispettivamente, per la montagna e la pianura per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a -1600/-850 gradi giorno, rispettivamente, per la montagna e la pianura nell' RCP8.5.

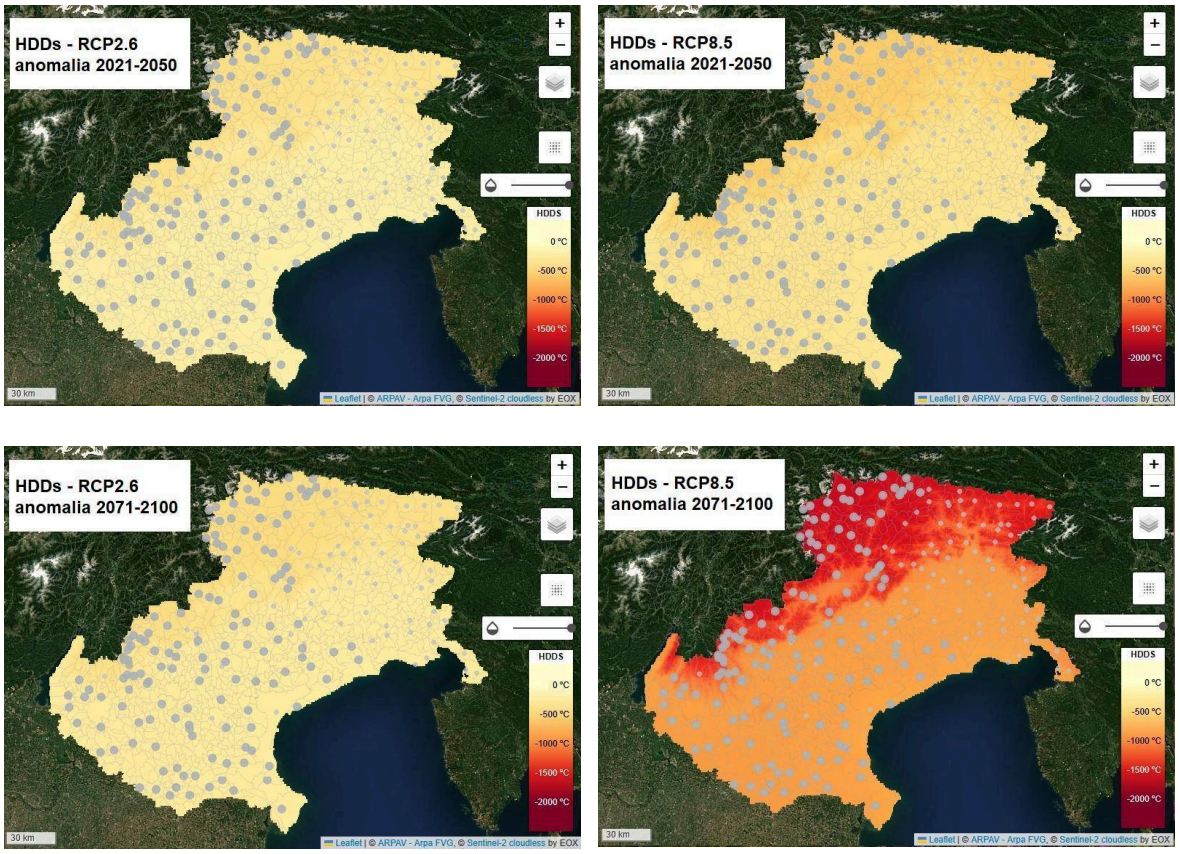


Figura 47. Distribuzione geografica dell'anomalia dei gradi giorno di riscaldamento (HDDs, unità: °C) per il periodo 2021-2050 (sopra) e 2071-2100 (sotto) e per lo scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo dei modelli è basso.

Se si considera la stazione di Cortina d'Ampezzo-Gilardon (BL, 1271 m s.l.m.) rappresentativa di una località dolomitica di fondo valle si nota che si passa da valori osservati attorno ai 4700 gradi giorno nello storico 1991-2020 per scendere su valori inferiori a 3500 gradi giorno a fine secolo nello scenario nessuna mitigazione (figura 48).

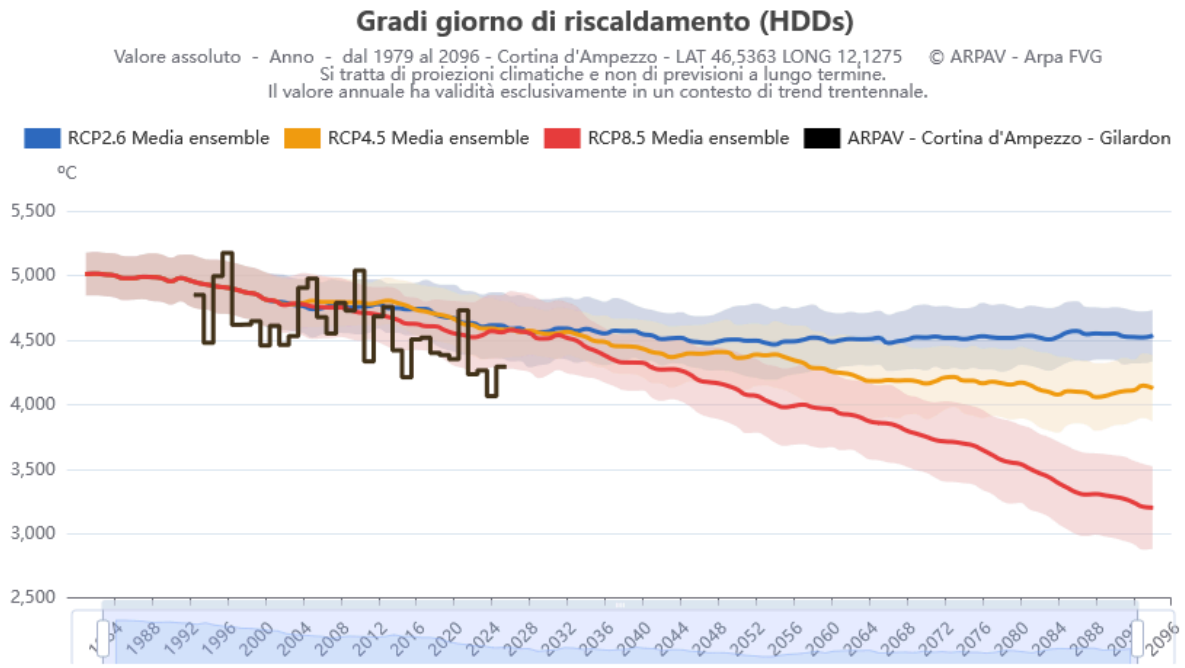


Figura 48. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei gradi giorno di riscaldamento (unità: °C) a Cortina d'Ampezzo (BL) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa). La linea nera dal 1992 al 2025 rappresenta le osservazioni annuali presso la stazione meteorologica di Arpa Veneto - Cortina d'Ampezzo Gilardon (1271 m s.l.m.).

Gli indicatori CDDs (jrc) e HDDs (normativa italiana) sono disponibili sulla piattaforma Cline sia per il periodo storico sia per le proiezioni climatiche future. Il Bollettino meteoclimatico annuale riporta CDDs e HDDs (jrc). Gli indicatori CDDs, HDDs (jrc) e HDDs (normativa italiana) sono inoltre disponibili per il download tramite API.

Indicatori di siccità

La siccità si configura come un fenomeno particolarmente complesso, caratterizzato da una progressiva evoluzione nel tempo, da effetti che possono manifestarsi con ritardo e da impatti che interessano simultaneamente, o in momenti differenti, componenti atmosferiche, agricole, idrologiche, ecologiche e socio-economiche.

La difficoltà nel definire in modo univoco l'inizio e la fine di un evento, nel determinarne intensità ed estensione e nel quantificarne gli effetti deriva proprio dalla natura multidimensionale del fenomeno. La stessa condizione meteorologica può infatti produrre conseguenze differenti in funzione della stagione, della climatologia locale, dello stato dei sistemi naturali, della domanda di risorsa idrica e della vulnerabilità del territorio.

Anche la distinzione tra siccità e aridità evidenzia l'importanza della **scala temporale e del riferimento climatico**: mentre l'aridità rappresenta una caratteristica strutturale del clima di una regione, la siccità costituisce un'anomalia rispetto alle condizioni normalmente attese in quello stesso contesto.

Ne consegue che la siccità non può essere adeguatamente rappresentata attraverso una singola variabile o una soglia universalmente valida. La sua identificazione e caratterizzazione richiedono indicatori differenti, costruiti per descrivere specifiche componenti del fenomeno e rispondere a differenti esigenze di monitoraggio e analisi.

Nel capitolo successivo saranno pertanto esaminati i principali **indicatori di siccità**, evidenziandone le variabili utilizzate, i periodi di riferimento, i criteri di identificazione e le diverse componenti del fenomeno che ciascun indicatore consente di rappresentare.

Giorni consecutivi secchi (CDD)

L'indicatore dei giorni consecutivi secchi, noto con l'acronimo CDD (Consecutive Dry Days), definisce il massimo numero di giorni consecutivi in cui la precipitazione giornaliera rimane al di sotto di un millimetro. Rappresenta la metrica più immediata e intuitiva per identificare un periodo privo di pioggia, ma presenta forti limiti concettuali quando si tratta di valutare la reale scarsità idrica o una situazione di siccità complessa.

Uno dei problemi principali è il cosiddetto effetto interruttore. Poiché la soglia di riferimento è fissa a un millimetro, basta una modesta pioggia di pochissimo superiore a tale valore per azzerare il conteggio del periodo secco, anche se quell'evento non apporta alcun beneficio concreto al bilancio idrico e la condizione di siccità permane.

Un altro limite risiede nella dipendenza stagionale. Lo stesso numero di giorni secchi produce impatti nettamente diversi a seconda del periodo dell'anno. In estate, o comunque durante la stagione vegetativa in primavera e all'inizio dell'autunno, la prolungata assenza di precipitazioni associata alle alte temperature genera uno stress idrico immediato e grave per l'agricoltura a causa dell'elevata evapotraspirazione. Al contrario, periodi secchi in inverno sono eventi storicamente più frequenti e meno critici nell'immediato per la vegetazione, pur rappresentando un problema sul lungo termine perché riducono la ricarica dei nevai e delle falde acquifere.

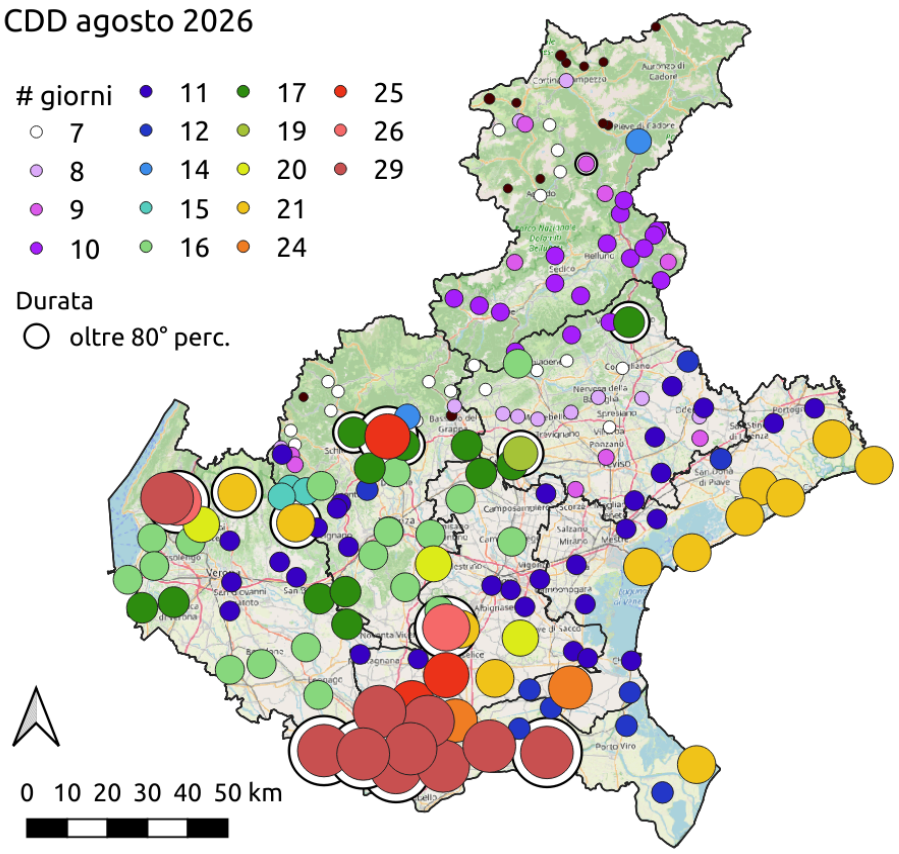


Figura 49. Mappa del massimo numero di giorni consecutivi senza precipitazioni terminati nell'agosto 2026. La dimensione e il colore dei cerchi indicano il numero di giorni, con cerchi più grandi corrispondenti a valori maggiori; la legenda riporta la corrispondenza tra colori e valori. Per le stazioni con almeno un trentennio di dati è inoltre possibile valutare l'anomalia rispetto alla climatologia di riferimento. Le stazioni con valori superiori all'80° percentile della distribuzione dei CDD stagionali dell'ultimo trentennio sono evidenziate con un doppio bordo.

Per ovviare alla rigidità della soglia standard a un millimetro si può scegliere di alzare l'asticella a cinque o dieci millimetri, rendendo il dato più significativo per valutazioni agronomiche ed ambientali. Tuttavia, anche questo correttivo non risolve tutti i problemi. Un episodio temporalesco estivo può infatti scaricare a terra molti millimetri di pioggia in pochissimo tempo, bloccando il conteggio dei giorni consecutivi secchi, ma la maggior parte di quest'acqua rischia di essere pioggia non utile. L'elevata intensità della pioggia può superare la capacità d'infiltrazione del terreno favorendo il ruscellamento superficiale senza riuscire a raggiungere la capacità di campo.

Per queste ragioni, sebbene i giorni consecutivi secchi restino un indicatore fondamentale e di facile comprensione, la descrizione di una vera e propria siccità richiede di integrare questo dato con indici più complessi, capaci di considerare l'intensità delle piogge, le temperature, l'evapotraspirazione e lo stato effettivo di umidità del terreno.

L'utilizzo dell'indicatore dei giorni consecutivi secchi acquisisce un significato tecnico preciso principalmente in due contesti distinti. Da un lato trova applicazione per l'analisi di periodi temporali molto lunghi, tipicamente mediati su scala trentennale per individuare i trend climatici. Dall'altro viene impiegato per il monitoraggio in tempo reale di un periodo di siccità in corso.

Per questo secondo caso di monitoraggio operativo, risulta utile mostrare una mappa del territorio che riporta il numero di giorni secchi consecutivi registrati nelle diverse stazioni meteo. Questa rappresentazione cartografica non viene inserita di routine, ma viene integrata all'interno del bollettino meteoclimatico solo quando si verificano periodi di secca anomali.Nello specifico, la soglia che fa scattare l'inserimento della mappa corrisponde a una situazione in cui il fenomeno coinvolge contemporaneamente diverse stazioni di una o più zone e il numero di giorni secchi supera l'ottantesimo percentile dei giorni secchi consecutivi, calcolato sui dati dello storico trentennale di riferimento per quella medesima stagione. L'indicatore e la relativa mappa vengono quindi mostrati per evidenziare e descrivere situazioni di anomalia idrica che escono in modo netto dall'ordinario.

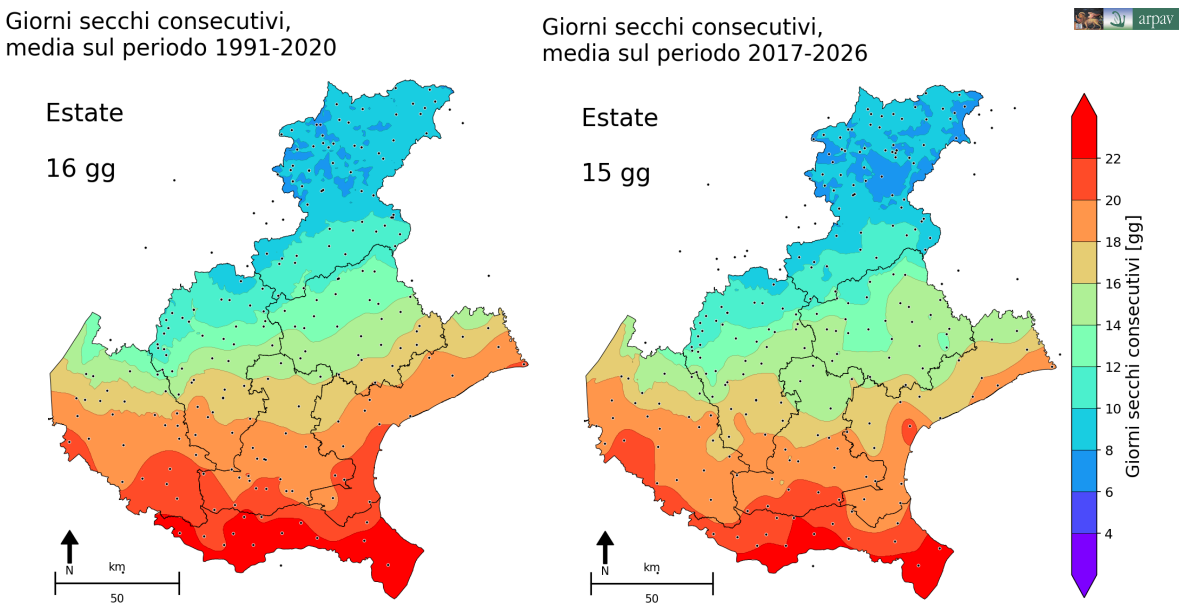


Figura 50. Giorni consecutivi secchi (CDD) in estate nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Quella rappresentata è la media sul trentennio o decennio del massimo numero di giorni secchi consecutivi in estate di ogni anno. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Sulla mappa in figura 49, con l'esempio dell'agosto 2026, dimensione e colore dei punti stazione aiutano a individuare le zone col più alto numero di giorni secchi consecutivi; il bordo bianco indica i superamenti dell'80° percentile, che possono però riguardare solo le stazioni con una lunga serie storica.

Un altro aspetto fondamentale dei giorni consecutivi secchi riguarda proprio ciò che emerge dall'analisi dei dati storici rispetto a quello che mostrano i modelli sul futuro. Guardando ai dati osservativi del recente passato e del presente, l'indicatore non mostra segnali di trend evidenti o univoci (figura 50). Le serie storiche dei giorni secchi risultano spesso caratterizzate da un'elevata variabilità interannuale, senza evidenziare variazioni statisticamente significative che consentano di parlare di una tendenza chiara su scala regionale.

La situazione cambia quando ci si sposta verso l'analisi delle proiezioni climatiche future. Prendendo in considerazione lo scenario ad alte emissioni RCP8.5, i segnali diventano decisamente più marcati verso la fine del secolo, con un maggior accordo tra i diversi output modellistici considerati, in particolare per la stagione estiva ed autunnale.

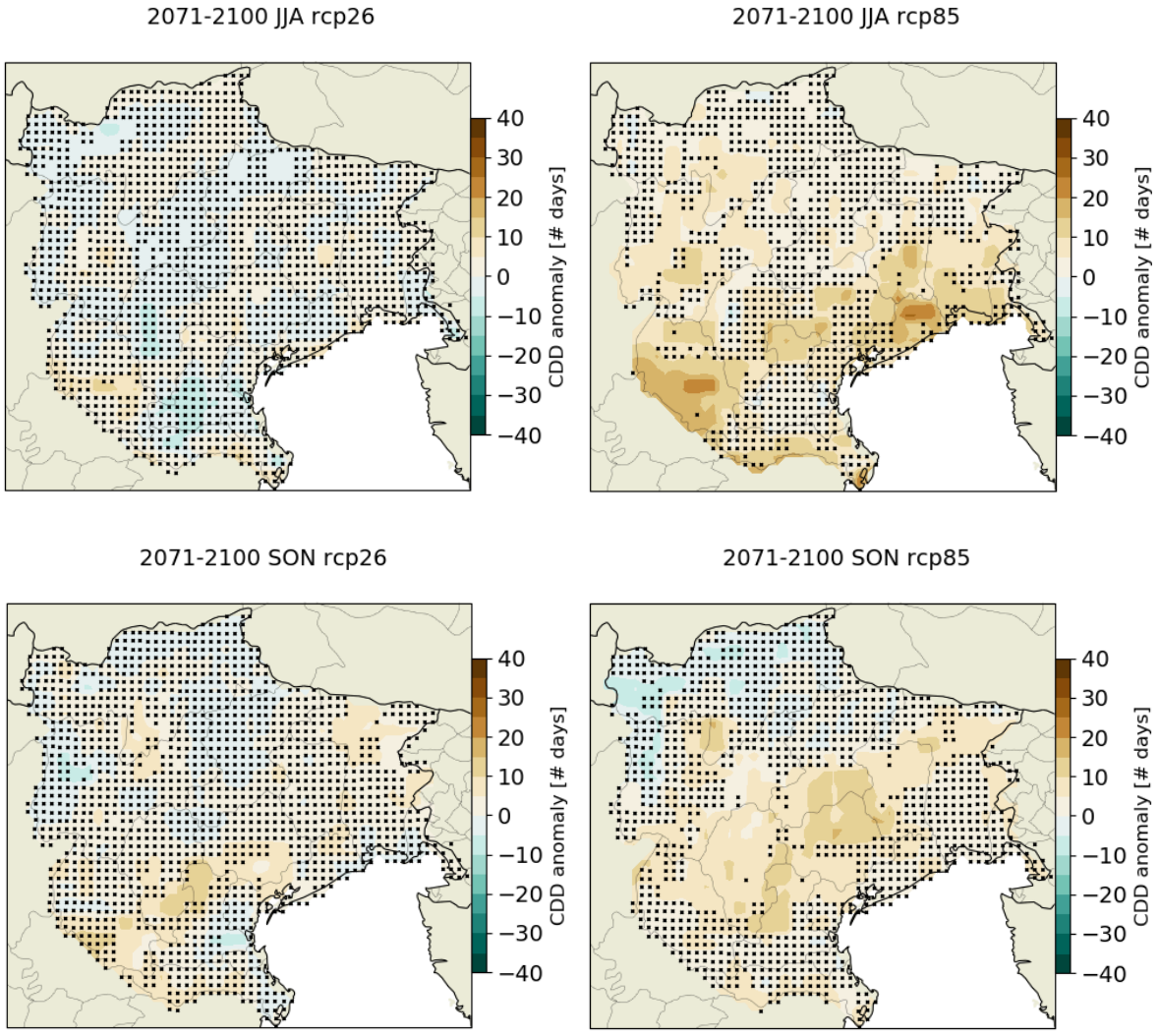


Figura 51. Distribuzione geografica dell'anomalia del numero massimo di giorni consecutivi asciutti (CDD) (unità: n. giorni) in estate (parte superiore) e autunno (parte inferiore) per il periodo 2071-2100 per lo scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

Durante la stagione estiva le simulazioni indicano un aumento significativo della durata dei periodi secchi, profilando estati sempre più prolungate e prive di precipitazioni utili. Considerando il numero massimo di giorni consecutivi asciutti nel trentennio 2071-2100 nella stagione estiva (figura 51 parte superiore) si passa da un aumento poco significativo nello scenario RCP2.6, ad un aumento significativo nelle aree della pianura centrale fino a +25 giorni/anno per RCP8.5.

Anche la stagione autunnale e lo scenario RCP8.5 presentano un buon accordo tra i modelli e si riscontra un aumento significativo del numero massimo di giorni consecutivi secchi compreso tra i +5 e +15 gg/anno nella pianura centro settentrionale e Prealpi (figura 51 parte inferiore).

Diversamente, nelle altre stagioni dell'anno il segnale non risulta significativo. Questo comportamento futuro evidenzia come il cambiamento climatico atteso non agirà in modo omogeneo durante l'arco dell'anno, ma tenderà ad esacerbare i periodi di deficit pluviometrico proprio nei mesi estivi, quando la richiesta evaporativa dell'atmosfera è massima e la pressione sulle risorse idriche è già naturalmente più elevata.

D'altra parte in autunno, considerando il segnale di aumento del numero massimo di giorni consecutivi asciutti in particolare nella pianura centrale e quello di aumento degli eventi (e intensità) di precipitazione estrema, si deduce un segnale di intensificazione della variabilità tra periodi siccitosi e periodi con eventi di precipitazione estrema.

L'indicatore CDD è disponibile sulla piattaforma Cline per le proiezioni climatiche future e può essere riportato nel Bollettino meteoclimatico mensile, stagionale e annuale, qualora il fenomeno risulti rilevante. Tramite API sono disponibili CDD1, CDD5 e CDD10.

Giorni di neve nuova (SNWdays)

L'indicatore SNWdays rappresenta il numero di giorni con temperatura media inferiore a 2 °C e precipitazione giornaliera superiore ad 1 mm. Si tratta di una stima indiretta dei giorni di neve nuova, ottenuta individuando le giornate in cui si verificano contemporaneamente condizioni termiche sufficientemente fredde e precipitazioni. Pur non distinguendo direttamente tra pioggia e neve, l'indicatore costituisce un'approssimazione utile per valutare la frequenza degli eventi nevosi su scala climatica.

Negli ultimi decenni, dal confronto in figura 52, si osserva una marcata diminuzione di questi giorni, ormai quasi scomparsi nelle aree di pianura e fortemente ridotti anche nei settori prealpini. Tale andamento è coerente con l'aumento delle temperature medie, che determina un progressivo innalzamento della quota delle nevicate e una contrazione della durata della stagione nivale.

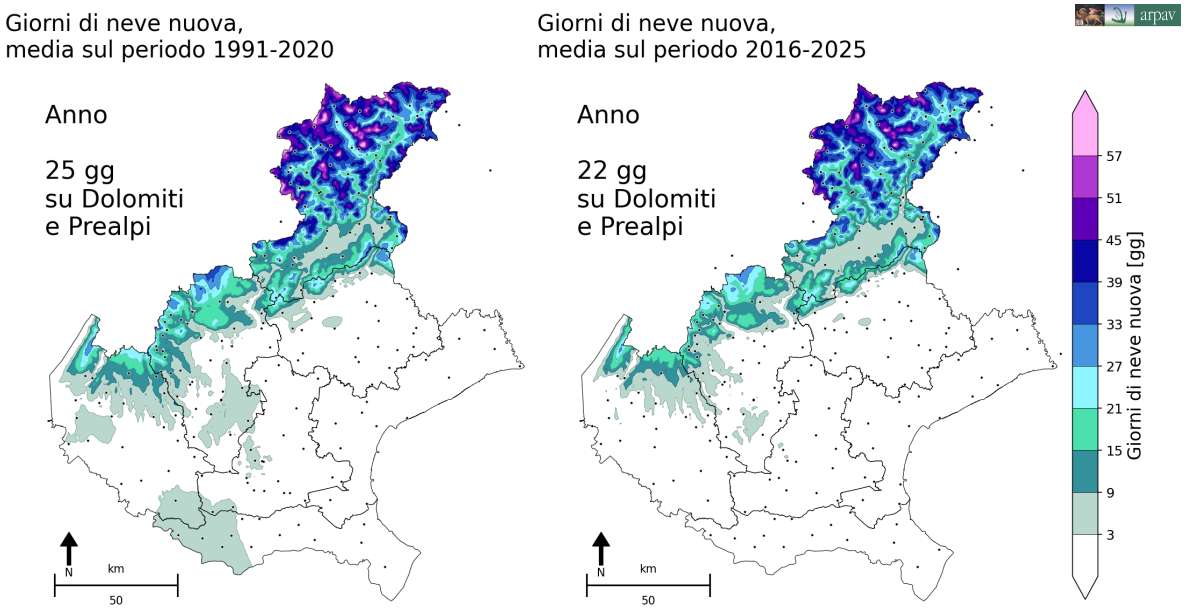


Figura 52. Giorni di neve nuova (SNWdays) nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

Sebbene il presente documento sia dedicato agli indicatori di calore e siccità, questo indicatore riveste particolare interesse perché evidenzia uno degli effetti indiretti del riscaldamento climatico sulla disponibilità della risorsa idrica. La riduzione dei giorni di neve nuova comporta infatti una diminuzione dell'accumulo nivale e dello Snow Water Equivalent (SWE), ossia della quantità di acqua immagazzinata nel manto nevoso. La neve rappresenta una fondamentale riserva idrica naturale che alimenta i corsi d'acqua durante i periodi di fusione.

L'attuale evoluzione climatica è caratterizzata da stagioni nevose sempre più brevi e confinate alle quote più elevate, oltre che da una fusione primaverile più rapida. Di conseguenza, si riduce la capacità del manto nevoso di rilasciare acqua in modo graduale durante la tarda primavera e l'estate, aumentando l'incertezza sulla disponibilità della risorsa idrica nei periodi di maggiore domanda e contribuendo ad accentuare gli effetti della siccità.

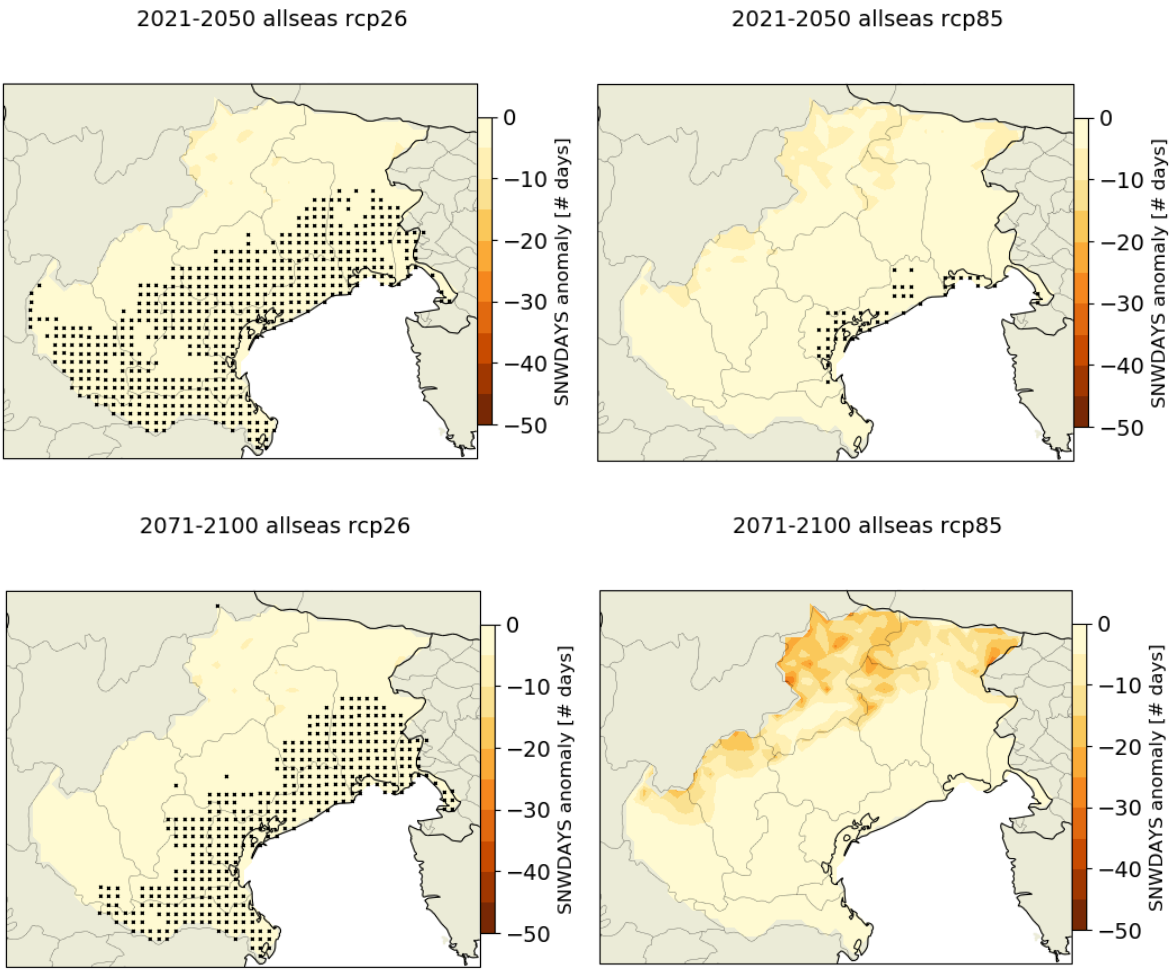


Figura 53. Distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni con neve nuova, ovvero giorni con temperatura media minore di 2 °C e precipitazione giornaliera maggiore di 1 mm (SNWDAYS) (unità: n. giorni/anno) per il periodo 2071-2100 per scenario RCP2.6 (sinistra) e scenario RCP8.5 (destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005. Le croci indicano i punti della griglia in cui l'accordo del modello è basso.

Se si considera il futuro atteso, la distribuzione geografica dell'anomalia dei giorni di neve nuova mostra una decisa e statisticamente significativa diminuzione su tutta l'area alpina. L'anomalia futura è mostrata in figura 53 per i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 (rispettivamente parte superiore e inferiore) con il confronto RCP2.6 e RCP8.5 (sinistra e destra). Anche per questo indice si vede la differenza sostanziale tra i due scenari e si evince che la parte più colpita risulta essere l'area alpina: si passa da valori compresi entro i -10 giorni/anno per lo scenario RCP2.6, mentre si arriva fino a -35 giorni/anno nell' RCP8.5.

Se si considera la stazione di Falcade (BL, 1150 m s.l.m.), rappresentativa di una località dolomitica di fondo valle, si nota che si passa da valori attorno ai 25 giorni/anno nello storico di riferimento 1976-2005 per scendere su valori inferiori a 10 giorni/anno a fine secolo nello scenario nessuna mitigazione (figura 54).

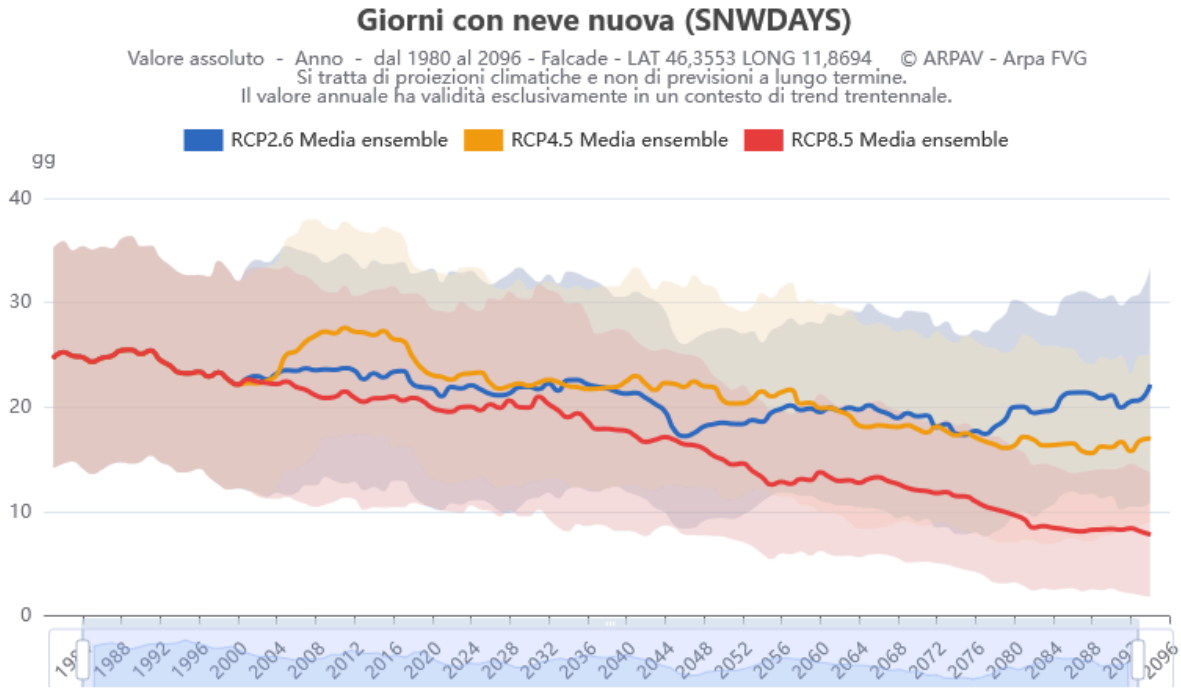


Figura 54. Serie annuale (media mobile su 11 anni) dei giorni con neve nuova (unità: giorni/anno) a Falcade (BL, 1150 m s.l.m.) dal 1976 al 2100, ottenuta come media di ensemble di 5 modelli RCM EURO-CORDEX downscalati, con la relativa banda di incertezza (media d'insieme ± deviazione standard dei 5 modelli). Gli anni 1976-2005 rappresentano lo storico del modello. Dal 2006 in poi, i modelli sono forzati con diversi scenari: RCP2.6 (linea blu), RCP4.5 (linea gialla), RCP8.5 (linea rossa).

L'indicatore SNWdays è disponibile sulla piattaforma CliNE per le proiezioni climatiche future e tramite API. Il Bollettino meteoclimatico riporta inoltre indicatori relativi a neve, ghiacciai e permafrost nei riepiloghi mensili, stagionali e annuali.

Fire Weather Index (FWI)

Il Fire Weather Index (FWI) è un indice di origine canadese utilizzato a livello internazionale per valutare il pericolo potenziale di innesco e propagazione degli incendi boschivi in base alle condizioni meteorologiche. Il principio alla base dell'indice è semplice: la probabilità che un incendio si verifichi e si sviluppi dipende direttamente dallo stato di secchezza della vegetazione morta, della lettiera e del materiale organico presente nel suolo, a sua volta condizionato dall'andamento del tempo atmosferico.

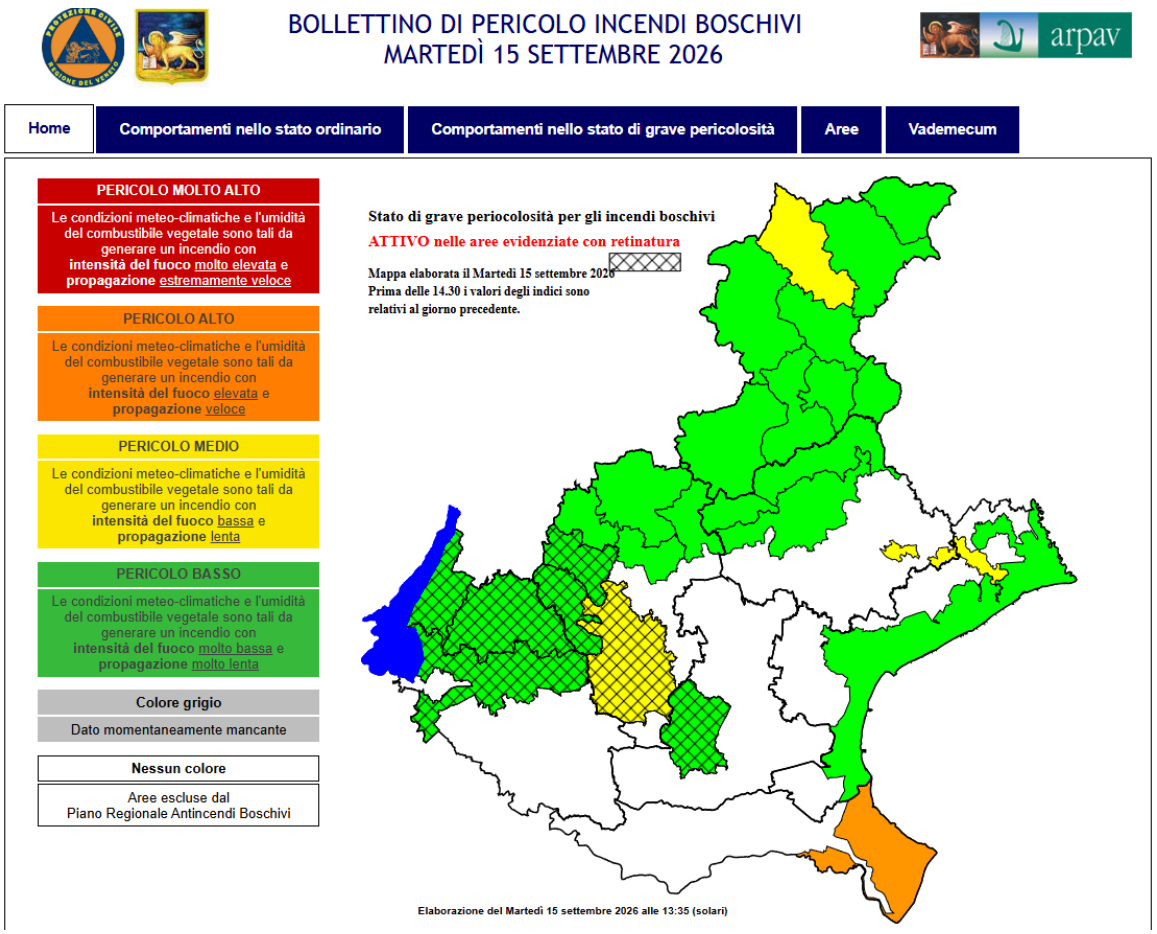


Figura 55. Bollettino di pericolo di incendi boschivi, consultabile sul portale della Protezione Civile del Veneto. La mappa rappresenta il livello di pericolo mediante quattro classi, da basso a molto alto, per le aree a maggiore presenza di vegetazione, in particolare nelle zone montane e collinari e in alcune aree boscate della pianura.

Il calcolo si basa sulle osservazioni meteorologiche rilevate quotidianamente intorno alle ore 13:00 (momento rappresentativo del picco di pericolo pomeridiano), prendendo in esame quattro variabili fondamentali: temperatura dell'aria, umidità relativa, velocità del vento e precipitazioni accumulate nelle 24 ore precedenti.

L'indice FWI sintetizza il pericolo complessivo integrando due macro-categorie di indicatori:

- Stato di umidità del combustibile: tre codici valutano il livello di disidratazione del terreno a tre diverse profondità. Il materiale organico superficiale e la vegetazione sottile (FFMC) rispondono rapidamente alle variazioni giornaliere delle condizioni meteo e indicano la

facilità di innesco delle fiamme. Gli strati moderatamente profondi tra 2 ed 8 cm (DMC) richiedono tempi dell'ordine di due settimane per reagire ad eventuali situazioni di disidratazione e segnalano la potenziale intensità dei fuochi superficiali. Gli strati organici profondi tra 10 e 20 cm (DC) riflettono invece la siccità stagionale di lungo periodo, legata a periodi prolungati di caldo e assenza di pioggia e segnalano il pericolo di sviluppo degli incendi in profondità nel suolo, fattore che rende particolarmente difficili le operazioni di spegnimento.

- Comportamento potenziale del fuoco: Il primo indice (ISI) combina lo stato di secchezza della vegetazione con l'azione del vento per stimare la facilità d'innesco e la velocità di propagazione iniziale dell'incendio, il secondo indice (BUI) considerando la quantità totale di materiale vegetale disponibile per la combustione stima lo sviluppo del fuoco dopo l'innesco.

Incrociando questi sottoindici, l'FWI restituisce un valore numerico finale privo di limite superiore: più alto è il punteggio ottenuto, maggiore sarà la gravità del pericolo di incendio, la velocità di avanzamento delle fiamme e la difficoltà nelle operazioni di estinzione.

A livello operativo, la stima quotidiana del pericolo d'incendio basata sull'FWI trova un'applicazione diretta nel monitoraggio territoriale svolto da ARPAV. L'agenzia aggiorna infatti con cadenza giornaliera la mappa del pericolo, raggiungibile dal sito della Regione Veneto sul portale di Ambiente Veneto (figura 55). Questo strumento permette di visualizzare in modo immediato le aree regionali più vulnerabili e il livello di gravità potenziale del fuoco, fornendo un supporto alle attività per la gestione delle emergenze da parte delle autorità preposte.

Il Fire Weather Index (FWI) è disponibile sul sito della Regione Veneto sul portale di Ambiente Veneto.

SPI-SPEI

L'indice **SPI, *Standardized Precipitation Index*** (McKee et al., 1993), quantifica il deficit di precipitazione su diverse scale temporali (generalmente 1, 3, 6, 12, 24 e 48 mesi), consentendo di definire lo stato di siccità in una località e di confrontare zone con regimi pluviometrici differenti. Ognuna di queste scale riflette l'impatto della siccità su diverse risorse idriche:

- Scale brevi (1-3 mesi): valutano l'umidità del suolo e possono segnalare condizioni di siccità meteorologica o agricola.
- Tempi medio-lunghi (6-12 mesi): stimano la disponibilità idrica in falda e nei corsi d'acqua, indicando un'eventuale siccità idrologica.
- Tempi lunghi (24-48 mesi): monitorano la capacità degli invasi maggiori, denotando condizioni di siccità idrologica o socio-economica.

Il procedimento per il calcolo dello SPI per le stazioni venete è stato implementato tramite funzioni in linguaggio Python, seguendo le *Linee guida sugli indicatori di siccità e scarsità idrica* (ISPRA, giugno 2018).

Per ogni sensore di precipitazione si verifica che il periodo di funzionamento copra almeno 27 anni. Secondo le raccomandazioni del WMO (*World Meteorological Organization*), la valutazione della siccità richiede serie pluviometriche di almeno 30 anni; la scelta di una soglia minima di 27 anni (inferiore allo standard) è stata adottata come compromesso per garantire una tolleranza del 90% sul numero di dati disponibili. Una volta superato questo controllo, viene importata l'intera serie di dati giornalieri. Per ottimizzare la definizione dello SPI è infatti auspicabile considerare tutte le informazioni disponibili senza limitarle a un periodo fisso: maggiore è la lunghezza della serie storica, superiore sarà la robustezza statistica dei parametri della distribuzione.

Il calcolo viene solitamente eseguito a cadenza mensile. Tuttavia, l'elaborazione su base decadale non aumenta significativamente i tempi computazionali e permette di apprezzare meglio le variazioni dello SPI sui periodi di aggregazione più brevi, fornendo informazioni preziose sulla siccità meteorologica o agricola. Questo approccio è inoltre facilmente riconducibile al dato mensile considerando esclusivamente la terza decade di ogni mese.

Lo SPI mette in relazione la quantità di pioggia cumulata in una determinata finestra temporale con la climatologia storica dello stesso intervallo. Poiché viene calcolato tramite una distribuzione gamma normalizzata a media nulla, l'indice può assumere sia valori positivi che negativi: i primi individuano condizioni di abbondanza idrica, i secondi scenari di siccità. Valori prossimi allo zero indicano una situazione nella norma, con una precipitazione cumulata simile alla mediana della serie storica.

I risultati vengono raggruppati in classi che spaziano dalla siccità estrema alla piovosità estrema. Rispetto alla classificazione standard del WMO, sono state inserite due ulteriori classi per mappare meglio sia le condizioni prossime alla normalità (tra −0.5 e +0.5), sia quelle che si avvicinano alla siccità moderata (tra −1.0 e −0.5) o alla piovosità moderata (tra +0.5 e +1.0).

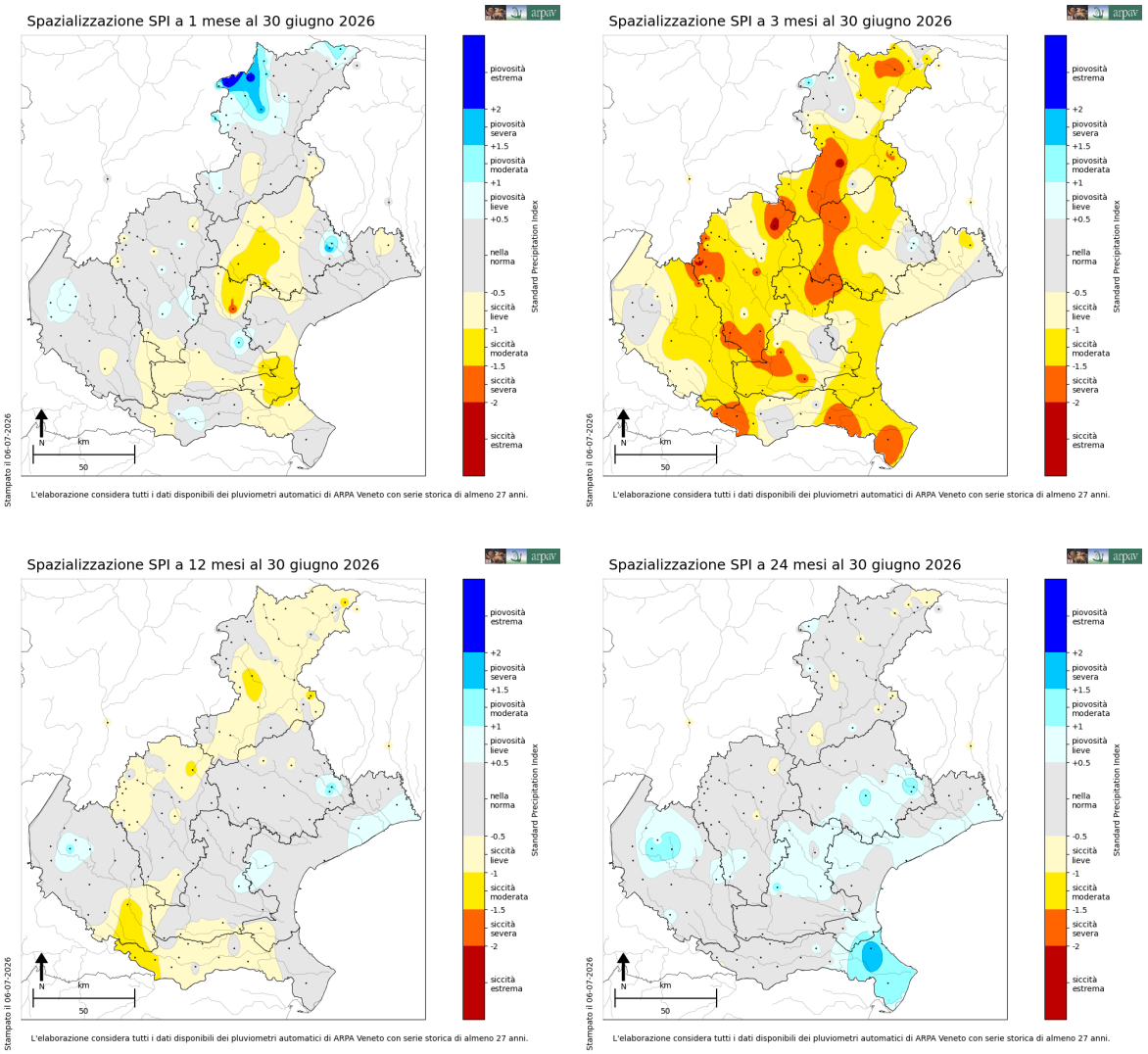


Figura 56. Mappe della spazializzazione dello SPI a 1, 3, 12 e 24 mesi al 30 giugno 2026. Le mappe riportano la posizione delle stazioni, i confini provinciali e l'idrografia principale. La scala cromatica rappresenta le condizioni da siccità estrema a piovosità estrema, passando per condizioni normali. Le condizioni prossime alla norma possono essere ulteriormente suddivise in siccità e piovosità lievi, rispettivamente per valori compresi tra −0.5 e −1 e tra +0.5 e +1; in alcune rappresentazioni queste classi sono invece accorpate in un'unica classe di normalità, compresa tra −1 e +1.

Attualmente sono disponibili due differenti prodotti grafici: la mappa con la spazializzazione dello SPI sul territorio regionale (come in figura 56) e un grafico che evidenzia le variazioni temporali dell'indice per un gruppo selezionato di stazioni, di cui un esempio è riportato in figura 57.

Se da un lato la normalizzazione dello SPI permette di confrontare aree geograficamente distanti e con climi diversi, dall'altro le sue indicazioni non sempre rispecchiano la reale condizione del territorio. Ad esempio, se una zona estremamente arida ricevesse un apporto di pioggia molto superiore alla sua media (ma comunque quantitativamente scarso), lo SPI indicherebbe una piovosità estrema senza che l'aridità effettiva sia cambiata. Viceversa, un periodo molto più asciutto della norma in un territorio tipicamente molto piovoso non si tradurrebbe in una reale emergenza, poiché le piogge residue risulterebbero comunque consistenti.

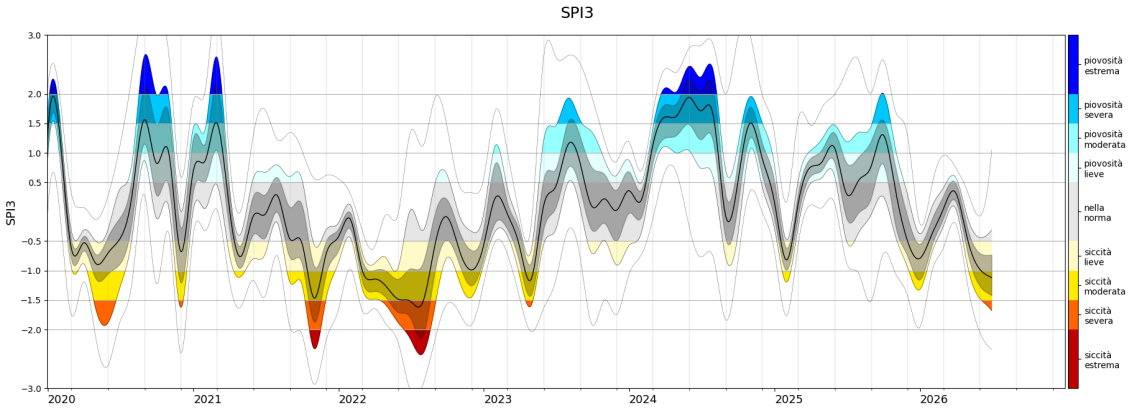


Figura 57. Andamento temporale dello SPI a 3 mesi dal 2020 al 2026, calcolato sulle stazioni disponibili in Veneto. La distribuzione statistica è calcolata direttamente sui dati puntuali delle singole stazioni e non deriva da un processo di interpolazione o spazializzazione. La banda centrale più scura rappresenta l'intervallo compreso tra il 25° e il 75° percentile, con la mediana evidenziata dalla linea nera. La fascia più chiara comprende i valori tra il 10° e il 25° percentile e tra il 75° e il 90° percentile. Le curve alle estremità rappresentano i valori minimo e massimo.

Inoltre, a causa dei cambiamenti climatici, il ripetersi di eventi estremi all'interno della serie storica può spostare il valore dello SPI verso lo zero, segnalando come "normale" una condizione di spiccata siccità o piovosità che sta semplicemente diventando frequente. Lo SPI risente quindi delle derive climatiche, specie se repentine. Per mitigare questo effetto è fondamentale disporre di serie storiche molto lunghe: ogni nuovo dato inserito ridefinisce le probabilità cumulate e aggiorna i valori dell'indice. Di conseguenza, lo SPI è un indicatore dinamico nel tempo, che tende a fluttuare maggiormente nelle serie storiche brevi e a stabilizzarsi in quelle più lunghe.

A differenza dello SPI, che si concentra esclusivamente sulle precipitazioni, lo **Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)** consente di valutare le condizioni di siccità o di umidità integrando nel calcolo l'effetto della temperatura sulla disponibilità idrica complessiva. Lo SPEI è infatti un indice climatico statistico che quantifica il bilancio idrico tra precipitazioni ed evapotraspirazione potenziale (il bilancio idroclimatico, BIC, è descritto al capitolo seguente), espresso su diverse scale temporali che variano solitamente da 1 a 24 mesi. Se da un lato lo SPI resta l'indicatore primario suggerito dal WMO per una prima analisi basata sui soli dati pluviometrici, lo SPEI introduce un livello di complessità superiore poiché tiene conto del potere evaporante dell'atmosfera, offrendo un quadro più accurato del reale deficit idrico del territorio.

Questo aspetto diventa cruciale nel contesto attuale, in cui i fenomeni di siccità risultano fortemente acuiti dall'aumento delle temperature medie ed estreme. Le anomalie termiche positive favoriscono infatti una maggiore evapotraspirazione, accelerando la perdita di umidità dal suolo e dalla vegetazione e aggravando gli effetti del semplice deficit pluviometrico. È proprio per cogliere questa dinamica che lo SPEI si rivela un indicatore particolarmente efficace: affiancando all'apporto delle precipitazioni il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, l'indice restituisce una misura del bilancio idrico atmosferico capace di riflettere l'impatto combinato di caldo e scarsità di pioggia.

Dal punto di vista metodologico, lo SPEI viene calcolato a partire dai dati puntuali registrati dalle stazioni a terra (attive in larga parte dal 1992 e con serie storiche di almeno 27 anni), combinando le misurazioni giornaliere di precipitazione e temperatura. Il dato di partenza viene aggregato su diverse scale temporali (da 1 a 24 mesi) e aggiornato ogni dieci giorni.

Per stimare in modo accurato la probabilità delle anomalie del bilancio idroclimatico (condizioni di siccità o di surplus idrico), la procedura non applica un'unica legge statistica standard, ma esegue un fitting dinamico sui dati storici di ogni stazione e di ciascuna decade.

In primo luogo, per ciascun punto di misura e intervallo temporale, vengono testate e messe a confronto quattro diverse distribuzioni di probabilità a più parametri: Log-Logistica a 3 parametri (*llog3*), Pearson Tipo III / Gamma a 3 parametri (*gamma3*), Valori Estremi Generalizzata (*gev*) e Normale Asimmetrica (*snorm*).

Lo script seleziona automaticamente la distribuzione che garantisce il miglior adattamento (best fit) ai dati storici locali basandosi sul Criterio Informativo di Akaike (Akaike Information Criterion, AIC). L'AIC è un indice statistico che misura quanta informazione viene persa dal modello nel descrivere i dati reali e penalizza l'eccessiva complessità. Scegliere il modello con l'AIC più basso significa quindi individuare la curva matematica che si adatta meglio alla frequenza reale dei dati storici osservati.

Una volta identificata la distribuzione ottimale, i relativi parametri matematici vengono stimati tramite la Stima di Massima Verosimiglianza (Maximum Likelihood Estimation, MLE). In ambiente R, l'elaborazione è implementata mediante la funzione *fitdist()* del pacchetto *fitdistrplus*, che esegue tentativi multipli sulla scelta dei valori iniziali dei parametri per garantire la convergenza dell'algoritmo anche in presenza di serie storiche con elevata variabilità o valori estremi.

Infine, per passare dai dati delle singole stazioni alle mappe continue sul territorio, i valori vengono spazializzati attraverso un modello di *Universal Kriging* basato sulle coordinate geografiche, restituendo così un quadro omogeneo del bilancio idrico dell'intera regione.

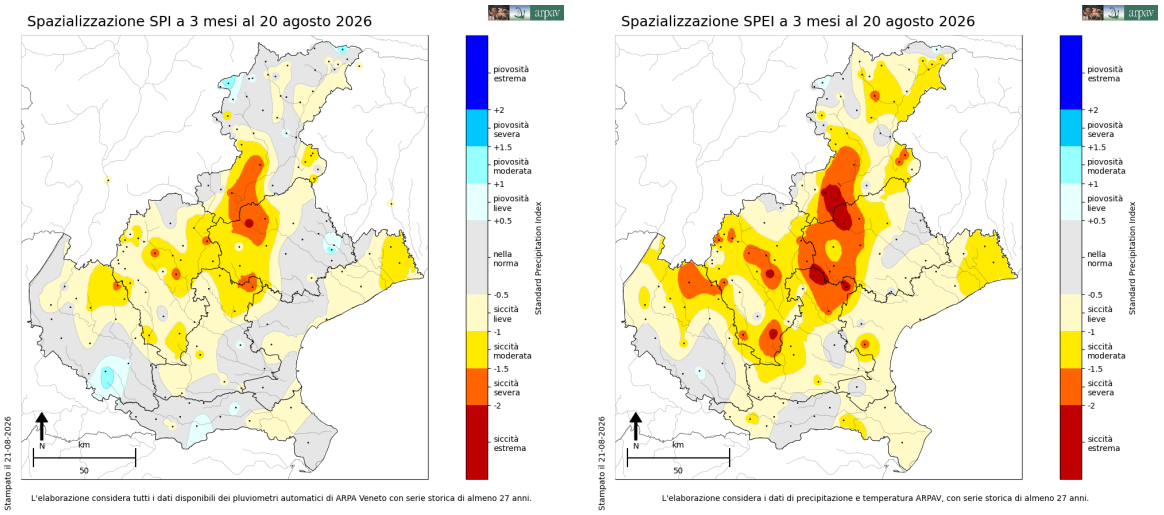


Figura 58. Mappe della spazializzazione dello SPI 3 mesi (sinistra) al 20 agosto 2026 confrontato con lo SPEI a 3 mesi per lo stesso periodo (destra). Le mappe riportano la posizione delle stazioni, i confini provinciali e l'idrografia principale.

L'efficacia dello SPEI nel cogliere il reale disseccamento del territorio emerge chiaramente dal confronto con lo SPI nell'estate 2026, la più calda mai registrata, caratterizzata da ondate di calore ininterrotte da fine maggio a inizio settembre.

Prendendo come riferimento il trimestre dal 21 maggio al 20 agosto, le mappe in figura 58 mostrano come sul Veneto centrale lo SPI rilevi soltanto una siccità moderata, legata al puro dato pluviometrico. Al contrario, lo SPEI fotografa una situazione ben più critica di siccità severa: un divario che dimostra come l'eccezionale domanda evaporativa dell'atmosfera, spinta dalle temperature estreme e prolungate del 2026, abbia prosciugato i suoli molto più di quanto la sola assenza di pioggia lasciasse presagire.

Gli indicatori SPI e SPEI sono disponibili nel Bollettino meteoclimatico mensile.

Bilancio Idroclimatico (BIC)

Il Bilancio Idroclimatico (BIC) è un indicatore fondamentale utilizzato come *proxy* per valutare l'impatto della siccità e il rischio di desertificazione. A testimonianza della sua crescente importanza nelle analisi territoriali, dal 2026 questo indicatore è stato inserito stabilmente nel report meteoclimatico mensile all'interno di una sezione dedicata all'agrometeorologia.

Il BIC stima il contenuto idrico del suolo mettendo a confronto gli apporti idrici in ingresso e le perdite in uscita. Matematicamente si esprime come semplice differenza:

$$BIC = P - ETP$$

In questa formula, P rappresenta la precipitazione totale caduta in un determinato intervallo di tempo, mentre ETP è l'evapotraspirazione potenziale stimata per il medesimo periodo, entrambe misurate in millimetri (mm). L'evapotraspirazione potenziale indica la quantità massima teorica di acqua che il sistema suolo-vegetazione può trasferire all'atmosfera tramite evaporazione dal terreno e traspirazione delle piante, ipotizzando che non vi sia alcuna limitazione di acqua nel suolo. Per il suo calcolo viene utilizzata l'equazione di Hargreaves-Samani, che prende in esame le temperature dell'aria (media, massima e minima) e la radiazione solare incidente al limite dell'atmosfera.

Mentre il BIC misura il deficit o surplus idrico in termini fisici assoluti (mm), lo SPEI non è altro che la sua normalizzazione statistica. Lo SPEI adatta infatti la serie storica delle differenze (P - ETP) a una distribuzione di probabilità, permettendo di confrontare la gravità delle anomalie idriche tra periodi e territori diversi.

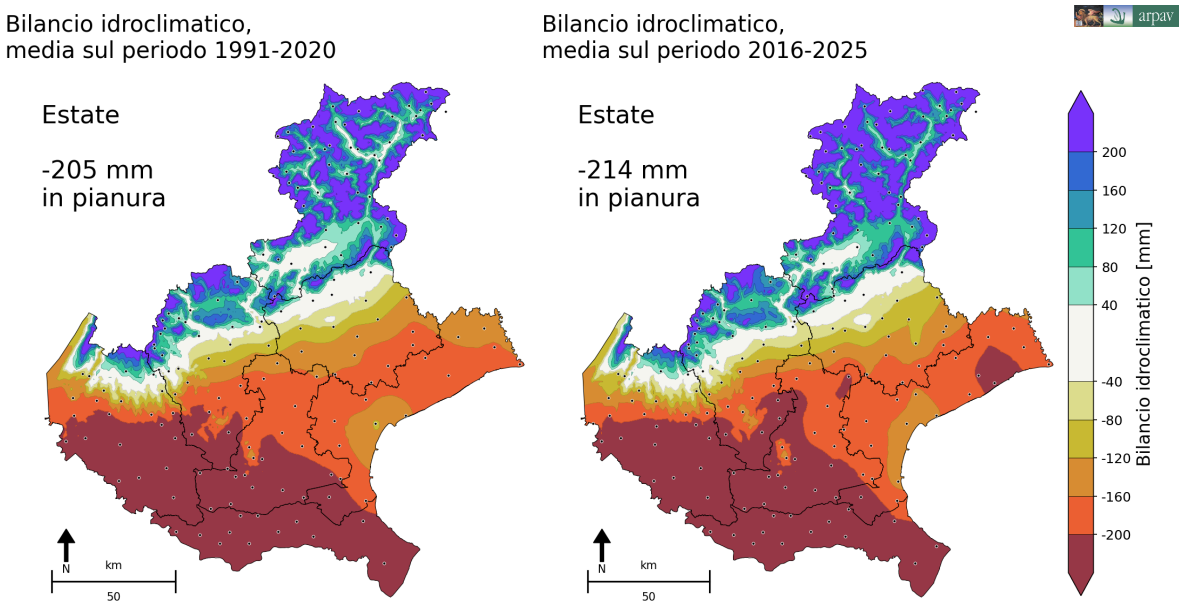


Figura 59. Bilancio idroclimatico (BIC) in estate nel trentennio di riferimento 1991-2020 (sinistra) e nell'ultimo decennio 2016-2025 (destra) sul Veneto. Mappe ottenute dall'interpolazione spaziale dei dati delle stazioni ARPAV, indicate con punti.

L'interpretazione delle mappe del bilancio idroclimatico (figura 59) è immediata: i valori positivi identificano situazioni di surplus o eccedenza idrica, mentre i valori negativi evidenziano condizioni di deficit d'acqua, segnalando lo stato e la gravità della siccità sul territorio.

L'analisi delle proiezioni future del bilancio idroclimatico si concentra sulla stagione primaverile-estiva, con l'obiettivo di stimare l'impatto dei cambiamenti climatici sui fabbisogni irrigui delle colture tipiche di questo periodo. Il monitoraggio del BIC primaverile risulta infatti

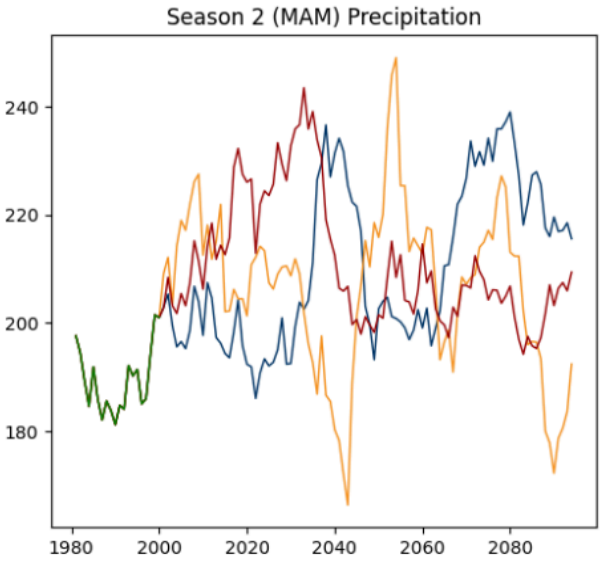
fondamentale per determinare lo stato di idratazione dei terreni a inizio estate e prevedere la disponibilità idrica all'avvio della fase più critica della stagione vegetativa.

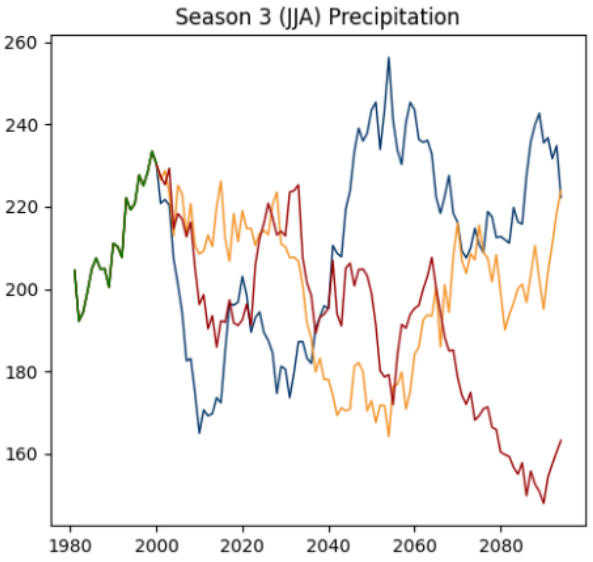
Per rappresentare la variabilità geografica del Veneto, la valutazione prende in esame sette località identificative di varie aree: Buttapietra per la pianura occidentale, Concadirame per la pianura meridionale, Legnaro per la pianura centrale, Lugugnana per la pianura orientale e Villorba per la pianura nord-orientale, Malo per la fascia prealpina occidentale e Feltre per la Valbelluna.

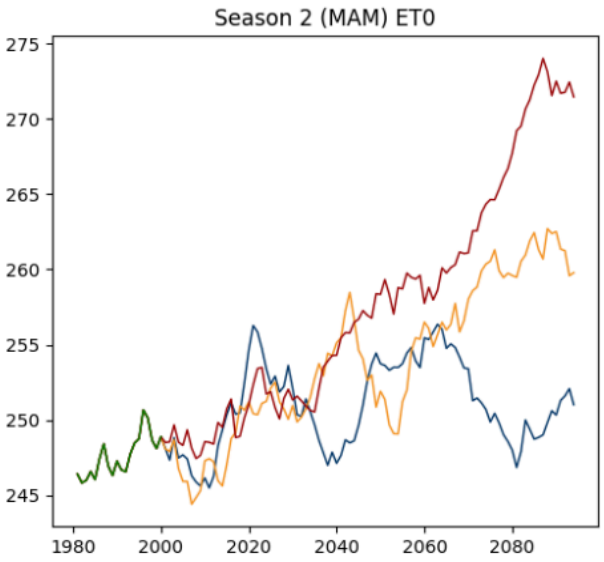
Nella tabella seguente si riportano i valori di anomalia per i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per la primavera e l'estate nei due scenari - basse emissioni RCP2.6 e alte emissioni RCP8.5 - e per le sette località indicate.

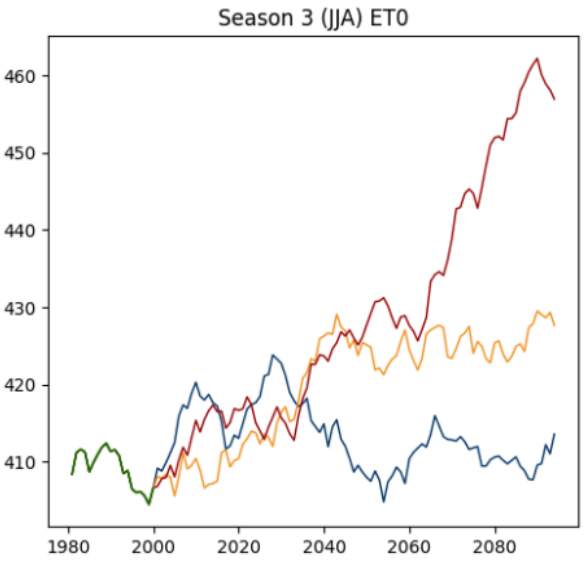
Anomalia [mm] futuro-passato bilancio idroc. @località	Stagione	2021-2050		2071-2100	
		rcp26	rcp85	rcp26	rcp85
Legnaro (PD)	MAM	+12	**+21***	**+24***	-11
	JJA	-19	-17	-3	**-95***
Buttapietra (VR)	MAM	**+8**	**+9**	**+18**	-17
	JJA	-17	-18	+1	**-103**
Concadirame (RO)	MAM	+10	**+18**	**+18**	-15
	JJA	-12	-15	+1	**-93**
Lugugnana (VE)	MAM	**+21**	**+36**	**+41**	+4
	JJA	-9	-14	+7	**-90**
Malo (VI)	MAM	+9	+24	**+37**	-20
	JJA	-21	-21	+7	**-136**
Villorba (TV)	MAM	**+25**	**+34**	**+40**	-6
	JJA	-26	-22	0	**-114**
Feltre (BL)	MAM	+12	+22	**+40**	-9
	JJA	-12	-22	+1	**-124**

** In **grassetto** sono riportate le variazioni significative statisticamente, tenendo conto dell'incertezza dell'ensemble di modelli; in blu le variazioni positive, in marrone le variazioni negative. Si considerano la stagione primavera (MAM) con il trimestre marzo, aprile, maggio ed estate (JJA) con il trimestre giugno, luglio, agosto.*


Season 2 (MAM) Precipitation
240
220
200
180
1980
2000
2020
2040
2060
2080


Season 3 (JJA) Precipitation
260
240
220
200
180
160
1980
2000
2020
2040
2060
2080


Season 2 (MAM) ET0
275
270
265
260
255
250
245
1980
2000
2020
2040
2060
2080


Season 3 (JJA) ET0
460
450
440
430
420
410
1980
2000
2020
2040
2060
2080

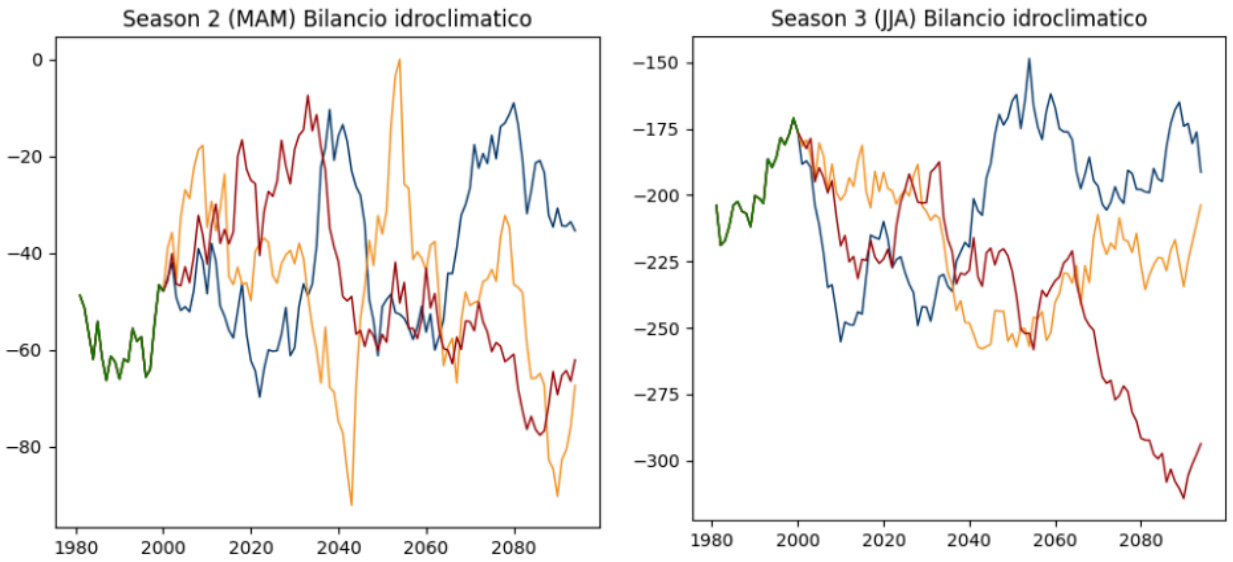


Figura 60. Precipitazione, evapotraspirazione potenziale ET0 e bilancio idroclimatico per la località di Legnaro (PD) per le stagioni primavera (sx) e estate (dx). Le curve indicano gli scenari RCP8.5 (rosso), RCP4.5 (giallo) RCP2.6 (blu) e le osservazioni (verde).

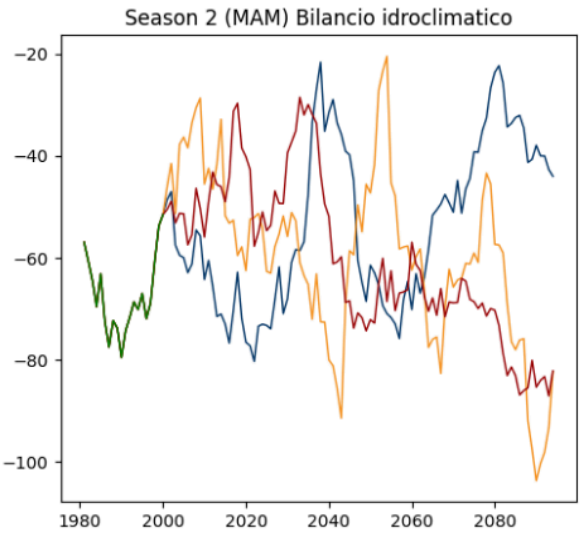
Nel lungo termine, riferito al trentennio 2071-2100, le proiezioni evidenziano situazioni molto differenti a seconda dello scenario climatico. Nello scenario a basse emissioni RCP2.6 la primavera mostra un aumento medio del bilancio idroclimatico, fino a +40 mm nella pianura orientale. Al contrario, nello scenario senza mitigazione RCP8.5 si evidenzia una forte diminuzione del bilancio idroclimatico estivo fino a -130 mm nelle prealpi orientali, ed anche la primavera è caratterizzata da una diminuzione del bilancio, anche se non significativa statisticamente.

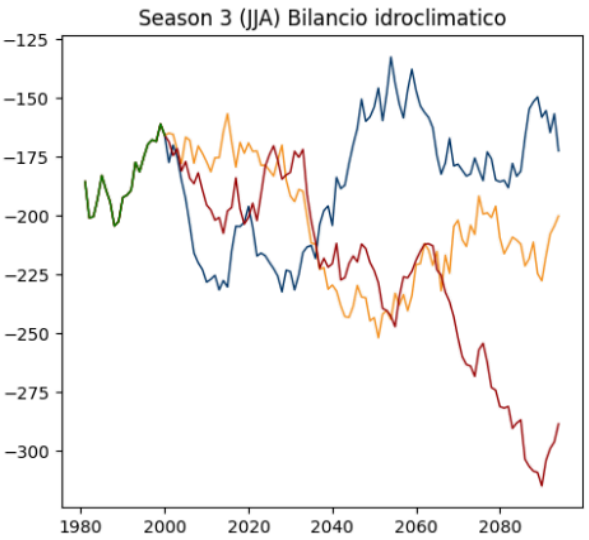
Nella figura 60 si presenta un focus di dettaglio per la stazione di Legnaro, di cui vengono illustrati gli andamenti di precipitazione, evapotraspirazione potenziale e bilancio idroclimatico complessivo per la primavera e l'estate.

Considerando lo scenario RCP8.5 a fine secolo, ci si attende una diminuzione della precipitazione estiva e un aumento dell'evapotraspirazione potenziale e una conseguente diminuzione del bilancio idroclimatico; per la primavera ci si attende un lieve aumento della precipitazione stagionale ma un deciso aumento dell'evapotraspirazione potenziale e, quindi, una complessiva diminuzione del bilancio idroclimatico (anche se non significativo statisticamente).

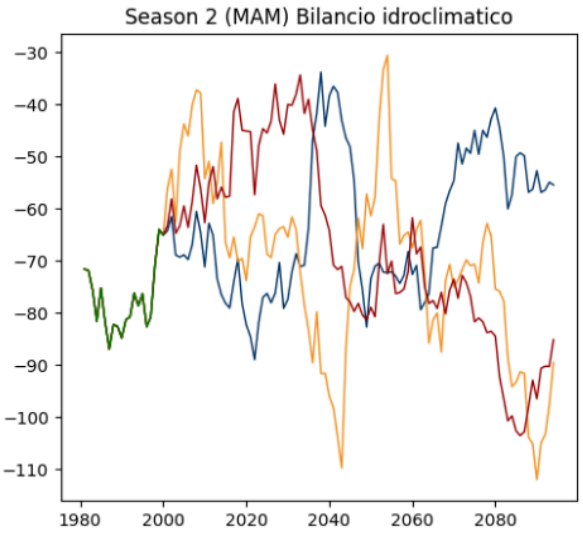
Per le rimanenti località (figura 61), la trattazione si concentra direttamente sulle curve del bilancio nelle due stagioni, con le stesse conclusioni riportate nella tabella sopra.

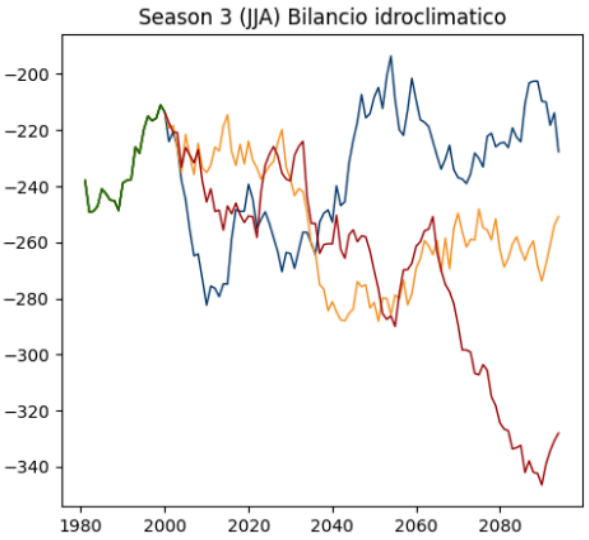
Buttapietra (VR)



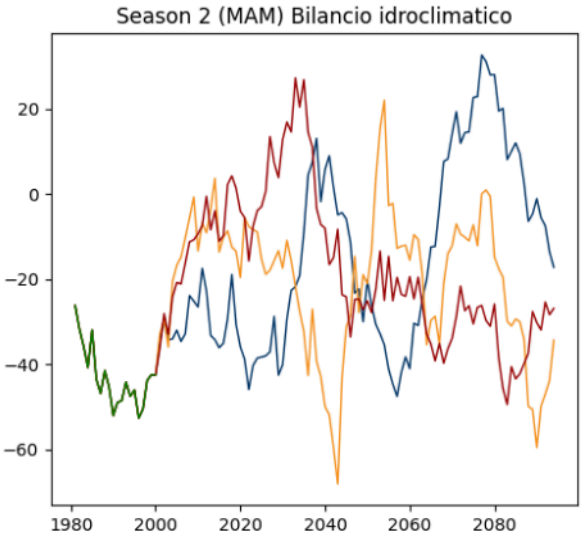


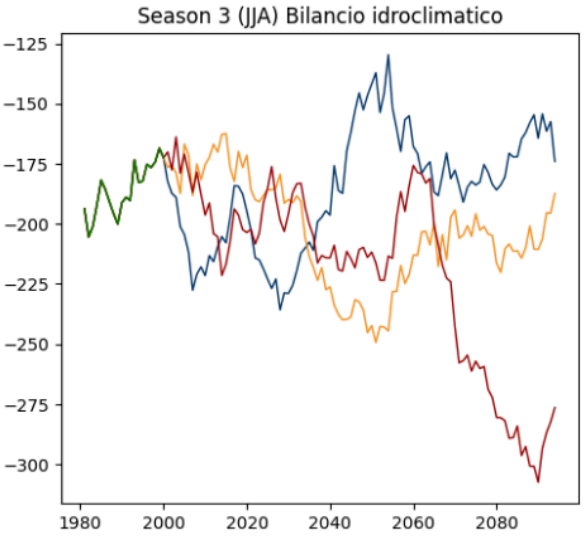
Concadirame (RO)



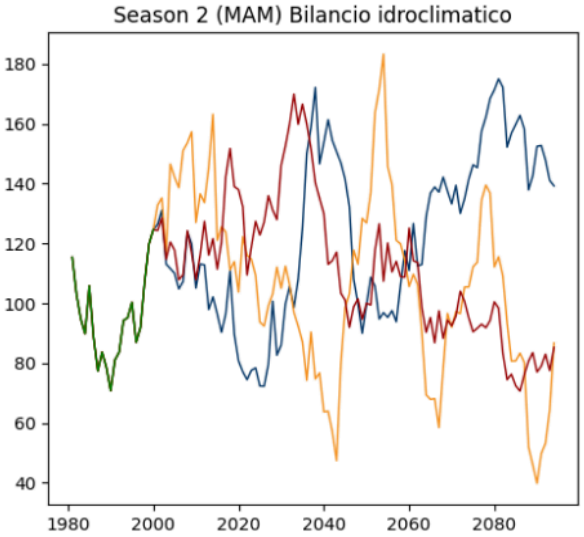


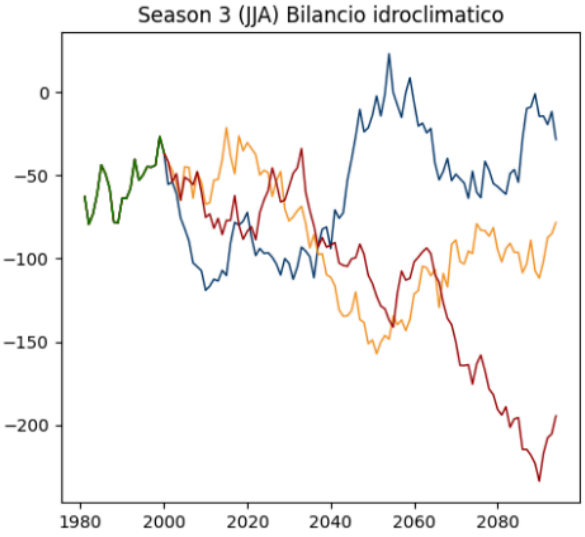
Lugugnana (VE)



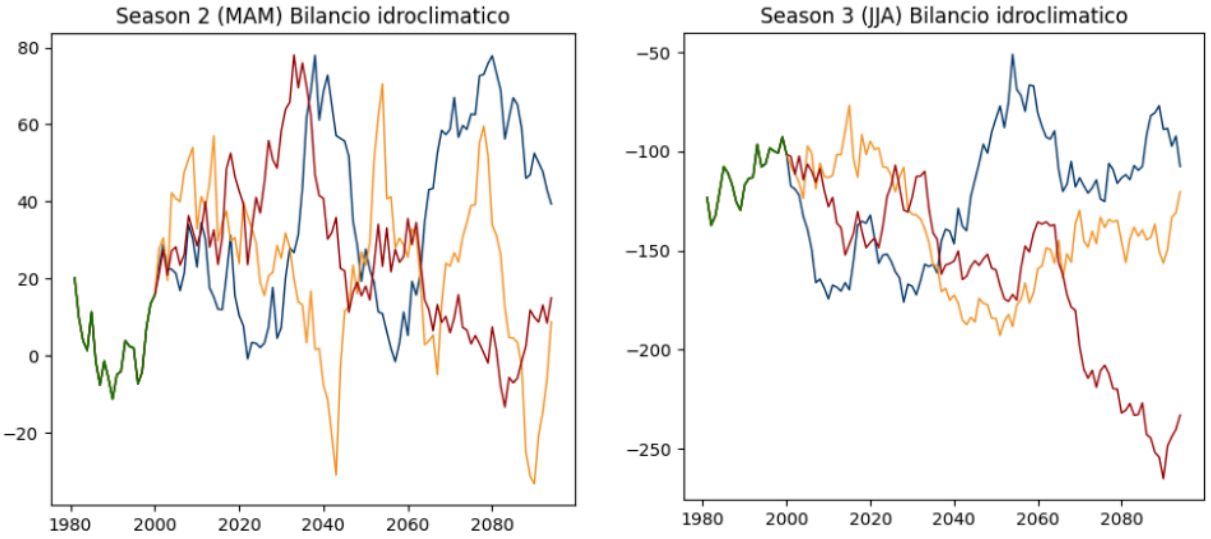


Malo (VI)





Villorba (TV)



Feltre (BL)

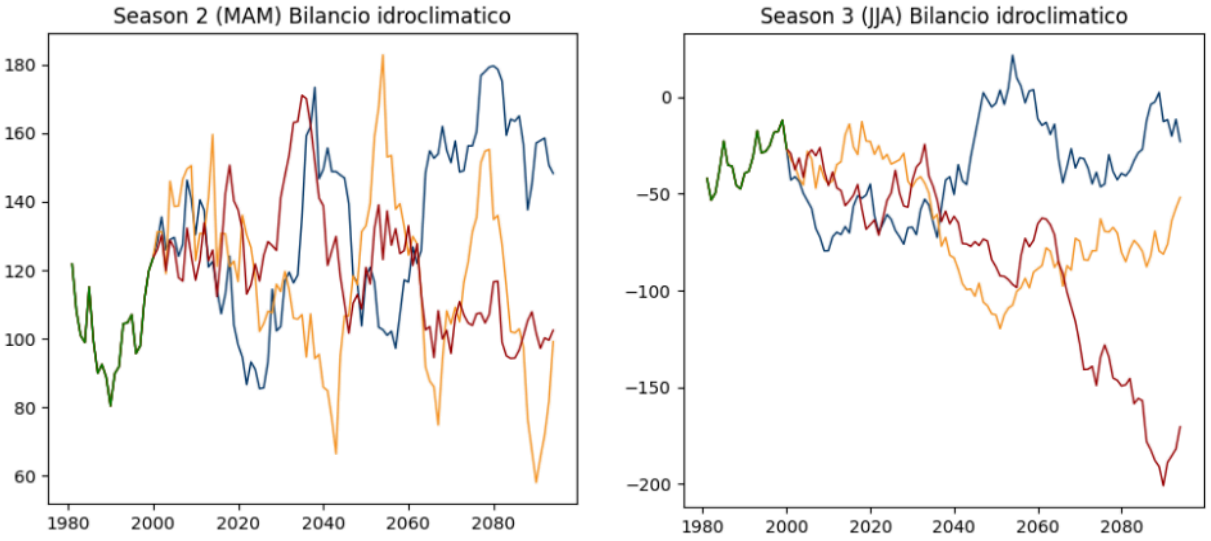


Figura 61. Bilancio idroclimatico per la primavera (sx) e l'estate (dx) per le varie località riportate nella varie righe, rispettivamente: Buttapietra (VR), Concadirame (RO), Lugugnana (VE), Malo (VI), Villorba (TV), Feltre (BL). Le curve indicano gli scenari RCP8.5 (rosso), RCP4.5 (giallo), RCP2.6 (blu) e le osservazioni (verde).

Gli indicatori BIC ed ET0 sono disponibili nel Bollettino meteoclimatico nei riepiloghi mensili, stagionali e annuali e sono inoltre disponibili per il download tramite API.

La Dashboard del Progetto Climate_CRICES

Nell'ambito del progetto Climate CRICES, è stata sviluppata e testata una Dashboard di Adattamento Climatico (Climate Adaptation Dashboard): uno strumento a supporto degli enti locali e regionali per la gestione degli impatti dei cambiamenti climatici attraverso valutazioni basate sui dati e metadati.

La piattaforma (figura 62) costituisce l'infrastruttura di riferimento e il punto di accesso integrato per la consultazione degli indicatori utilizzati per descrivere e analizzare le principali pressioni e vulnerabilità territoriali. Gli indicatori sono direttamente collegati ai pericoli climatici (climate hazards), di cui descrivono caratteristiche ed evoluzione, e alle misure di policy, orientate a prevenire o ridurre i rischi.



Figura 62. Sezione di navigazione generale della Dashboard del Progetto Climate CRICES. Per agevolare l'utilizzo della Dashboard, sono messi a disposizione alcuni video-tutorial, consultabili a partire dalla stessa pagina di accesso ai contenuti della Dashboard.

Per guidare l'utente nell'analisi dei dati e nel supporto alle decisioni, la Dashboard offre tre percorsi principali d'accesso:

- *Confronta Regioni*: un'interfaccia per analizzare e mettere a confronto le diverse aree territoriali del partenariato;
- *Trova Dati*: la sezione di ricerca diretta per accedere al catalogo degli indicatori e ai relativi dataset;
- Scopri le Linee Guida: un'area dedicata alla consultazione delle buone pratiche e dei documenti metodologici a supporto delle politiche di adattamento.

Attraverso la sezione di esplorazione dei dati, gli indicatori di rischio sono organizzati in un catalogo interattivo (figura 63) filtrabile sulla base di due criteri guida principali: la categoria di rischio climatico (Calore e Siccità, Alluvioni e Biodiversità) e il recettore interessato (elementi naturali, ambientali, sociali ed economici esposti).

Per ciascun indicatore, la Dashboard consente di visualizzare direttamente un'anteprima delle serie temporali o fornisce il collegamento diretto ai dataset di supporto. Le fonti informative integrano sia dati europei ad alta risoluzione (in particolare i prodotti dei servizi Copernicus Climate Change Service e Land Monitoring Service), sia i dati osservativi delle reti stazionali e di monitoraggio regionale (come i dati di ARPAV per il Veneto), garantendo sia la confrontabilità su scala transnazionale che il dettaglio locale.

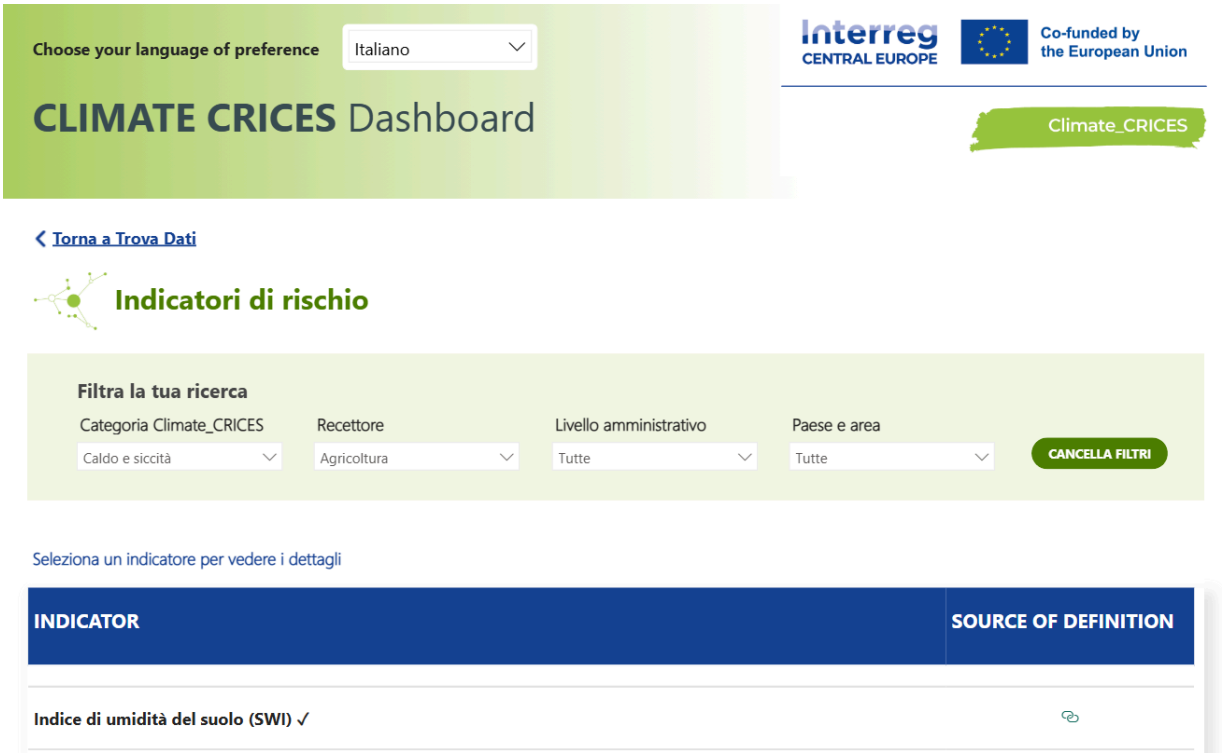


Figura 63. Interfaccia di selezione degli indicatori sulla Dashboard del Progetto Climate_CRICES.

I partner di progetto, i Partner Strategici Associati (ASP) e gli altri stakeholder sono chiamati ad adottare e implementare la Dashboard nei rispettivi contesti territoriali. È proprio all'interno di questo catalogo integrato, e in particolare nella categoria di rischio legata a *Calore e Siccità*, che si colloca l'indicatore *Soil Water Index (SWI)* che si è deciso di portare ad esempio.

Indice di umidità del suolo (SWI)

L'indice di umidità del suolo (Soil Water Index) è un indicatore utile per il monitoraggio dei fenomeni di siccità. Prodotto nell'ambito del Copernicus Land Monitoring Service (CLMS), il servizio europeo per il monitoraggio del territorio, si basa su osservazioni satellitari elaborate per descrivere l'evoluzione dell'umidità del suolo nel tempo.

L'umidità del suolo è una variabile importante per comprendere le interazioni tra precipitazioni, infiltrazione e disponibilità idrica per la vegetazione. La sua diminuzione può segnalare condizioni favorevoli allo sviluppo della siccità agricola ed ecologica e contribuire alla valutazione dello stress idrico della vegetazione. Il SWI integra pertanto le informazioni fornite da indicatori basati su precipitazioni e temperatura, descrivendo una componente del sistema idrologico direttamente legata alle condizioni del terreno.

Il prodotto Soil Water Index (SWI) del Copernicus Land Monitoring Service fornisce dati sull'umidità del suolo con copertura europea, frequenza giornaliera e risoluzione spaziale di circa 1 km. La disponibilità di informazioni con questo livello di dettaglio consente di analizzare la distribuzione dell'umidità del suolo e le sue variazioni nel tempo, anche in relazione agli episodi di siccità. Attraverso la piattaforma Copernicus è inoltre possibile consultare le diverse versioni del dataset e i relativi periodi di riferimento. Si riporta un esempio in figura 64.

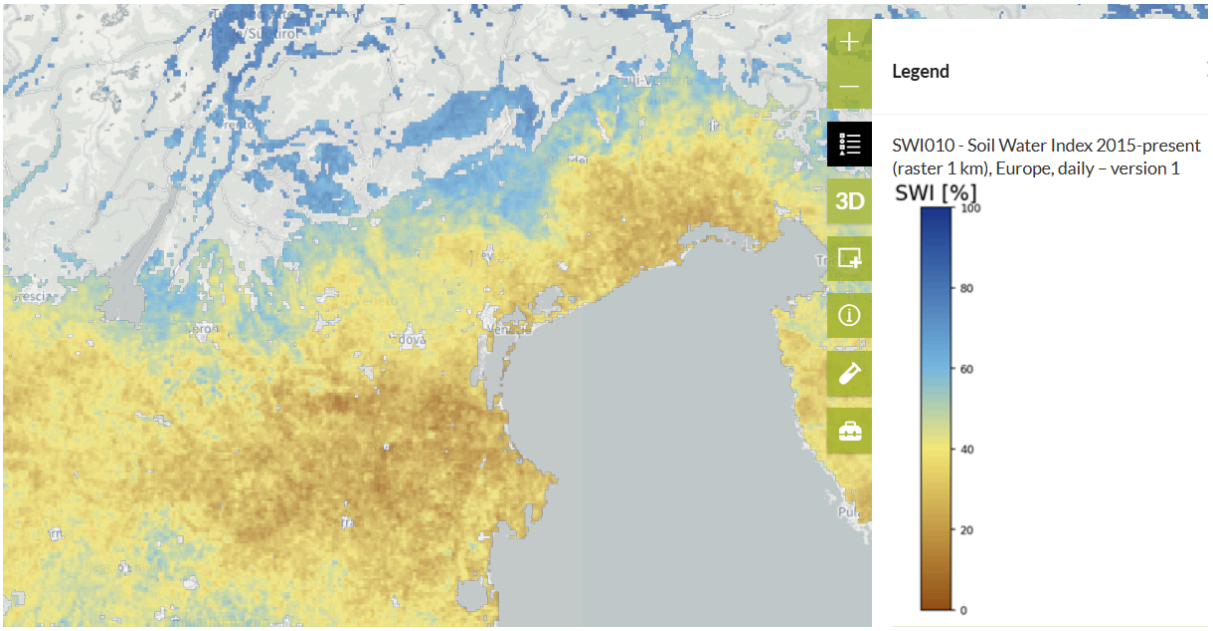


Figura 64. Visualizzatore dati raster dell'indice di umidità del suolo dal sito Copernicus. L'immagine centrata sul Nord Est italiano mostra il valore dello SWI il 2 luglio 2022, durante un periodo siccitoso.

Dal punto di vista metodologico, l'indice integra osservazioni satellitari dell'umidità superficiale del suolo provenienti da Sentinel-1 e ASCAT attraverso un filtro esponenziale, che tiene conto anche delle osservazioni precedenti per stimare l'evoluzione dell'umidità nel tempo. Il prodotto comprende diverse bande, associate a differenti scale temporali. I valori del SWI variano da 0 a 100 e rappresentano una misura relativa delle condizioni di umidità: la loro interpretazione richiede quindi attenzione alla banda utilizzata e alla qualità dei dati.

Nell'analisi dei rischi climatici, il SWI può essere utilizzato per individuare aree caratterizzate da condizioni di scarsa umidità del suolo e confrontarne l'evoluzione nel tempo. L'indicatore fornisce un contributo alla caratterizzazione della siccità, ma deve essere interpretato insieme ad altre informazioni climatiche, ambientali e territoriali per comprendere le possibili conseguenze sui recettori esposti.

Riferimenti bibliografici per gli indicatori

Giorni Estivi (SU30) e Giorni Torridi (SU35)

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

ETCCDI, "List of 27 core climate indices," Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Warm-Spell Duration Index (WSDI) e Heat-Wave Duration Index (HWDI)

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

ETCCDI, "List of 27 core climate indices," Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

Gallina, V., and Giorgi, F. (2018). Studio conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia, ARPA FVG.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Heat-Wave Magnitude Index (HWMI) e Heat-Wave Magnitude Index daily (HWMId)

Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. H., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., Singleton, A., Montagna, P., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(21), 12500-12512.

Russo, S., Sillmann, J., & Fischer, E. M. (2015). Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the future. Environmental Research Letters, 10(12), 124003.

Shevchenko, O., Oliinyk, R., Snizhko, S., Svintsitska, H., & Kostyrko, I. (2020). Indexing of Heatwaves in Ukraine. Water, 12(4), 962.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Ondate di forte disagio fisico

Masterton, J. M., & Richardson, F. A. (1979). Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. CLI 1-79, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario.

Notti tropicali (TR)

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

ETCCDI, "List of 27 core climate indices," Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Giorni di gelo (FD)

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

ETCCDI, "List of 27 core climate indices," Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Somme termiche per l'agricoltura

McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. Agricultural and Forest Meteorology, 87(4), 291-300.

Indicatori per energia CDDs e HDDs

ASHRAE (2021). ASHRAE Handbook—Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.

Eurostat, "Heating and cooling degree days (nrg_chdd_esms)," Eurostat Reference Metadata, European Commission, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/cache/metadata/en/nrg_chdd_esms.htm.

ISPRA (2022). Gli indicatori del clima in Italia. Rapporti ISPRA / SNPA (pubblicati annualmente con metodologia standardizzata per HDDs e CDDs).

Spinoni, J., Vogt, J. V., Barbosa, P., Dosio, A., McCormick, N., & Dosio, K. (2018). Changes of heating and cooling degree-days in Europe under climate change scenarios. Regional Environmental Change, 18(5), 1501-1513.

Giorni consecutivi secchi (CDD)

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

ETCCDI, "List of 27 core climate indices," Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC). [Online]. Available: https://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Giorni di neve nuova (SNWdays)

ARPA FVG (2024). Segnali dal clima in Friuli Venezia Giulia - 2024. Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia.
https://arpa.fvg.it/temi/temi/meteo-e-clima/pubblicazioni/segnali-dal-clima-in-fvg-2024/

Zubler, E. M., Scherrer, S. C., Croci-Maspoli, M., Liniger, M. A., and Appenzeller, C. (2014). Key climate indices in Switzerland; expected changes in a future climate. Climatic Change, 123, 255-271. https://doi.org/10.1007/s10584-013-1041-8

Fire Weather Index (FWI)

Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 35, Canadian Forestry Service, Ottawa.

SPI-SPEI

C3S/ECMWF and ECA&D, "Indices dictionary," Copernicus Climate Change Service (C3S) Surfobs, [Online]. Available: https://surfobs.climate.copernicus.eu/userguidance/indicesdictionary.php.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and severity to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, pp. 179-183). American Meteorological Society Anaheim, CA.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696-1718.

WMO ET-SCI, "Climpact Indices List," Climpact: Climate indices for sector-specific applications, [Online]. Available: https://climpact-sci.org/indices/.

Bilancio Idroclimatico (BIC)

G. L. Hargreaves and Z. A. Samani, "Estimating potential evapotranspiration," Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol. 108, no. 3, pp. 225-230, 1982.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38(1), 55-94.

Indice di umidità del suolo (SWI)

Albergel, C., Rüdiger, C., Pellarin, T., Calvet, J. C., Fritz, N., Froissard, F., Suquia, D., & Martin, E. (2008). From continuous single-point measurements of soil moisture to the Soil Water Index: Application over France. Hydrology and Earth System Sciences, 12(3), 743-756.

C3S (2021). ECV (Essential Climate Variables) Products Specifications: Soil Moisture, Temperature, Extreme Indices. Copernicus Climate Change Service Documentation.