



Lo stato del clima in Trentino

Gli impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi ambientali e sui settori socio-economici



PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

TRENTINO



AGENZIA PROVINCIALE PER
LA PROTEZIONE DELL'AMBIENTE



Il rapporto “Lo stato del clima in Trentino” è realizzato nell’ambito del programma di lavoro “Trentino Clima 2021-2023” verso l’adozione della Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici della Provincia autonoma di Trento. Il rapporto è stato redatto in collaborazione con i Dipartimenti della Provincia autonoma di Trento riuniti nel Tavolo provinciale di coordinamento e di azione sui cambiamenti climatici.

Responsabile

dott. Romano Masè

Dirigente generale dell’Agenzia Provinciale per la Protezione dell’Ambiente (APPA)

Coordinamento scientifico

dott. Roberto Barbiero e ing. Lavinia Laiti

Agenzia Provinciale per la Protezione dell’Ambiente (APPA)

Coordinamento tecnico e redazionale

dott. Roberto Barbiero e ing. Lavinia Laiti (APPA), dott. Silvia Scarian Monsorno e dott. David Tombolato (MUSE)

Contributi scientifici

Università degli Studi di Trento

Fondazione Edmund Mach (FEM)

Museo delle Scienze (MUSE)

Fondazione Bruno Kessler (FBK)

Hub Innovazione Trentino (HIT)

Impaginazione e grafica

Sara Radice

Per informazioni

Agenzia Provinciale per la Protezione dell’Ambiente (APPA)

Trento, Piazza Vittoria, 5

www.appa.provincia.tn.it - www.climatrentino.it

Editore

Provincia autonoma di Trento, settembre 2024

Si autorizza la riproduzione delle informazioni e dei dati pubblicati purché sia indicata la fonte. In coerenza con gli obiettivi di conservazione delle risorse e tutela ambientale, il presente documento non è stato stampato, ma pubblicato esclusivamente sul sito web www.appa.provincia.tn.it.

Sommario

Introduzione	4
La Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici	4
Cosa contiene il rapporto	4
Come è stato costruito il rapporto	5
Cittadini trentini e consapevolezza sul tema dei cambiamenti climatici	7
I cambiamenti climatici in Trentino	13
Temperature e precipitazioni	15
Emissioni climalteranti	25
Scenari climatici futuri	35
Impatti dei cambiamenti climatici. Ambiente e natura	43
Neve, ghiacciai e permafrost	44
Acqua	57
Ecosistemi acquatici	67
Ecosistemi terrestri	75
Foreste	83
Suolo	91
Qualità dell'aria	99
Impatti dei cambiamenti climatici. Economia e società	109
Gestione delle risorse idriche	111
Pericoli naturali	121
Produttività forestale e filiera	133
Agricoltura	139
Allevamento e acquacoltura	151
Salute	163
Energia	175
Turismo	183
Insedimenti e aree urbane	193
Imprese, industrie e infrastrutture	201
Trasporti e infrastrutture	207
Patrimonio culturale	213
Coesione sociale, benessere e sicurezza delle comunità	219

Introduzione

La Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici

La redazione del rapporto “Lo stato del clima in Trentino” è parte del programma di lavoro “Trentino Clima 2021-2023”, l’atto di indirizzo (approvato con DGP n. 1306 del 7.8.2021) che ha delineato il percorso finalizzato ad adottare la Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

Le misure di mitigazione (riduzione delle emissioni di gas serra) sono essenzialmente quelle già indicate dal Piano Energetico Ambientale Provinciale (PEAP 2021-2030). Le misure di adattamento (riduzione e gestione degli impatti dei cambiamenti climatici) saranno in seguito integrate nei piani e programmi di settore.

Le evidenze che emergono dal rapporto “Lo stato del clima in Trentino” in merito alle ricadute settoriali dei cambiamenti climatici costituiscono l’elemento di partenza per la successiva analisi dei rischi climatici che include anche la valutazione degli elementi di vulnerabilità presenti sul territorio e degli elementi esposti come ad esempio la presenza di persone, di ecosistemi, di infrastrutture e di attività economiche, che potrebbero essere influenzati negativamente.

L’analisi dei rischi climatici consentirà di evidenziare le maggiori priorità al fine di individuare le possibili misure di adattamento nei diversi settori ambientali e socio-economici. Il percorso metodologico adottato si basa su quanto già utilizzato nell’ambito del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), approvato con decreto del 21 dicembre 2023, n. 434, dal Ministro dell’ambiente e della sicurezza energetica, e su quanto indicato a livello europeo dalla piattaforma di riferimento “Climate-ADAPT”, nonché dalle linee guida fornite dall’iniziativa ministeriale CREIAMO PA-Linea d’intervento 5 (Rafforzamento della capacità amministrativa per l’adattamento ai cambiamenti climatici) e dal Sistema Nazionale Protezione Ambiente (SNPA).

Cosa contiene il rapporto

Il rapporto offre una descrizione aggiornata delle principali evidenze scientifiche provenienti dalla letteratura specialistica più recente riguardanti i cambiamenti climatici e i loro molteplici impatti nel contesto del Trentino.

Nelle prime pagine viene esaminato l’andamento osservato in passato per le temperature e le precipitazioni in Trentino, insieme agli scenari previsti per il futuro per tali variabili climatiche e alle stime e previsioni delle emissioni dei principali gas climalteranti a livello provinciale (sezione “I cambiamenti climatici in Trentino”).

Nei capitoli successivi sono invece delineati i principali impatti dei cambiamenti climatici, sia osservati che attesi, distinguendo tra quelli che coinvolgono i sistemi ambientali e naturali del territorio provinciale (sezione “Impatti dei cambiamenti climatici. Ambiente e natura”) e quelli che influenzano i settori che costituiscono il tessuto economico e sociale del Trentino (sezione “Impatti dei cambiamenti climatici. Economia e società”). Tuttavia, va notato che questi due ambiti non sono nettamente distinti, in quanto le conseguenze del cambiamento climatico su uno possono avere effetti sia positivi che negativi sull’altro, e viceversa. Numerosi nel testo sono, infatti, i riferimenti incrociati tra capitoli diversi, anche appartenenti a sezioni differenti.

Come è stato costruito il rapporto

La costruzione del rapporto “Lo stato del clima in Trentino” si basa principalmente su un’analisi di letteratura svolta dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell’Università di Trento nell’ambito di un’attività di ricerca e studio dedicata finanziata dall’APPA. Un’approfondita ed attenta ricerca bibliografica ha permesso di armonizzare e sintetizzare gli studi tecnico-scientifici ad oggi disponibili in merito ai cambiamenti climatici osservati e attesi in Trentino, nonché per quanto riguarda i loro effetti sui vari sistemi naturali e sui settori socio-economici provinciali. Laddove non sono stati individuati studi sufficientemente dettagliati, sono state considerate le informazioni fornite dalla letteratura per l’area alpina, che possono ragionevolmente applicarsi anche al Trentino sebbene ulteriori approfondimenti possano essere richiesti in futuro.

Questo lavoro di sintesi è stato reso possibile grazie ai contributi e alle integrazioni di numerosi esperti appartenenti agli enti scientifici trentini e alle strutture della Provincia autonoma di Trento. Tale sforzo collaborativo mira a valorizzare il vasto patrimonio di dati di monitoraggio disponibili per il territorio provinciale e a mettere in evidenza le numerose valutazioni di carattere tecnico-scientifico basate su di essi, nonché a rilevare al tempo stesso eventuali lacune nel monitoraggio e nell’approfondimento scientifico.

Gli scenari futuri di cambiamento climatico per il Trentino sono, invece, il frutto di una specifica analisi svolta dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica allo scopo di fornire stime aggiornate dell’evoluzione dei principali indici termo-pluviometrici attesa per i prossimi decenni, che possano essere utilizzate per futuri studi di impatto in diverse discipline.

Al fine di rendere i risultati più accessibili a un vasto pubblico, il rapporto “Lo stato del clima in Trentino” traduce questa ricca raccolta di materiale scientifico in un linguaggio più sintetico, arricchito da grafici, immagini e box di approfondimento.

La stesura e la pubblicazione del rapporto hanno visto la collaborazione del MUSE, che ha curato con particolare attenzione la realizzazione grafica e gli aspetti di comunicazione e divulgazione. I contenuti dei diversi capitoli sono stati supervisionati, anche in base alle rispettive competenze, dalle strutture provinciali che partecipano al Tavolo provinciale di coordinamento e di azione sui cambiamenti climatici. Infine, per agevolare la consultazione, tutti i riferimenti bibliografici saranno resi disponibili sul sito di APPA.

Cittadini trentini e consapevolezza sul tema dei cambiamenti climatici

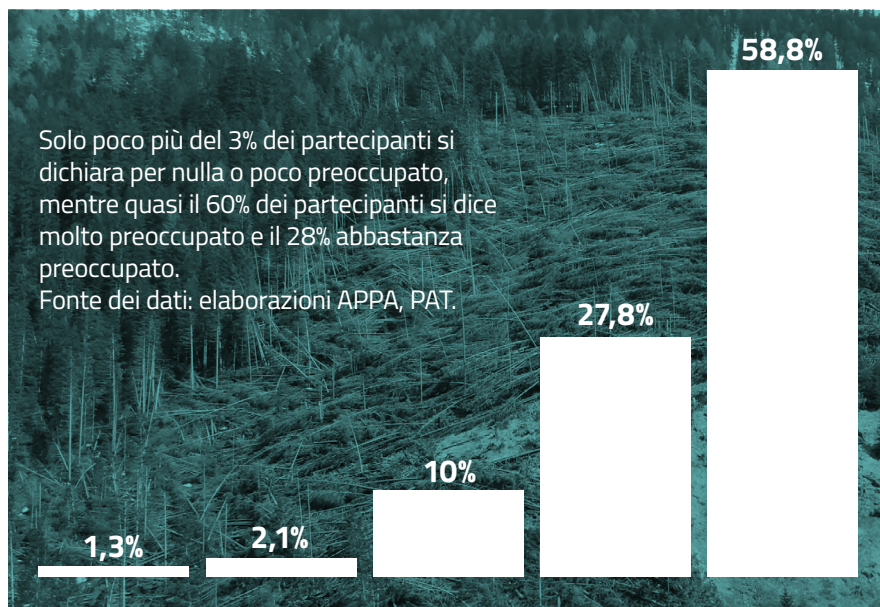
Per valutare il livello di consapevolezza sui cambiamenti climatici della cittadinanza trentina, è stato predisposto nell'ambito del programma di lavoro 'Trentino Clima 2021-2023', il questionario online 'Cambiamenti climatici in Trentino. Quanto ne sai?'. L'obiettivo è fornire un quadro di riferimento che possa supportare la definizione della futura Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici.

Circa 900 cittadini trentini hanno risposto al questionario online. Si tratta di un campione numeroso, ma è ragionevole supporre che ad essere stata raggiunta in maniera preferenziale sia quella parte di popolazione già sensibile all'argomento.

Di seguito sono descritti i risultati ottenuti per alcune delle domande che indagano la percezione degli impatti dei cambiamenti climatici da parte dei partecipanti e le modalità con le quali essi si informano sul tema. La sintesi completa dei risultati dell'indagine online, condotta tra marzo e giugno 2023, è disponibile per la consultazione al seguente link: www.appa.provincia.tn.it/News/APPA-informa-Newsletter-periodica/Cambiamenti-climatici-in-Trentino.-Quanto-ne-sai-i-risultati-dell-indagine.

DOMANDA 1

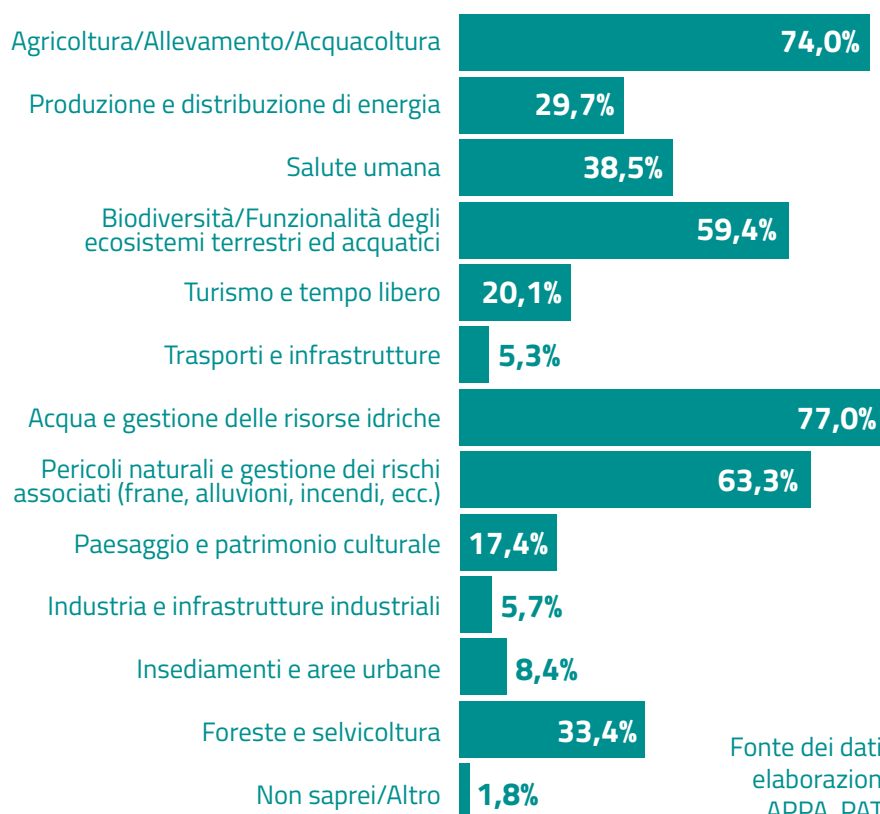
Sono preoccupato/a per l'attuale crisi climatica globale e per le sue conseguenze, anche per quanto riguarda il territorio nel quale vivo (Scala lineare da 1 - per nulla preoccupato a 5 - molto preoccupato).



La preoccupazione per gli impatti dei cambiamenti climatici nel territorio trentino e la consapevolezza della necessità di agire urgentemente per contrastare la crisi climatica anche a livello provinciale sono ampiamente condivise, da circa il 90% delle persone che hanno partecipato al sondaggio. Pur ritenendo che la responsabilità dell'azione climatica competa in primis al Governo nazionale, sia i cittadini stessi che la società civile nel suo complesso sono stati individuati dai partecipanti come soggetti attivi fondamentali nel contrasto ai cambiamenti climatici.

DOMANDA 2

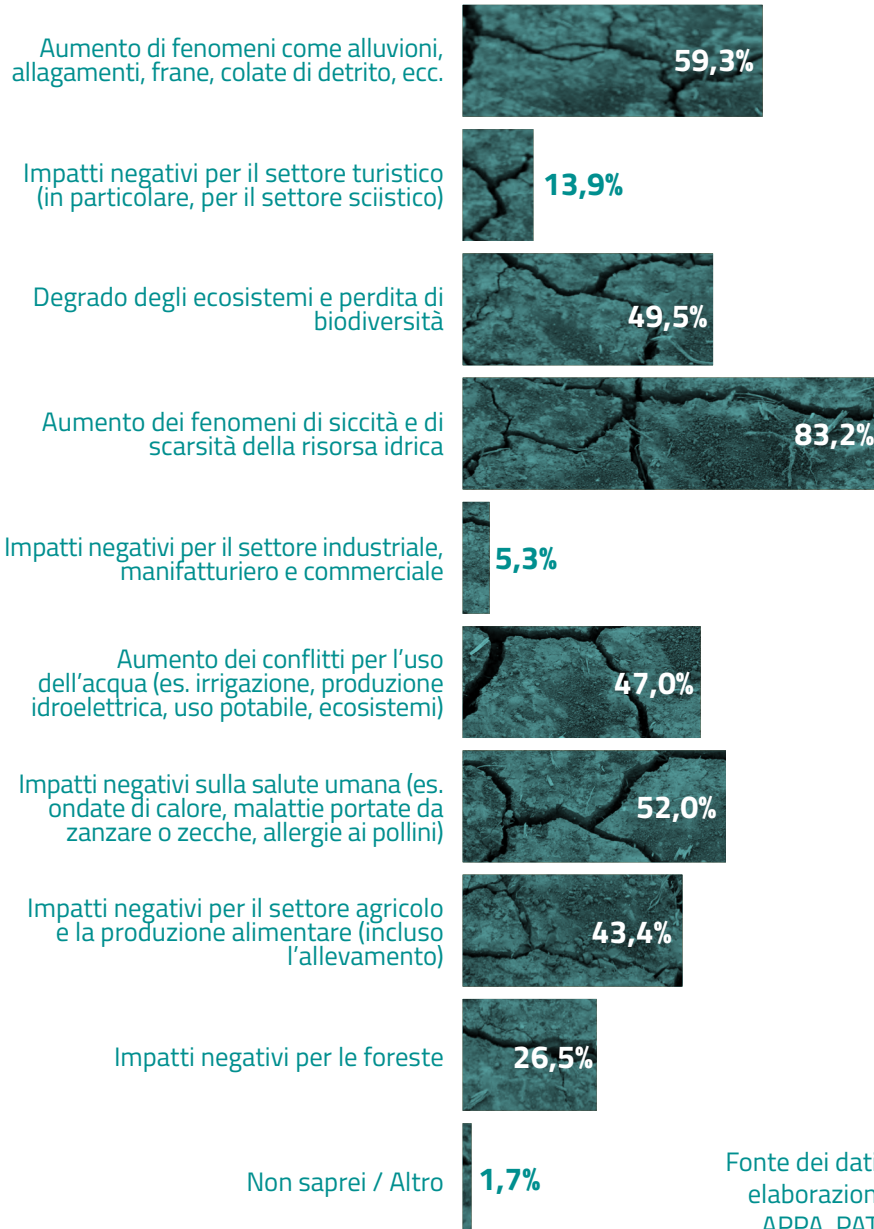
Quali dei seguenti settori credi siano maggiormente interessati dagli impatti del cambiamento climatico nel territorio nel quale vivi? (Massimo 3 scelte per ciascuna risposta).



Per quanto riguarda i sistemi ambientali e i settori socio-economici trentini ritenuti maggiormente interessati dagli impatti dei cambiamenti climatici, i risultati del sondaggio indicano tra i principali: Acqua e gestione delle risorse idriche (77% dei partecipanti), Agricoltura, allevamento e acquacoltura (74%), Pericoli naturali e gestione dei rischi associati quali frane, alluvioni, incendi e altro (63%), Biodiversità e funzionalità degli ecosistemi terrestri ed acquatici (59%). Seguono i sistemi e i settori restanti che sono trattati e descritti nei capitoli a seguire, il primo dei quali è la Salute umana con il 39% di risposte.

DOMANDA 3

Quali impatti negativi collegati al cambiamento climatico ti preoccupano maggiormente per quanto riguarda il territorio nel quale vivi, la tua attività lavorativa e la tua quotidianità? (Massimo 3 scelte per ciascuna risposta).



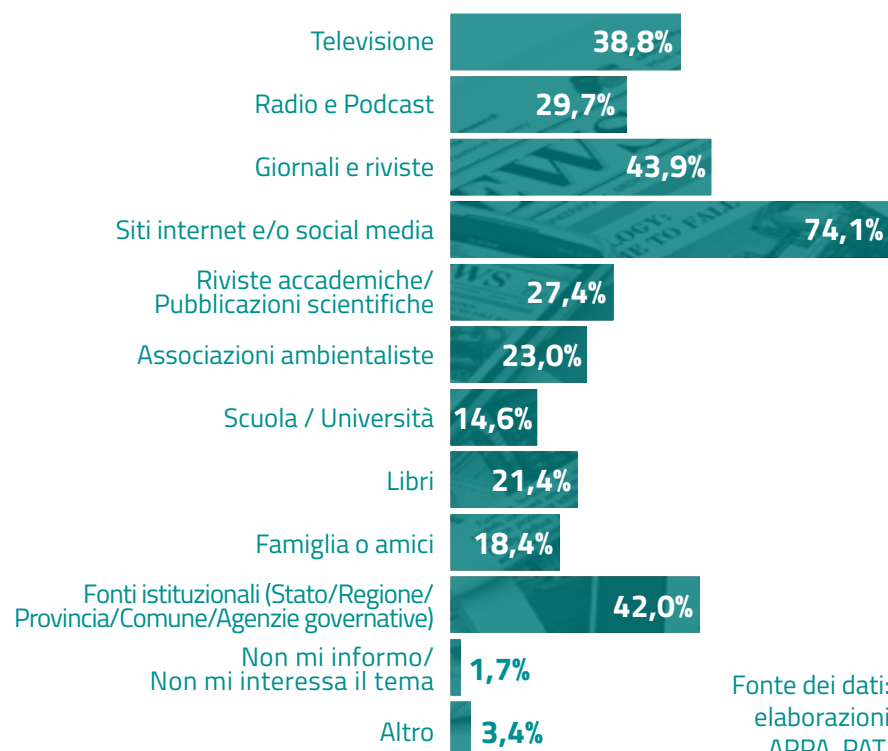
Se si rivolge l'attenzione a quali impatti negativi dei cambiamenti climatici preoccupino maggiormente i partecipanti, in ordine decrescente sono stati indicati: l'Aumento dei fenomeni di siccità e scarsità della risorsa idrica (83% delle risposte), seguito con notevole distacco dall'Aumento dei fenomeni come alluvioni, allagamenti, frane, colate di detrito, etc. (59%), dagli Impatti negativi sulla salute umana (52%), dal Degrado degli ecosistemi e perdita di biodiversità (50%), dall'Aumento dei conflitti per l'uso dell'acqua (47%) e dagli Impatti negativi per il settore agricolo e la produzione alimentare (43%).

Fonte dei dati:
elaborazioni
APPA, PAT.

La percezione degli ambiti di azione prioritari incorona quindi in maniera molto netta la gestione della risorsa idrica e dei suoi usi principali, in particolare di quelli legati ad agricoltura e allevamento. Questo risultato potrebbe essere stato influenzato, almeno in parte, dalla situazione di siccità prolungata che ha colpito il Nord Italia e il Trentino a partire dall'inverno 2021/2022 e dal prolungarsi della preoccupazione per le conseguenze anche nel periodo di somministrazione del questionario.

DOMANDA 4

Quali tra queste fonti di informazione sul tema dei cambiamenti climatici utilizzi con regolarità? (Più risposte possibili).



Fonte dei dati:
elaborazioni
APPA, PAT.

Siti internet e social media risultano le fonti di informazione sul tema dei cambiamenti climatici più consultate dai partecipanti (74%), seguiti da giornali, riviste e fonti istituzionali, come la Provincia autonoma di Trento e le sue strutture (42-44%), e dalla televisione (39%). I soggetti ritenuti maggiormente affidabili quali fonti di informazione sui cambiamenti climatici sono le istituzioni scientifiche (Università e altri enti di ricerca), seguite da musei e parchi naturali.





I cambiamenti climatici in Trentino

Temperature e precipitazioni

Le Alpi e il Trentino costituiscono un *hot spot* per i cambiamenti climatici: l'inequivocabile aumento delle temperature osservato è più rapido e intenso che a livello medio globale. Per le precipitazioni l'evidenza di variazioni indotte dai cambiamenti climatici non è altrettanto univoca e robusta.

Le variazioni di temperatura, dall'era pre-industriale ad oggi

L'Organizzazione Meteorologica Mondiale (World Meteorological Organization - WMO) indica il 2023 come l'anno più caldo mai registrato a livello globale a partire dal 1850, con un incremento della temperatura media globale di 1,45°C rispetto alla media del periodo cosiddetto pre-industriale (per convenzione gli anni 1850-1900), che è il periodo di riferimento utilizzato anche dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) per confrontare le condizioni passate con quelle attuali. A livello medio globale, gli ultimi 9 anni (2015-2023) risultano i più caldi in assoluto dal 1850 ad oggi.

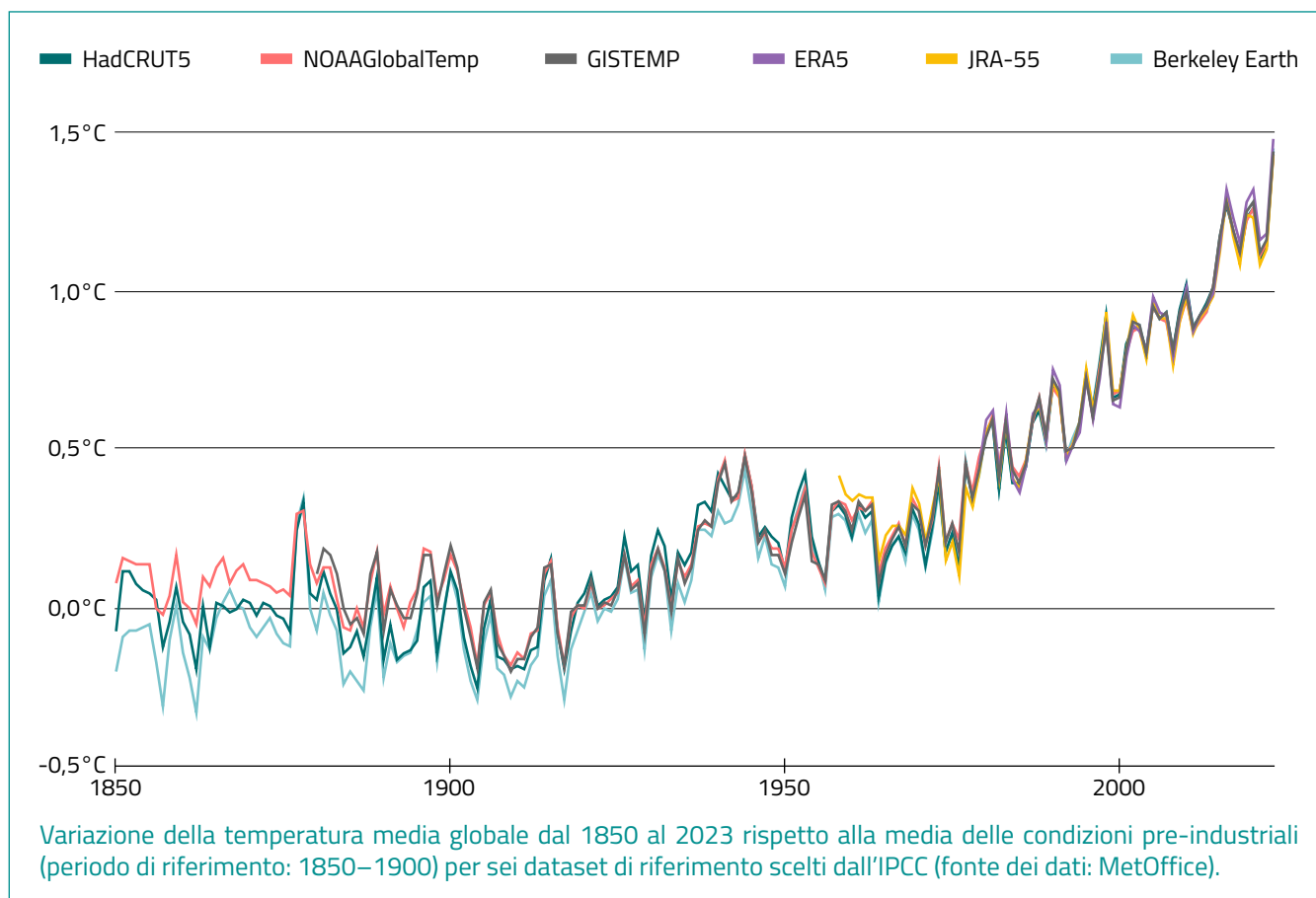
Secondo il Copernicus Climate Change Service (C3S), per il periodo di 12 mesi che va da febbraio 2023 a gennaio 2024, si stima un aumento medio della temperatura di 1,52°C rispetto all'era pre-industriale, superando così per la prima volta la soglia di 1,5°C indicata dall'Accordo sul Clima di Parigi (vedi capitolo EMISSIONI CLIMALTERANTI).

Climatologia: statistiche e convenzioni

Il clima è descritto attraverso grandezze statistiche come medie, tendenze lineari e varianze, calcolate per le variabili atmosferiche principali, come temperatura e precipitazioni in primis.

Per descrivere l'andamento climatico di un determinato periodo in una certa regione e monitorare quanto ci si discosta dai valori medi storici, si calcolano le anomalie climatiche, ovvero gli scarti tra grandezze o indicatori rispetto ai loro valori medi determinati su un periodo di riferimento ritenuto rappresentativo dal punto di vista climatologico.

Come indicato dalla WMO - World Meteorological Organization, il periodo di riferimento utilizzato per convenzione in climatologia è almeno di trenta anni. Ad esempio, il periodo di riferimento raccomandato come rappresentativo del clima più recente è per convenzione il trentennio climatologico 1991-2020.



Rispetto all'era pre-industriale le temperature medie registrate per il continente europeo sono aumentate di almeno 2.3 °C con un tasso di circa 0.5°C per decade negli anni più recenti (una velocità considerevole, più del doppio rispetto alla media globale). La temperatura media del 2023 è la seconda più elevata mai registrata in Europa mentre il 2020 rimane l'anno più caldo dal 1880, secondo il C3S.

Analogamente, a livello nazionale, dagli anni Ottanta si è verificato in Italia un rapido aumento delle temperature. Secondo i dati del CNR-ISAC, il 2022 si è rivelato l'anno più caldo registrato dal 1800, mentre il 2023 si è attestato al secondo posto, con un aumento stimato di oltre 2°C rispetto al periodo pre-industriale.

Le variazioni di temperatura in Trentino

Una recente analisi di APPA effettuata sulla base dei dati forniti da Meteotrentino ha esplorato le variazioni climatiche a scala provinciale per il periodo compreso tra il 1961 e il 2020, confrontando le statistiche climatologiche per i trentenni 1961-1990, 1971-2000, 1981-2010 e 1991-2020.

La tendenza di riscaldamento in Trentino mediamente è risultata pari a 0,3-0,4°C/decennio sull'intero periodo, con un'accelerazione significativa tra il trentennio 1981-2010 e il 1991-2020.

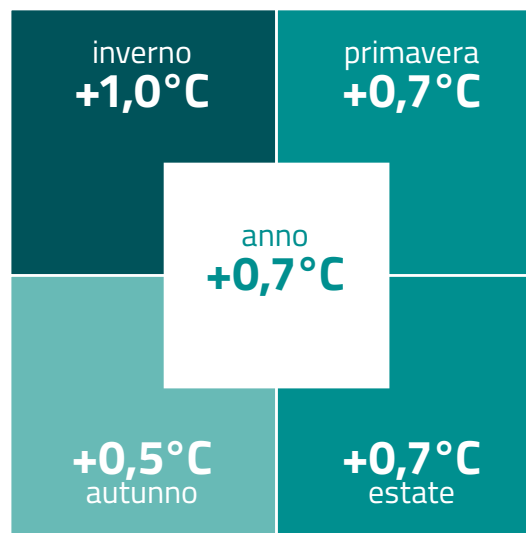
Le tendenze di aumento delle temperature annue in Trentino negli ultimi decenni, indicate dagli studi fino ad oggi disponibili, appaiono allineate con quanto riportato a livello europeo e italiano, ossia pari a circa 0,4°C per decade.

Gli incrementi netti di temperatura osservati tra il trentennio 1961-1990 e il 1991-2020 sono mediamente dell'ordine di 1,1°C circa per le temperature medie giornaliere, circa 0,5°C per le temperature minime giornaliere e circa 1,7°C per le temperature massime giornaliere.

Per le temperature minime giornaliere la velocità di riscaldamento, in precedenza minore di quella registrata per le massime, risulta in accelerazione nel trentennio più recente (1991-2020).

La tendenza delle temperature a scala stagionale vede le minime crescere più velocemente in estate e in inverno, mentre l'incremento delle

massime appare più rapido in primavera e estate. Le temperature medie mostrano incrementi più pronunciati in primavera e in estate e/o inverno, a seconda del sito considerato. L'autunno, ad ogni quota, è la stagione caratterizzata dal riscaldamento meno accentuato nel periodo di analisi.



Variazioni della temperatura media annua e stagionale (media 1991-2020 vs. 1961-1990) - Stazione di Trento Laste (fonte: analisi a cura di APPA PAT su dati di Meteotrentino PAT).

Gli indici climatici

L'analisi delle variazioni climatiche si basa sull'elaborazione di indici climatici o di cambiamento climatico, elaborati a partire dalle osservazioni raccolte presso le stazioni meteorologiche della rete di monitoraggio distribuita sul territorio. Questi dati sono indispensabili per consolidare la conoscenza scientifica alla base della definizione di efficaci strategie di contrasto ai cambiamenti climatici e ai loro impatti.

Gli indici del set ETCCDI

Il team di esperti ETCCDI – Expert Team on Climate Change Detection and Indices ha identificato 27 indici riconosciuti a livello internazionale, con l'obiettivo di misurare in maniera standardizzata le variazioni indotte dai cambiamenti climatici a partire dai valori giornalieri di temperatura media, minima e massima e di precipitazione.

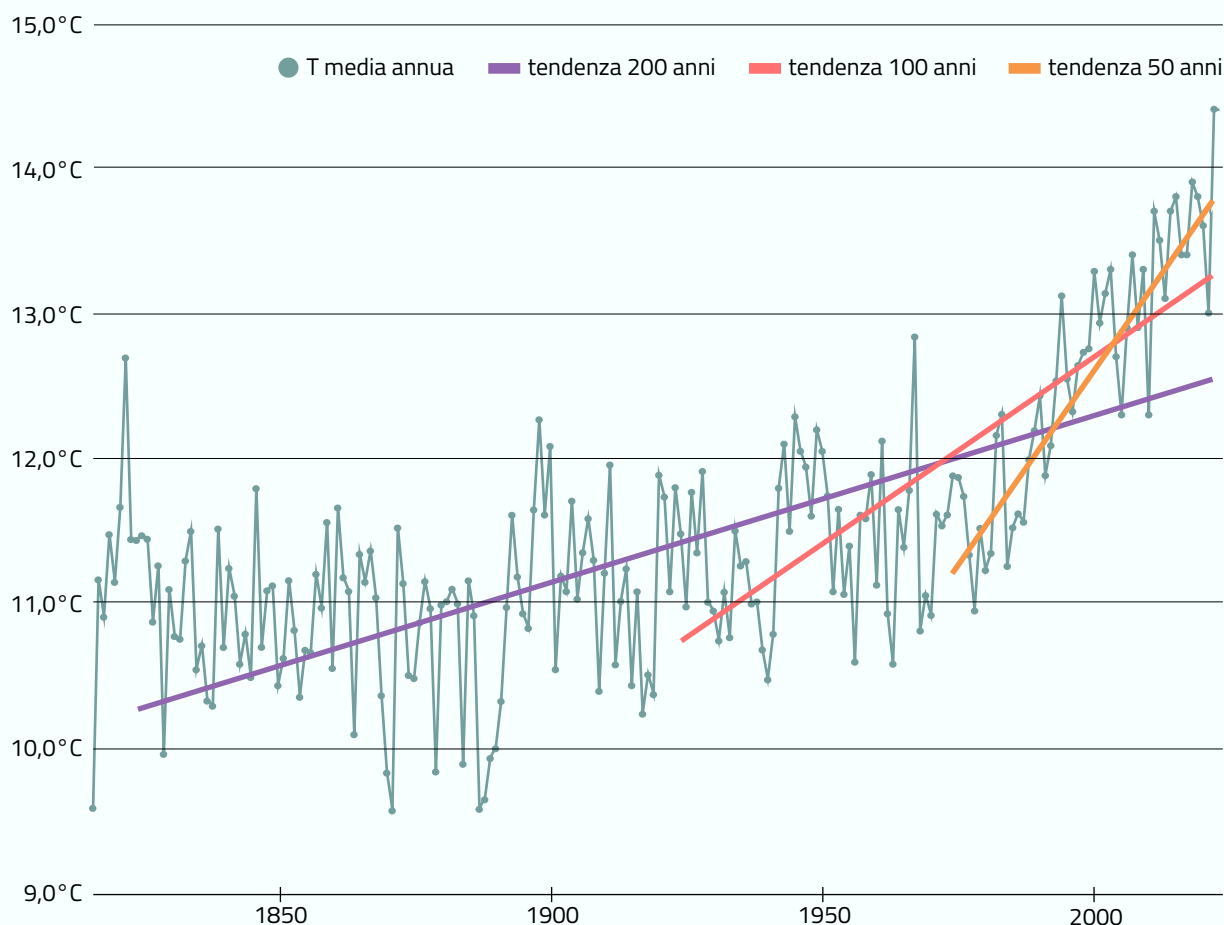
Gli indici ETCCDI sono stati definiti in particolare per caratterizzare i cosiddetti “eventi estremi” (temperature molto elevate o molto basse, ondate di calore e di freddo, precipitazioni intense o assenti per periodi prolungati, ecc.) e le loro variazioni in termini di frequenza di accadimento e di intensità.

Questi eventi causano impatti determinanti sullo stato degli ecosistemi, la produttività del settore agricolo, le attività legate al turismo e il rischio legato ai cosiddetti pericoli naturali (alluvioni e allagamenti, frane, incendi, ecc.).

Due secoli di misure di temperatura a Trento

Un'analisi condotta dall'Università di Trento ha esaminato le temperature a Trento dal 1816 al 2018, raccogliendo osservazioni rilevate presso diversi siti urbani. Tramite un'analisi di omogenizzazione di dati, per rimuovere eventuali discontinuità, si è ottenuta una serie bisecolare rappresentativa dell'evoluzione delle temperature per la città di Trento negli ultimi due secoli. La serie viene oggi aggiornata grazie ai dati della stazione di Trento Laste (Meteotrentino PAT).

Al netto di possibili effetti legati allo sviluppo nel tempo del grado di urbanizzazione che possono aver influenzato parzialmente l'aumento di temperatura osservato a causa dell'effetto dell'isola di calore urbano, i risultati mostrano un riscaldamento evidente, soprattutto negli ultimi 50 anni, e in progressiva accelerazione. La temperatura annua a Trento ha visto infatti un aumento pari a circa 3,0°C (se consideriamo l'anomalia media degli ultimi 5 anni) rispetto all'epoca pre-industriale, il doppio circa dell'aumento registrato a livello medio globale.



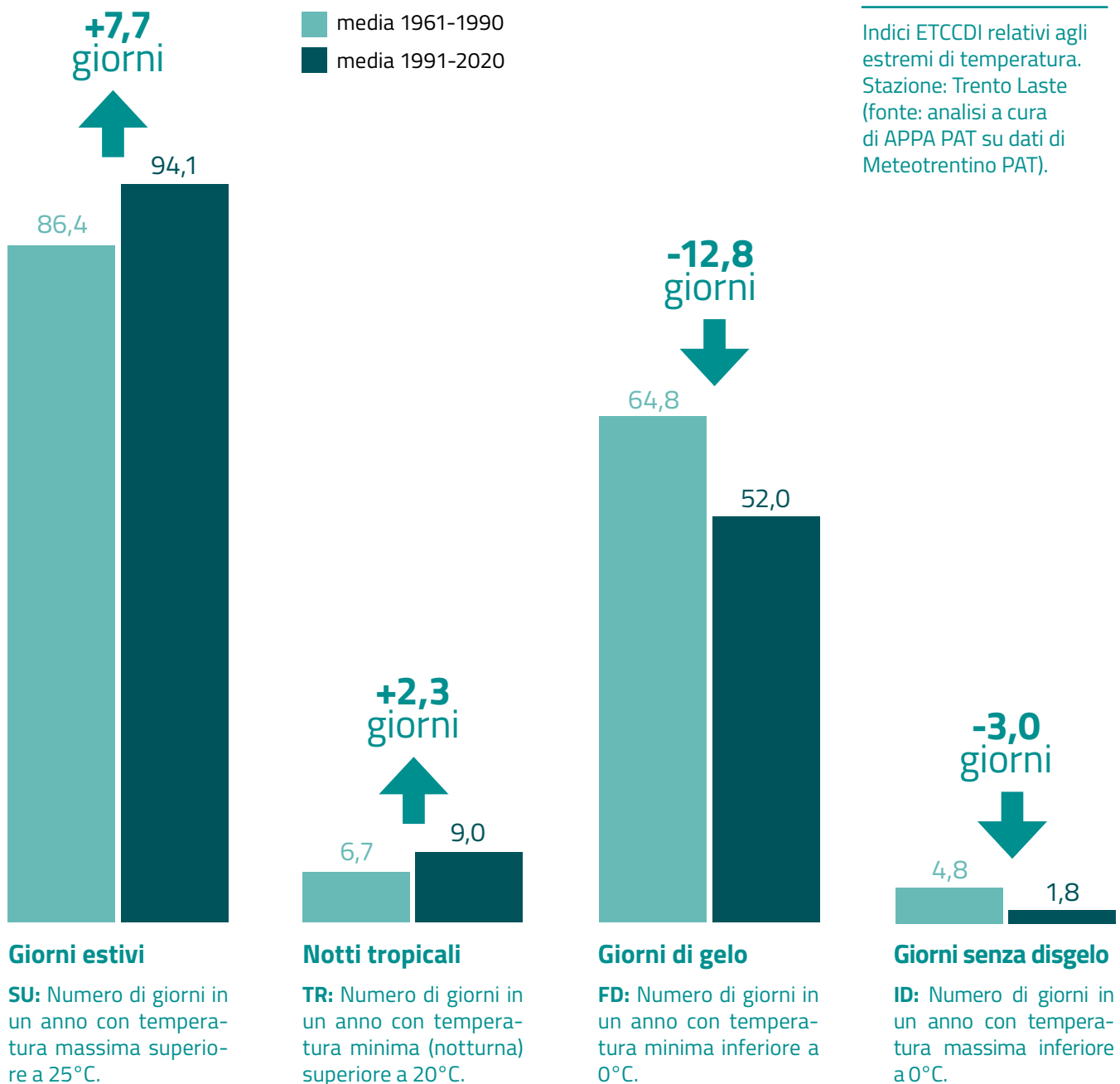
Serie storica della temperatura media annua per la città di Trento nel periodo 1816-2023. In colore sono riportate le tendenze lineari di aumento della temperatura stimate per periodi di riferimento di diversa lunghezza (ultimi 200, 100 e 50 anni), che evidenziano l'accelerazione del riscaldamento in atto (fonte dei dati: DICAM - Università di Trento; Meteotrentino PAT; dati della stazione di Trento Laste utilizzati a partire dal 2003).

Le variazioni degli estremi di temperatura in Trentino

L'analisi degli indici climatici per la temperatura evidenzia nel periodo 1961-2020 un aumento dei valori assoluti e della frequenza di accadimento delle temperature estreme superiori e una diminuzione per quanto riguarda invece le temperature estreme inferiori. Il numero di giorni e notti caldi è in aumento, mentre il numero di giorni e notti fredde è in calo. Osservando ad esempio la stazione di Trento Laste, tra il trentennio

1961-1990 e quello più recente 1991-2020, il numero di giorni estivi è aumentato di 7,7 giorni e quello delle notti tropicali di 2,3, mentre i giorni di gelo sono calati di ben 12,8 giornate e quelli senza disgelo di 3 giornate.

La durata e la frequenza delle ondate di calore è aumentata in maniera chiara, tendenza che trova conferma in più studi scientifici.

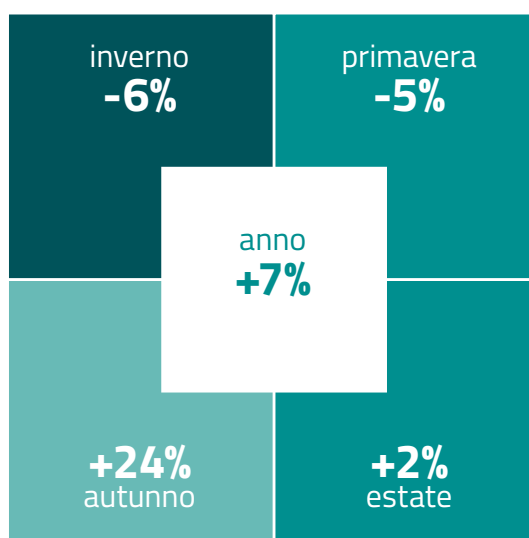


Le variazioni di precipitazione in Trentino

Per quanto concerne gli apporti annuali di precipitazione, si osservano tendenze non particolarmente significative dal punto di vista statistico e molto meno univoche rispetto a quanto osservato per le temperature, con segnali anche parzialmente discordanti tra stazioni diverse. Questa maggior incertezza è probabilmente da ascrivere, almeno in parte, alla notevole variabilità interannuale che caratterizza le precipitazioni in generale, rendendo più complessa l'individuazione di tendenze di lungo periodo di quanto lo sia per le temperature. Inoltre, il Trentino ha una complessa orografia e una peculiare posizione geografica, in un'area di transizione tra la Pianura Padana (a sud) e il versante meridionale della catena delle Alpi (a nord). Questo aggiunge un ulteriore fattore di variabilità spaziale del regime delle precipitazioni sul territorio provinciale.

Per il trentennio più recente 1991-2020 si osserva tuttavia un incremento piuttosto generalizzato delle precipitazioni annuali medie per le stazioni esaminate dallo studio di APPA rispetto alla norma climatica dei tre trentenni precedenti. Tale differenza può essere attribuibile all'influenza dell'anno 2014, risultato molto più piovoso della norma climatica in Trentino, e quindi non indicare una tendenza sistematica di lungo periodo.

Anche se non suffragato dalla stima di tendenze significative dal punto di vista statistico, a livello stagionale si evidenzia un pattern ricorrente per la maggior parte delle stazioni analizzate: un aumento medio delle precipitazioni autunnali (mediamente dell'ordine di circa il 25%) nel trentennio 1991-2020 rispetto al 1961-1990, a discapito di quelle invernali e primaverili (che si riducono del 12-13% circa nello stesso periodo), mentre per l'estate la situazione appare maggiormente incerta e caratterizzata solo da lievi scostamenti di pochi punti percentuali. Questi risultati sembrano confermare variazioni della distribuzione stagionale delle precipitazioni già evidenziate da studi precedenti.



Variazioni della precipitazione cumulata annua e stagionale (media 1991-2020 vs. 1961-1990) - Stazione di Trento Laste (fonte: analisi a cura di APPA PAT su dati di Meteotrentino PAT).

Le variazioni degli estremi di precipitazione in Trentino

Gli indici pluviometrici del set ETCCDI calcolati per le stazioni trentine indicano un aumento dei fenomeni piovosi estremi per l'ultimo trentennio 1991-2020 rispetto ai 3 precedenti, ma non è possibile determinare se si tratti di un'anomalia legata a questo particolare trentennio o se sia una tendenza sistematica e statisticamente significativa di lungo periodo. Gli indici relativi ai periodi di assenza prolungata di precipitazioni

giornaliere rivelano anch'essi un aumento di tale fenomeno, riconducibile alle situazioni di siccità, per molte stazioni.

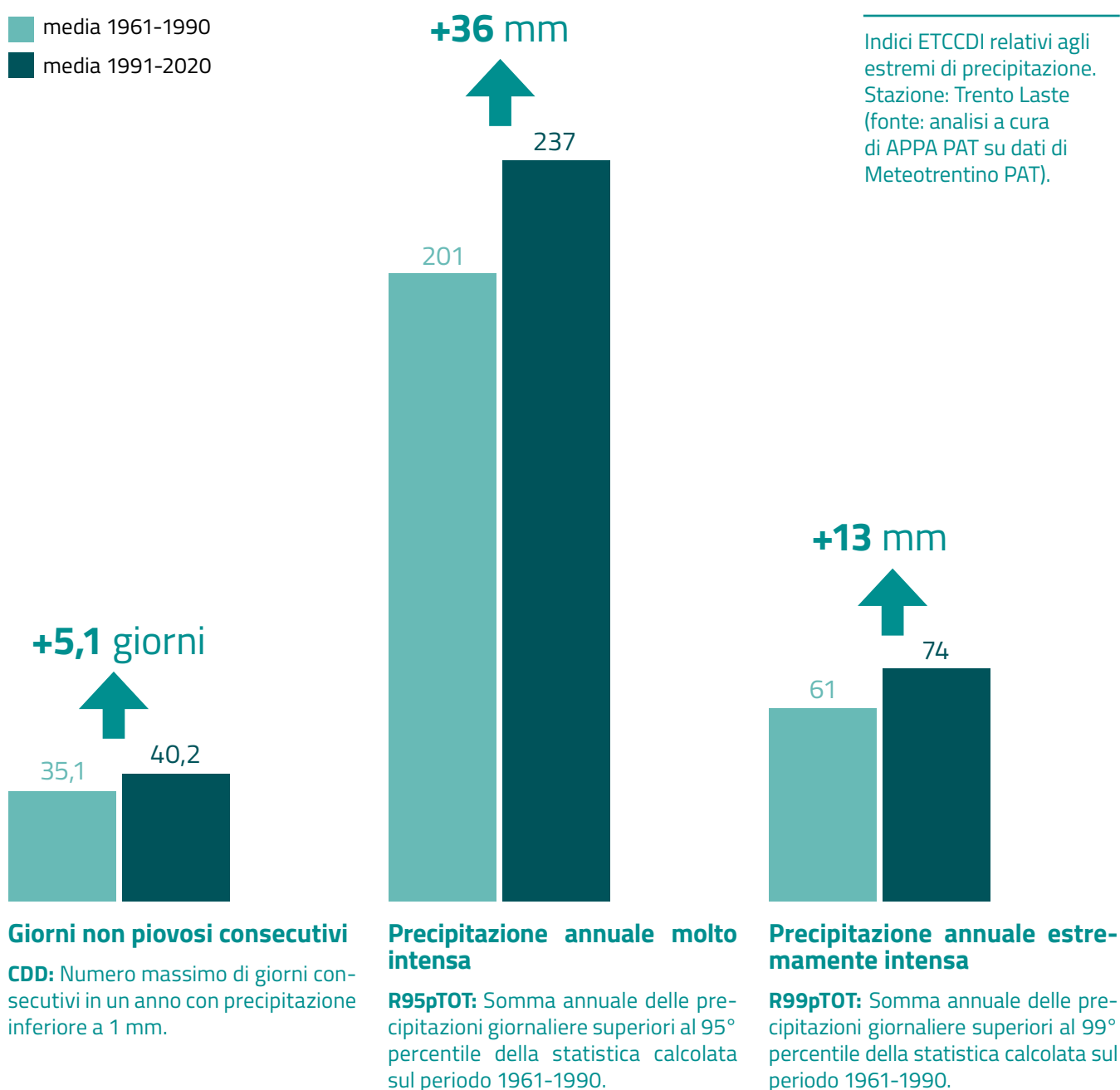
L'analisi effettuata da APPA su dati a scala giornaliera per il periodo 1961-2020 per il territorio trentino non conferma né smentisce in maniera definitiva l'indicazione della letteratura scientifica ad oggi disponibile verso una tendenza di lungo periodo di estremiz-

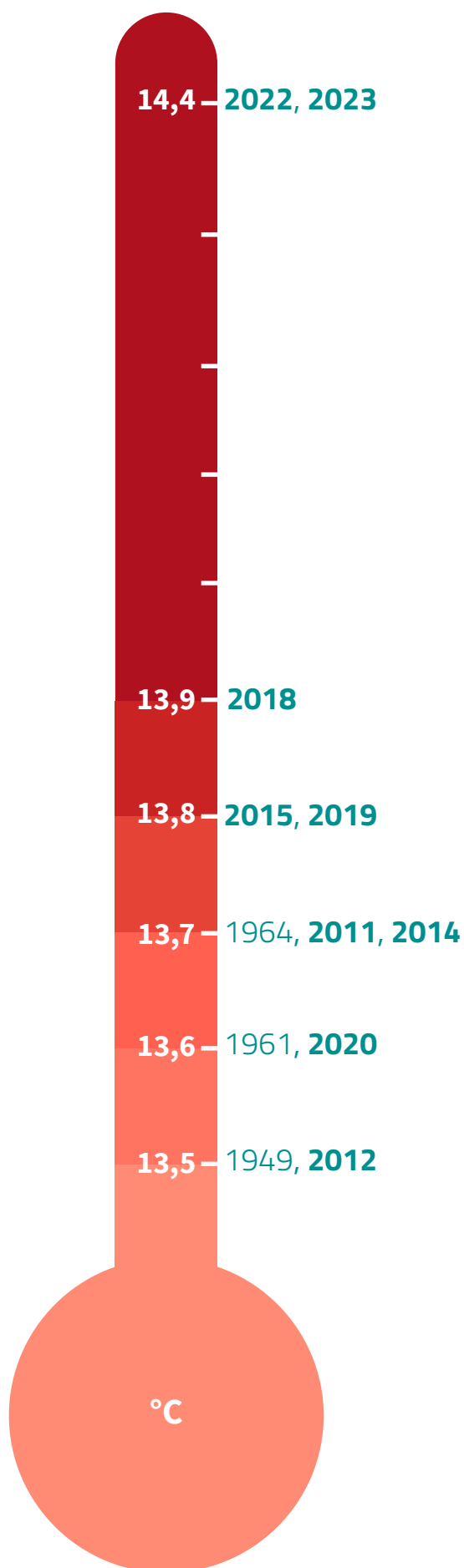
zazione dei fenomeni di precipitazione in termini di maggior intensità e frequenza.

Sul fronte degli eventi di precipitazione sub-giornalieri (di durata pari o inferiore a 1-2 ore), uno studio più recente svolto per il periodo 1991-2020 ha evidenziato tendenze di aumento significative nelle precipitazioni massime annuali. Nella distribuzione di frequenza degli eventi di precipitazione sub-giornalieri si os-

serva la tendenza ad un aumento della proporzione di quelli più intensi a discapito di quelli meno intensi. Lo studio suggerisce che questo cambiamento sia da attribuire alla maggior proporzione di temporali convettivi nella stagione estiva. Questo risultato conferma l'aumento significativo nell'intensità delle precipitazioni estreme di breve durata nei decenni più recenti, già riportato in altri studi.

■ media 1961-1990
■ media 1991-2020





Il caldo anomalo del biennio 2022-2023 in Trentino

Gli anni 2022 e 2023 sono risultati eccezionalmente caldi anche in Trentino. Le temperature registrate sono state superiori alla media storica e in molte località sono risultati gli anni più caldi dall'inizio delle misurazioni. A Trento entrambe le annate hanno fatto registrare 14,4°C di temperatura media, un valore di ben 3,0°C sopra la temperatura media annuale caratteristica del periodo pre-industriale e di ben 0,5°C superiore rispetto al precedente record del 2018.

Gli anni più caldi a Trento dal 1921

Nove degli anni più caldi appartengono al recente periodo 2011-2023

Temperatura media annuale a Trento Laste (fonte dei dati: Meteotrentino PAT).



Lo svuotamento dell'invaso artificiale di Malga Bissina (in Val Daone) durante la situazione di siccità del luglio 2022 (foto: PAT).

La siccità del 2022 in Trentino

Le precipitazioni in Trentino nel 2022 sono state ovunque molto inferiori alla media, pur senza scendere sotto i minimi storici. A Trento Laste, ad esempio, la precipitazione cumulata annuale misurata è stata pari al 76% della media storica, con 42 giorni consecutivi di assenza di precipitazione, dal 16 febbraio al 29 marzo. Condizioni di scarsità di pioggia che si sono protratte fino a marzo 2023, per poi rientrare nella media degli apporti cumulati da inizio anno, grazie ai contributi di pioggia dei mesi di aprile e soprattutto di maggio.

La grave situazione di siccità e scarsità di risorsa idrica che ha colpito il Trentino e tutto il Nord Italia, particolarmente problematica soprattutto durante l'estate 2022, non è stata determinata solo

dalla situazione di scarsità di precipitazioni cadute a partire dall'inverno 2021/22 e perdurata nei primi mesi del 2023. Un ruolo fondamentale è stato giocato dalla combinazione con le temperature eccezionalmente elevate: esse hanno determinato una maggior "perdita" di vapore acqueo dai suoli (per evaporazione) e dalle piante (per traspirazione), nonché maggiori prelievi di acqua per i maggiori fabbisogni idrici, in particolare per l'uso potabile ed irriguo.

Il 2022 ha dato chiara evidenza dei conflitti che, in situazioni di relativa scarsità, si possono instaurare tra gli usi concorrenti della risorsa idrica, anche nel territorio alpino (vedi capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE)."

Emissioni climalteranti

Le emissioni di gas serra a livello provinciale derivano principalmente dai trasporti e dalla combustione sia industriale che non industriale. Le azioni pianificate per la decarbonizzazione mirano a ridurre del 55% le emissioni nel 2030 rispetto ai livelli emissivi stimati del 1990, per raggiungere la neutralità climatica al 2050.

Gas climalteranti

Diversi gas presenti nell'atmosfera agiscono in modo simile alla copertura di una serra: intrappolano il calore del sole e gli impediscono di disperdersi nello spazio. L'effetto serra fa sì che la temperatura della superficie terrestre sia più alta di quanto sarebbe se non ci fossero gas serra nell'atmosfera, permettendo la vita sul pianeta come la conosciamo.

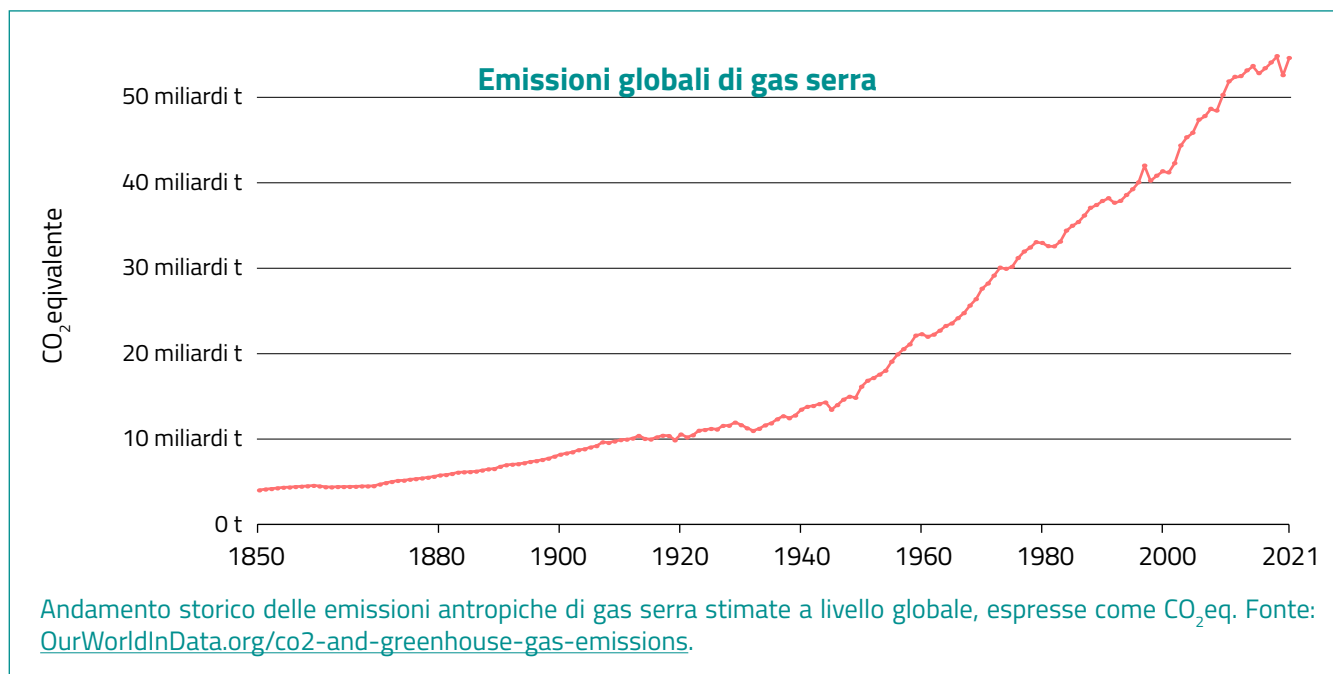
Molti gas serra sono presenti naturalmente nell'atmosfera. Tuttavia, le attività umane hanno avuto un ruolo sempre più importante dall'inizio dell'era industriale e con il progressivo aumento della popolazione mondiale contribuendo all'emissione di gas serra in atmosfera, fino a raggiungere livelli di concentrazione mai osservati negli ultimi milioni di anni, come evidenziato da studi paleoclimatici.

Le emissioni di gas serra prodotte dall'uomo e dalle sue attività vanno infatti ad incrementare le concentrazioni atmosferiche naturali di tali gas, causando un aumento dell'effetto serra, che si traduce in un riscaldamento globale e quindi in un aggravarsi della crisi climatica. Queste emissioni, in particolare del più

importante gas serra, l'anidride carbonica (CO_2), sono dovute principalmente all'utilizzo dei combustibili fossili nei settori di produzione e consumo di energia, nei processi industriali e nei trasporti.

A livello globale si evidenzia, infatti, una stretta correlazione tra l'aumento delle emissioni climalteranti antropiche legate alla combustione di carbone e dei derivati del petrolio e gas dall'inizio dell'era industriale fino ad oggi e l'incremento della concentrazione di CO_2 , che sta avvenendo con una velocità mai osservata prima sulla Terra come si vede per esempio dall'andamento delle concentrazioni misurate presso lo storico osservatorio di Mauna Loa nelle isole Hawaii.

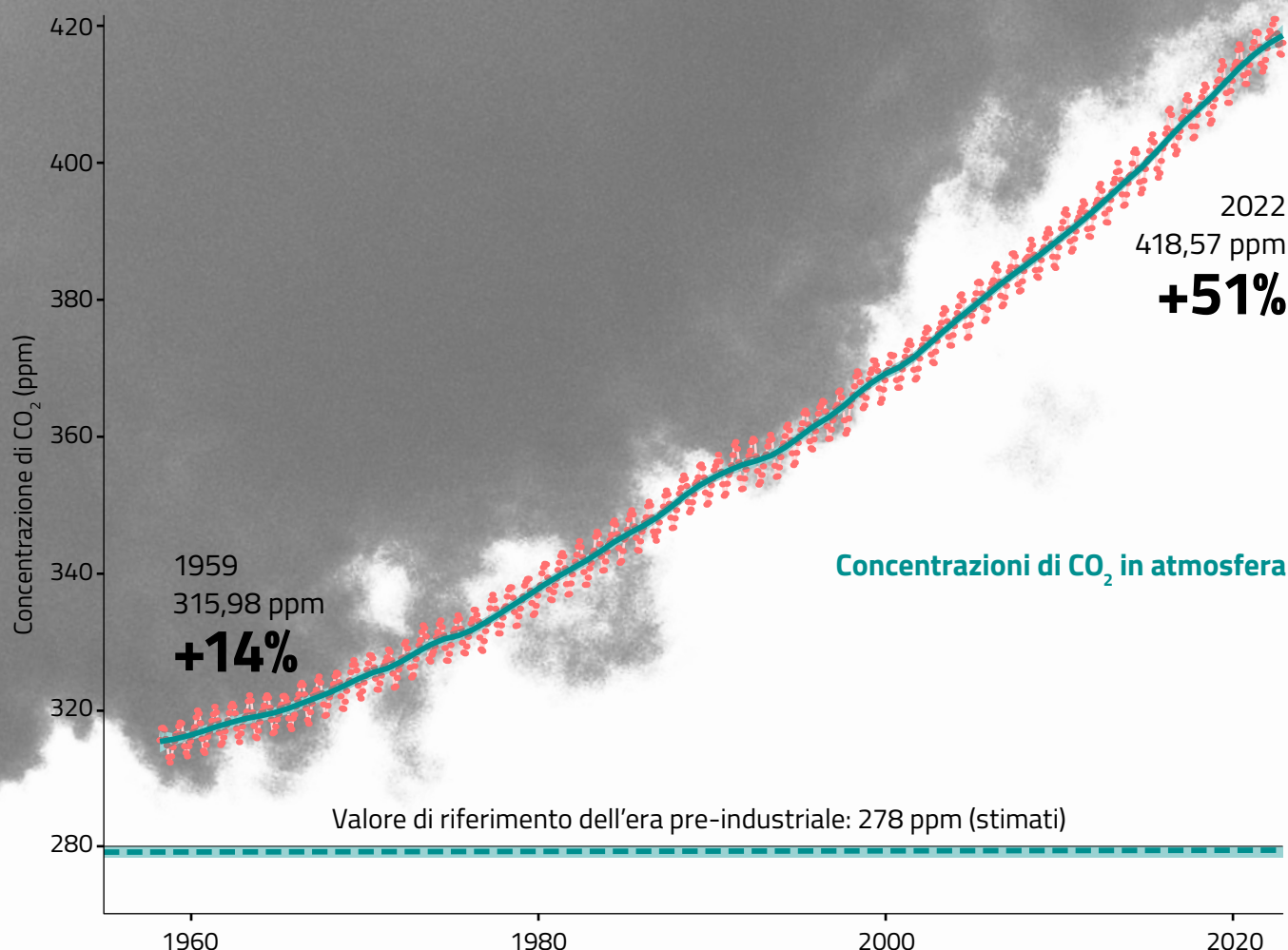
Contribuiscono all'effetto serra anche il metano (CH_4), le cui emissioni a livello globale sono legate principalmente alle attività agricole e di allevamento intensivo, allo smaltimento dei rifiuti e alle perdite dagli impianti nel settore energetico, e il protossido di azoto (N_2O), derivante, sempre a livello globale, principalmente dagli ammendanti utilizzati nelle attività agricole e dal settore energetico, inclusi i trasporti.



Tra i gas climalteranti, oltre ai tre già citati, figurano anche:

- l'es fluoruro di zolfo (SF_6),
- gli idrofluorocarburi (HFC_s)
- i perfluorocarburi (PFC_s)
- il fluoruro di azoto (NF_3).

Il contributo generale all'effetto serra dei gas fluorurati, che derivano essenzialmente da attività industriali e di refrigerazione, è però molto minore rispetto ai tre gas climalteranti principali (CO_2 , CH_4 e N_2O).



Serie storica dell'andamento della concentrazione atmosferica di CO₂ misurata presso l'osservatorio di Mauna Loa (Isola Hawaai, 3400 m di quota). Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

L'impegno internazionale per la riduzione delle emissioni di gas serra

La comunità scientifica, raccolta attorno all'IPCC, ha suggerito da tempo la necessità di ridurre urgentemente le emissioni di gas serra (azioni di mitigazione) per evitare che l'aumento della temperatura superi nei prossimi anni soglie in grado di innescare processi irreversibili sui sistemi naturali come gli oceani e gli ecosistemi. Il rallentamento del riscaldamento potrebbe così consentire di mettere in campo le necessarie misure per limitare gli impatti e i danni dei cambiamenti climatici (azioni di adattamento).

L'Accordo sul Clima di Parigi

L'Accordo è stato siglato nel 2015 in occasione della Conferenza ONU delle Parti a Parigi (COP21) e prevede l'impegno dei governi a ridurre le emissioni di gas climalteranti al fine di mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2°C in più rispetto ai livelli preindustriali e di proseguire gli sforzi per limitarlo a 1,5°C.

Allo stato attuale gli impegni assunti risultano del tutto

insufficienti e proseguono con difficoltà le negoziazioni a livello internazionale per definire azioni di mitigazione decisamente più ambiziose.

L'impegno dell'Unione Europea

La Legge Europea sul Clima (2021) concretizza l'impegno politico del Green Deal europeo inserendo l'obiettivo vincolante di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 e l'obiettivo intermedio di riduzione delle emissioni del 55% al 2030 (rispetto ai livelli del 1990). Il pacchetto "Pronti per il 55%", che comprende proposte di revisione della legislazione vigente e nuove iniziative, rappresenta il piano fondamentale dell'UE per raggiungere gli obiettivi climatici al 2030.

L'impegno dell'Italia

Per quanto riguarda il percorso di decarbonizzazione l'Italia si è dotata di strumenti di pianificazione di breve e lungo periodo: il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) con orizzonte al 2030 e la Strategia nazionale di lungo periodo sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra.

Il GWP - Global Warming Potential. Come si calcola la CO₂ equivalente.

I diversi gas, anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e protossido di azoto (N₂O), non contribuiscono in egual misura all'effetto serra e rimangono nell'atmosfera per periodi diversi. Per poter confrontare l'effetto dei diversi gas sul riscaldamento globale, l'Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC ha definito un indicatore, il Global Warming Potential - GWP che esprime l'effetto del riscaldamento di una determinata quantità di un gas serra, in un periodo definito (per lo più 100 anni) rispetto a quello del CO₂.

I contributi delle emissioni dei diversi gas serra vengono così aggregati tramite il parametro

CO₂equivalente (CO₂eq) che rappresenta una somma delle emissioni dei gas serra pesati secondo il loro potenziale climalterante, in base alla seguente formula:

$$\text{CO}_2\text{eq} = \sum (\text{GWP}_i \cdot E_i)$$

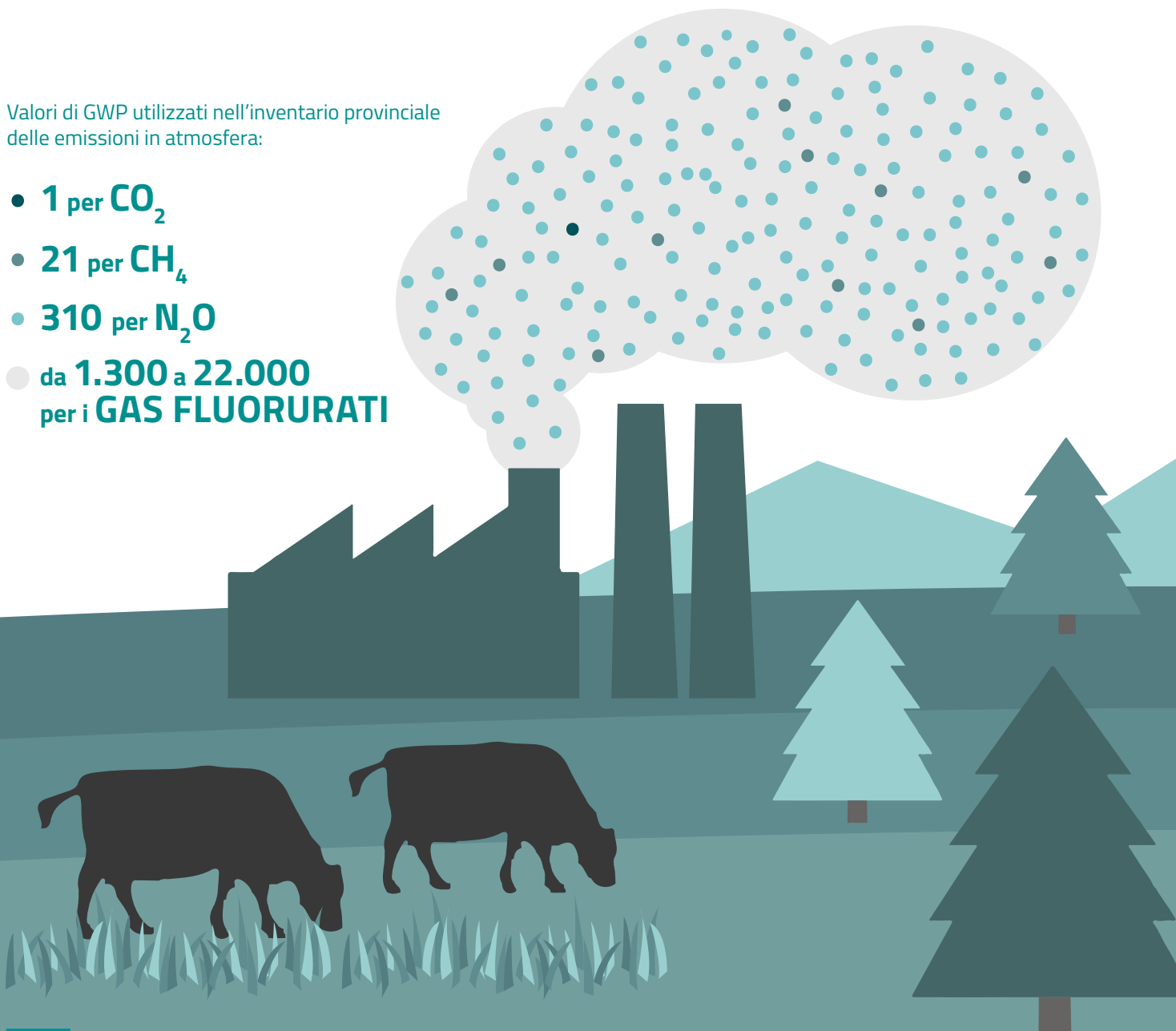
dove:

GWP_i = Global Warming Potential del gas climalterante i
E_i = emissione del gas climalterante i

Il calcolo del GWP delle singole sostanze nei rapporti IPCC succedutisi negli anni ha subito aggiornamenti dovuti sia ad un approfondimento delle conoscenze che all'orizzonte temporale su cui i parametri sono stati stimati in funzione anche della persistenza in atmosfera delle diverse molecole.

Valori di GWP utilizzati nell'inventario provinciale delle emissioni in atmosfera:

- **1** per CO₂
- **21** per CH₄
- **310** per N₂O
- da **1.300** a **22.000** per i **GAS FLUORURATI**



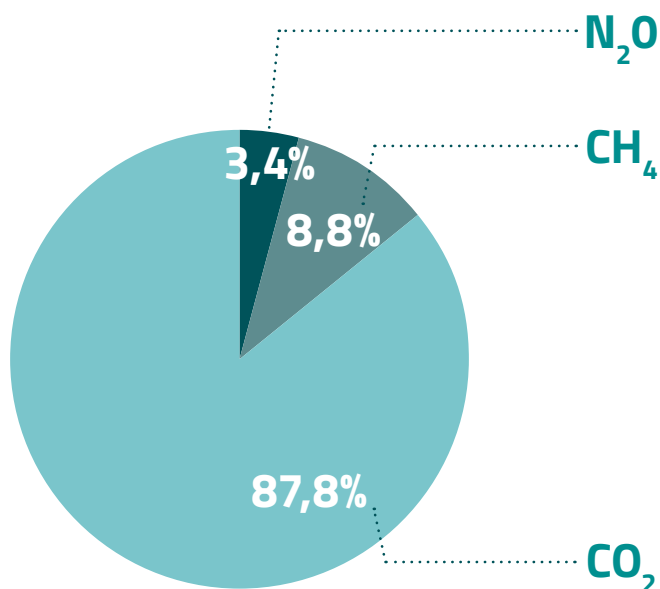
Le emissioni climalteranti a livello provinciale

Le sorgenti emissive a livello provinciale vengono individuate e quantificate attraverso la redazione dell'Inventario provinciale delle emissioni in atmosfera elaborato dall'APPA, sia per gli inquinanti atmosferici che per i gas climalteranti (gas a effetto serra). Questo strumento permette quindi di pianificare azioni di mitigazione (ossia di riduzione delle emissioni climalteranti), in accordo con gli obiettivi stabiliti a livello europeo e nazionale.

Per quanto concerne le emissioni complessive in Trentino, il principale contributo climalterante è dato dalla CO_2 , che pesa per l'87,8% sul totale provinciale delle emissioni di CO_2eq , ma appaiono consistenti anche i contributi di CH_4 (8,8%) e N_2O (3,4%).

In termini di contributo dei diversi combustibili responsabili delle emissioni di CO_2eq , secondo le stime provinciali prevalgono il metano, utilizzato soprattutto per la combustione industriale e non industriale (ad esempio nelle abitazioni), e il gasolio, utilizzato soprattutto per i trasporti su strada.

Distribuzione percentuale delle emissioni di gas serra in provincia di Trento nell'anno 2022, come contributo percentuale alle emissioni complessive di CO_2eq .



L'inventario provinciale delle emissioni in atmosfera

L'inventario, il cui aggiornamento viene curato dall'APPA ogni tre anni circa, è lo strumento che consente di stimare le emissioni annue complessive di inquinanti e gas a effetto serra relative alla Provincia di Trento. La versione più recente disponibile è quella relativa all'anno 2022.

Per il calcolo delle emissioni è stato adottato il sistema INEMAR (INventario EMISSIONi ARia), sviluppato

in origine dalla Regione Lombardia e attualmente adottato in Trentino e in altre Regioni italiane.

L'inventario va considerato come uno strumento dinamico in costante evoluzione, sia dal punto di vista del miglioramento in termini di accuratezza e di livello di dettaglio delle stime fornite, sia dal punto di vista dell'aggiornamento dell'informazione in ingresso, basata sui dati via via reperibili.

Le fonti emissive a livello provinciale

Le emissioni complessive annue di CO₂, CH₄ e N₂O, nonché dell'indicatore aggregato CO₂equivalente, vengono suddivise nei macrosettori (indicativi delle fonti di emissione) riassunti nella tabella di seguito.

MACROSETTORI	CO ₂ (kt)	CH ₄ (t)	N ₂ O (t)	CO ₂ eq (kt)
01 - Produzione energia e trasformazione di combustibili	49,5	82,3	15,5	56,0
02 - Combustione non industriale <i>legata soprattutto ai consumi delle abitazioni civili</i>	697,9	1004,4	57,4	736,8
03 - Combustione nell'industria	1007,7	105,5	25,7	1017,9
04 - Processi Produttivi	82,2	3,4	1,7	82,8
05 - Estrazione e distribuzione di combustibili		2752,7		57,8
06 - Uso di solventi				0,0
07 - Trasporto su strada	1208,9	57,6	41,2	1222,9
08 - Altre sorgenti mobili e macchinari	91,4	1,7	4,8	92,9
09 Trattamento e smaltimento rifiuti	32,2	5568,1	16,2	154,1
10 - Agricoltura <i>che include anche le emissioni da allevamento</i>		5037,8	234,3	178,4
11 - Altre sorgenti		430,1	0,1	9,1

Valori annui delle emissioni di CO₂, CH₄, N₂O e CO₂eq per macrosettore (Dati riferiti al 2022. Fonte: Inventario delle emissioni della Provincia di Trento).

In merito alla distribuzione percentuale delle emissioni climalteranti per fonte emissiva, è possibile evidenziare quale macrosettore contribuisce maggiormente e su quali è quindi prioritario lavorare per ridurle.

- Le emissioni di anidride carbonica (CO₂), stimate pari a 3170 kt per l'anno 2022, sono imputabili per il 38% al trasporto su strada, per il 22% alla combustione non industriale e per il 32% alla combustione industriale.
- Le emissioni di metano (CH₄), stimate pari a 15.044 t per l'anno 2022, sono legate al trattamento e smaltimento dei rifiuti (37% del totale), all'agricoltura

e allevamento (33%), alle attività di estrazione e distribuzione di combustibili (18%).

- Le emissioni di protossido di azoto (N₂O), stimate pari a 397 t per l'anno 2022, sono imputabili per il 59% al settore dell'agricoltura/allevamento (derivano in particolare dalla gestione delle deiezioni animali) e per il 14% alla combustione non industriale.
- L'anidride carbonica equivalente (CO₂eq; emissioni stimate pari a 3.609 kt per l'anno 2022) deriva principalmente dai trasporti su strada (34%) e dalla combustione sia industriale (28%) che non industriale (20%).

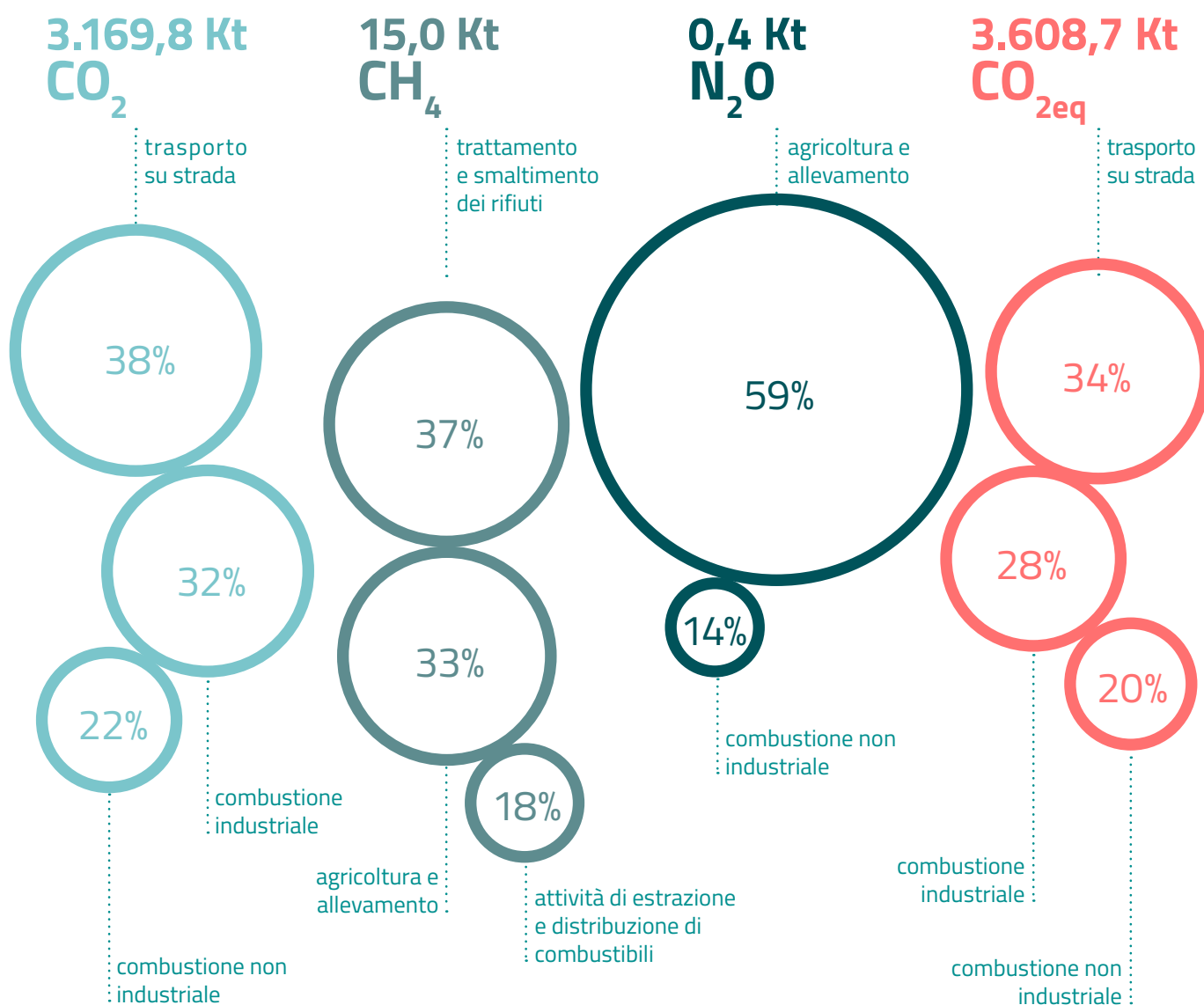
L'inventario delle emissioni stima anche il contributo dato dall'assorbimento del carbonio da parte delle foreste, ovvero la CO₂ assorbita e sequestrata dai serbatoi forestali di carbonio (all'interno di biomassa epigea, biomassa ipogea, necromassa, lettiera e sostanza organica del suolo).

L'anidride carbonica assorbita è espressa nell'inventario con valore negativo e il suo valore annuo stimato nel 2022 è pari a 2296,3 kt, che, se confrontato con il totale annuo emesso a livello provinciale, pari a 3169,8 kt, fornisce una chiara indicazione del rilevante contributo di bilancio emissivo dato dal patrimonio boschivo provinciale.

3.169,8 kt	CO ₂ emessa
873,5 kt	-2.296,3 kt CO ₂ assorbita

Il bilancio tra fonti di emissione e assorbimento di CO₂ a livello provinciale. Fonte: Inventario delle emissioni della Provincia di Trento.

Macrosettori che contribuiscono maggiormente alle emissioni annue di CO₂, CH₄ e N₂O e CO_{2eq}. Dati riferiti al 2022. Fonte: Inventario delle emissioni della Provincia di Trento.



Tendenze e scenari futuri per le emissioni provinciali

L'obiettivo provinciale di mitigazione mira alla decarbonizzazione fino a ridurre del 55% le emissioni di CO₂ nel 2030 rispetto ai livelli emissivi stimati del 1990, in pieno accordo con l'obiettivo climatico europeo del pacchetto normativo "Pronti per il 55%" verso la neutralità climatica (ossia emissioni nette nulle) al 2050.

Per raggiungere questo obiettivo, la Provincia autonoma di Trento ha recentemente approvato il nuovo Piano Energetico Ambientale Provinciale (PEAP) 2021-2030, quale documento di riferimento per la programmazione provinciale degli interventi in materia di energia.

Esso individua le linee strategiche e le azioni prioritarie per il raggiungimento dell'obiettivo di decarbonizzazione dell'intero territorio provinciale. Gli strumenti della programmazione provinciale di settore recepiscono gli indirizzi del PEAP 2021-2030 individuando specifiche azioni settoriali.

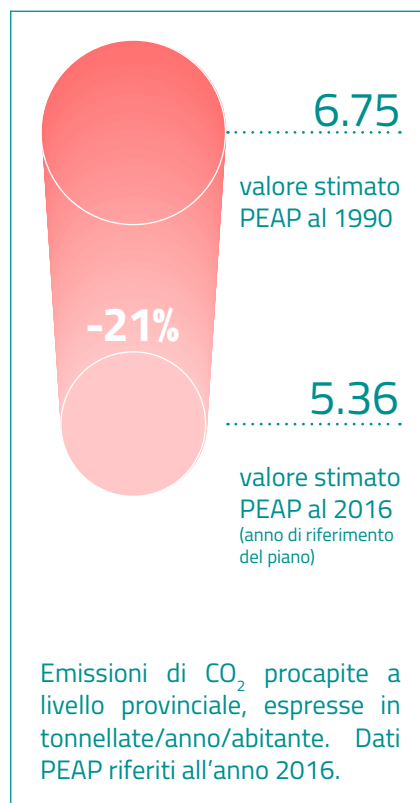
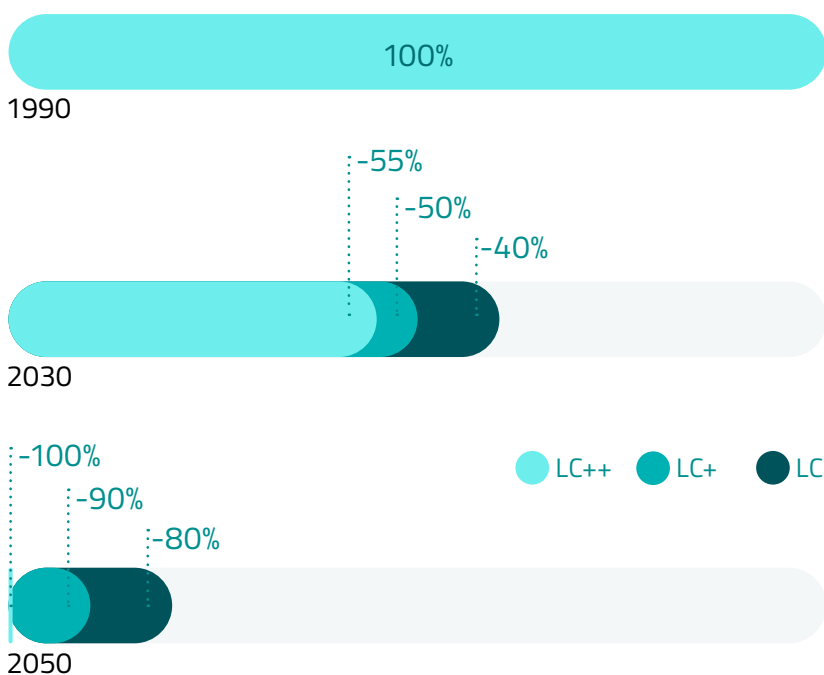
Il PEAP 2021-2030 si pone l'obiettivo generale di ridurre le emissioni dei gas climalteranti del 55% al 2030

rispetto al 1990, superando l'attuale obiettivo indicato dalla legge provinciale n. 19/2013.

Gli scenari di decarbonizzazione elaborati per la redazione del PEAP riflettono tre diverse possibilità di evoluzione delle emissioni provinciali di CO₂ rispetto ai livelli del 1990, con un obiettivo a medio termine al 2030 e uno a lungo termine al 2050:

- scenario Low Carbon (LC), con una riduzione del 40% al 2030 e dell'80% al 2050, come previsto a livello europeo precedentemente all'emendamento della nuova Legge europea sul clima del 2021;
- scenario Low Carbon + (LC+), con una riduzione pari al 50% nel 2030 e al 90% al 2050, in linea con la legislazione provinciale vigente (l.p. n.19/2013);
- scenario Low Carbon ++ (LC++), con una riduzione delle emissioni del 55% al 2030 che si adegua al nuovo obiettivo europeo "Pronti per il 55%" e con l'obiettivo a lungo termine delle emissioni zero e dell'autonomia energetica della Provincia al 2050.

Scenari di decarbonizzazione: riduzione delle emissioni provinciali climalteranti previste al 2030 e 2050 rispetto al 1990



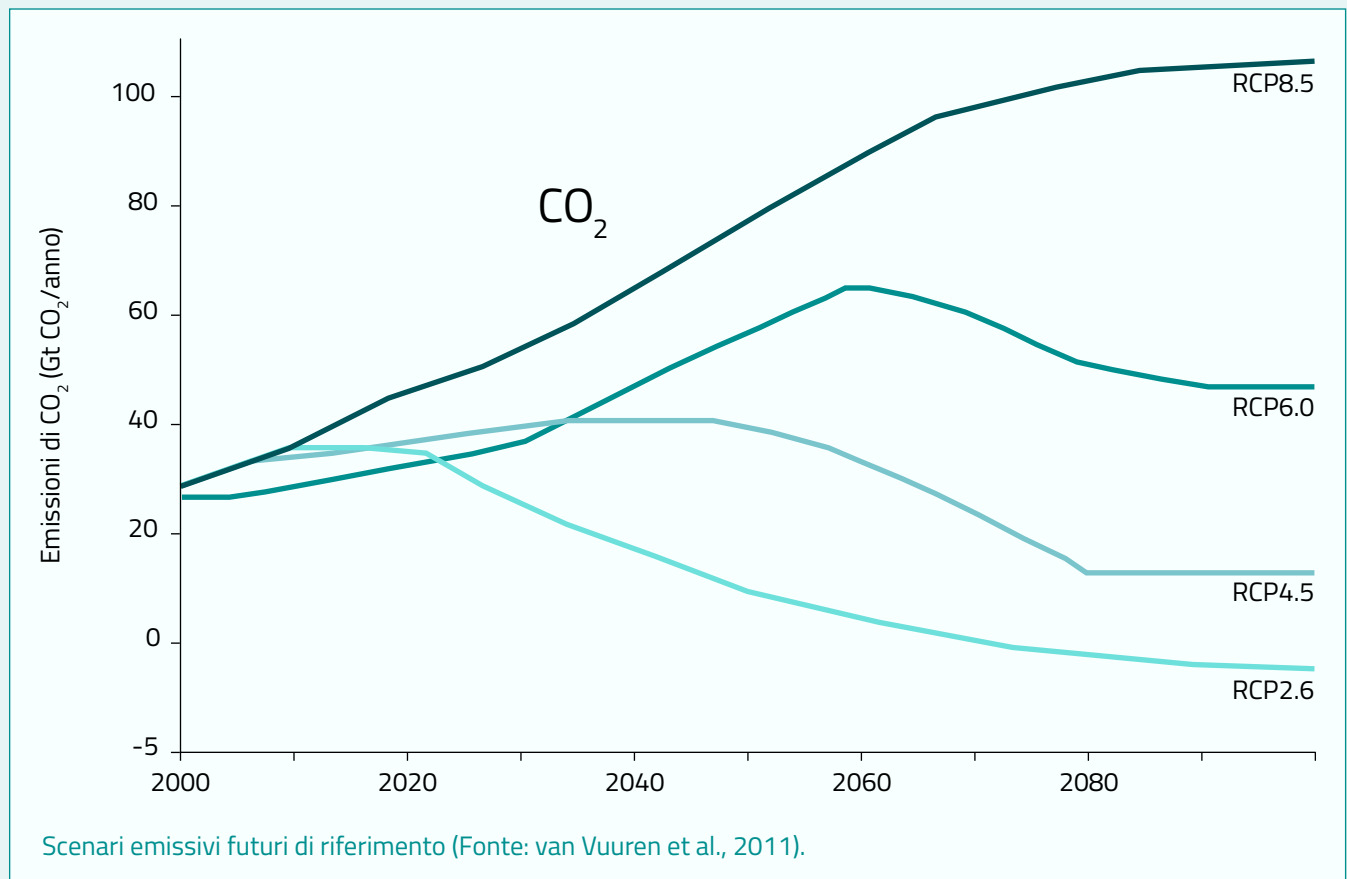
Gli scenari futuri delle emissioni climalteranti

La stima delle emissioni storiche globali (si veda la prima figura del capitolo) permette di conoscere le variazioni delle emissioni di CO₂ e altri gas serra negli anni passati e di capire a che punto ci troviamo.

In merito all'evoluzione futura delle emissioni climalteranti possiamo stimare possibili scenari emissivi globali di riferimento, al variare delle politiche di mitigazione che sono e saranno messe in atto o meno dai diversi Paesi. In particolare, l'IPCC e la comunità scientifica internazionale hanno elaborato negli ultimi anni alcuni scenari emissivi rappresentativi (detti "Percorsi Rappresentativi di Concentrazione", abbreviato in RCP) che si estendono fino al 2100 e corrispondono a differenti

livelli di attuazione delle politiche di mitigazione e, quindi, a differenti livelli di riscaldamento globale:

- RCP2.6 - scenario di mitigazione aggressiva, con immediata e drastica riduzione delle emissioni che si annullano nel lungo periodo.
- RCP4.5 - scenario di mitigazione intermedia inferiore, dove le emissioni di CO₂ hanno un picco intorno a metà secolo, per poi scendere e stabilizzarsi.
- RCP6.0 - scenario di mitigazione intermedia superiore, dove le emissioni di CO₂ hanno un picco oltre metà secolo, per poi scendere e stabilizzarsi.
- RCP8.5 - scenario del tipo "business as usual", senza alcuna mitigazione, con crescita delle emissioni che continua fino al 2100.



Scenari climatici futuri

I modelli climatici prevedono per il Trentino un ulteriore aumento delle temperature medie almeno fino a metà secolo, compreso tra circa 1 e 2°C in più rispetto alla media del periodo 1981-2010. Le proiezioni sono maggiormente incerte per gli apporti annuali di precipitazione, mentre è confermato un segnale di incremento delle precipitazioni più intense.

Le proiezioni e i modelli climatici

In climatologia le previsioni del clima futuro, anche dette proiezioni climatiche, si effettuano grazie ai modelli climatici, complessi modelli fisico-matematici che descrivono il funzionamento del sistema climatico terrestre. Essi simulano in maniera quantitativa (seppur approssimata dal punto di vista numerico), grazie a potenti macchine di calcolo, le relazioni fisico-matematiche che regolano le interazioni tra le componenti climatiche fondamentali: l'atmosfera, gli oceani, la criosfera, la superficie terrestre e la biosfera.

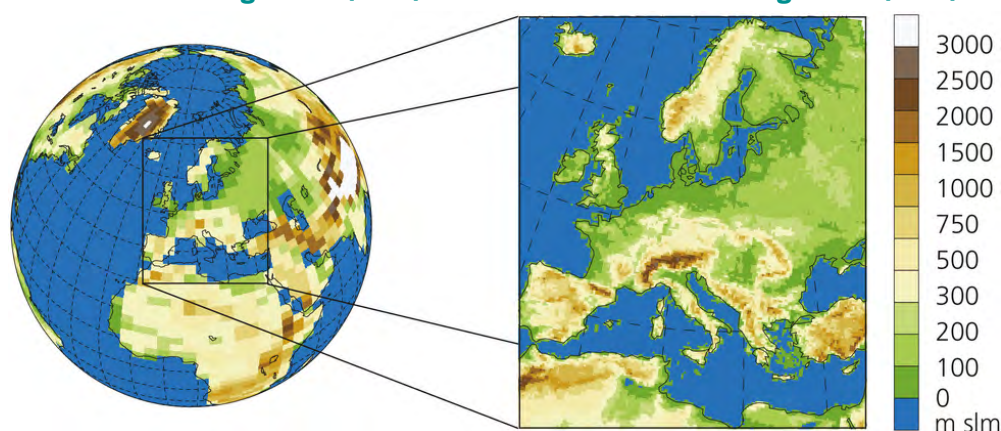
È importante sottolineare che le proiezioni climatiche non sono previsioni precise del clima che si realizzerà in futuro, quanto piuttosto stime delle possibili evoluzioni climatiche basate su diversi scenari emissivi considerati plausibili.

I modelli climatici globali sono utilizzati per simulare il comportamento dell'intero sistema climatico terrestre su scala globale, mentre i modelli climatici regionali si concentrano su aree geografiche più ristrette, con una risoluzione temporale e spaziale più elevata rispetto ai modelli globali, consentendo una rappresentazione più accurata delle caratteristiche climatiche di una determinata regione. Integrando questi due fondamentali strumenti modellistici, gli scienziati ottengono una comprensione più completa dei cambiamenti climatici passati e futuri a diverse scale, riuscendo a fornire indicazioni mirate per specifiche aree geografiche.

Gli scenari emissivi di riferimento (andamenti futuri delle emissioni climalteranti globali), noti come "Percorsi Rappresentativi di Concentrazione" (RCP) e riconosciuti dalla comunità scientifica internazionale, sono descritti nel capitolo EMISSIONI CLIMALTERANTI.

Modello climatico globale (GCM)

Modello climatico regionale (RCM)



MODELLI CLIMATICI GLOBALI (GCM)		MODELLI CLIMATICI REGIONALI (RCM)	
SCALA SPAZIALE	griglia spaziale con risoluzione dell'ordine di 50-150 km	SCALA SPAZIALE	griglia spaziale con risoluzione dell'ordine di 5-50 km
SCALA TEMPORALE	risoluzione temporale dalla scala tri-oraria alla scala giornaliera	SCALA TEMPORALE	risoluzione temporale dalla scala oraria alla scala giornaliera
	periodo di simulazione: dell'ordine dei secoli ai millenni		periodo di simulazione: dell'ordine dei decenni ai secoli

Attualmente, grazie al rapido sviluppo della capacità e della velocità di calcolo dei computer, le risoluzioni spaziali e temporali raggiungibili grazie alle simulazioni effettuate con modelli climatici sia globali che regionali aumentano sempre più, consentendo di spingersi a risoluzioni spaziali finali dell'ordine di 2 km circa.

Le proiezioni climatiche globali

Il 6° Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), la più aggiornata e completa rassegna scientifica sui cambiamenti climatici, delinea le possibili variazioni climatiche future a livello globale in base ai più recenti modelli a scala globale e ai nuovi scenari emissivi.

Per quanto riguarda la temperatura media globale della superficie terrestre, ci si attende che essa continui ad aumentare almeno fino al 2050 per tutti gli scenari, portando al superamento delle soglie di riscaldamento medio previste dall'Accordo di Parigi, pari a 1,5°C e 2°C in più rispetto al periodo pre-industriale, durante il XXI secolo, a meno di profonde riduzioni delle emissioni climalteranti nei prossimi decenni.

In particolare, la soglia dei 2°C sarà superata a metà secolo sia negli scenari a più alte emissioni climalteranti che nello scenario intermedio, mentre è improbabile che ciò accada negli scenari caratterizzati da minori emissioni e maggiori sforzi di mitigazione. Il riscaldamento globale oltre la soglia di 1,5°C sarà anch'esso superato negli scenari ad emissioni alte e intermedie, con molta probabilità già nel breve termine (2021-2040). Negli scenari a emissioni più ridotte anche questa soglia non verrebbe invece superata.

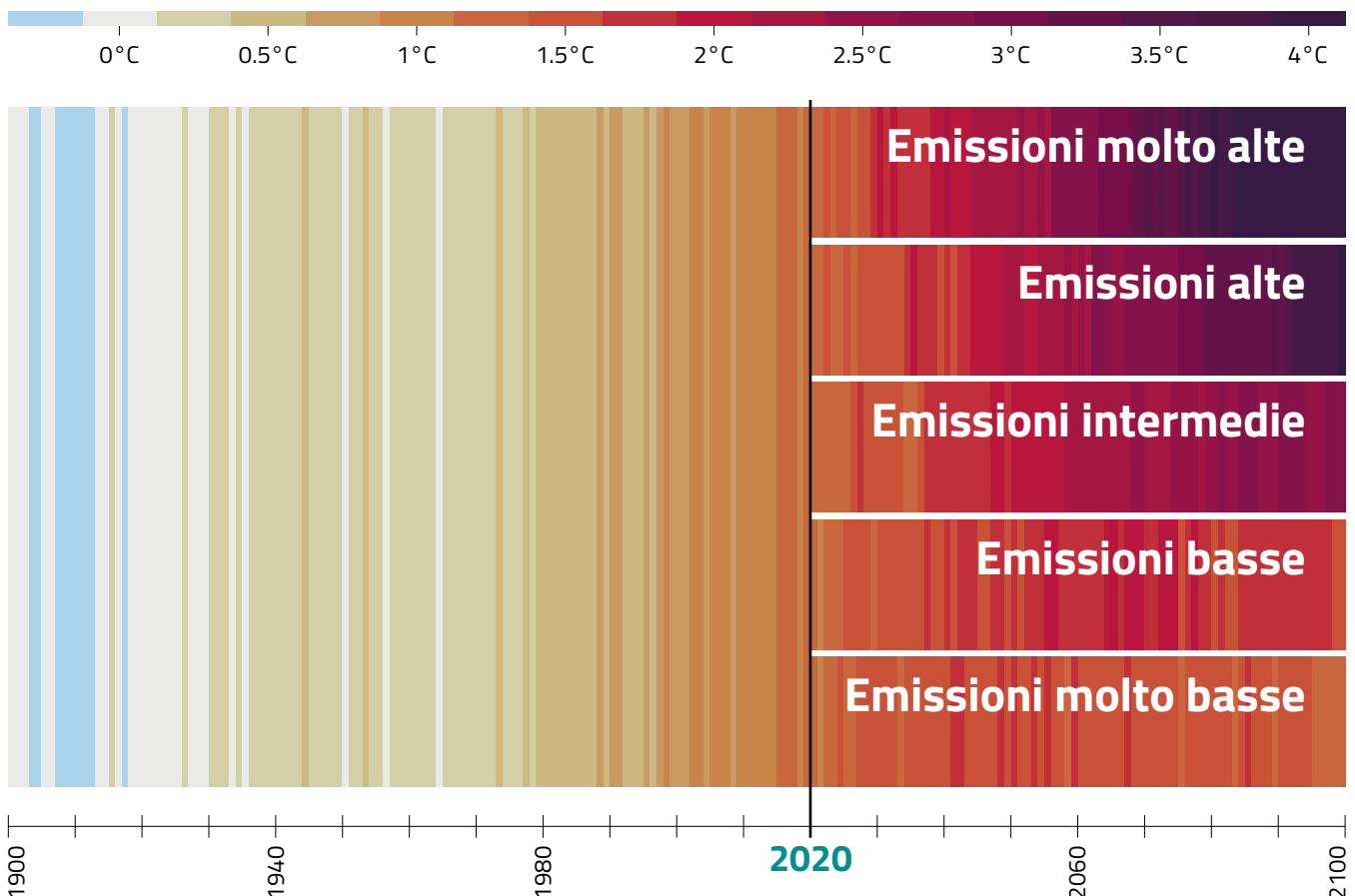
L'incertezza delle proiezioni climatiche

L'incertezza dei modelli climatici e dei loro risultati si origina da diversi fattori:

- scenari emissivi adottati
- limiti dei modelli climatici (approssimazione fisica e numerica, parametri e risoluzione spazio-temporale)
- variabilità naturale del sistema climatico terrestre.

Nonostante i limiti noti, l'affidabilità dei modelli climatici è testimoniata dall'accuratezza mostrata nel riprodurre il clima del passato. Essi costituiscono gli strumenti principali a disposizione degli scienziati per fare previsioni sul clima futuro.

Aumento delle anomalie di temperatura media globale osservate (rispetto alla media del periodo pre-industriale 1850-1900) e livelli di riscaldamento previsti per i possibili scenari futuri (fonte: IPCC 2021).



Le soglie di riscaldamento dell'Accordo di Parigi

Le soglie di riscaldamento dell'Accordo di Parigi rappresentano gli obiettivi globali di mitigazione e di limitazione dell'aumento medio della temperatura globale a lungo termine, un risultato ottenuto attraverso un percorso negoziale condiviso a livello internazionale nell'ambito della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici e conclusosi in occasione della Conferenza delle Parti di Parigi del 2015.

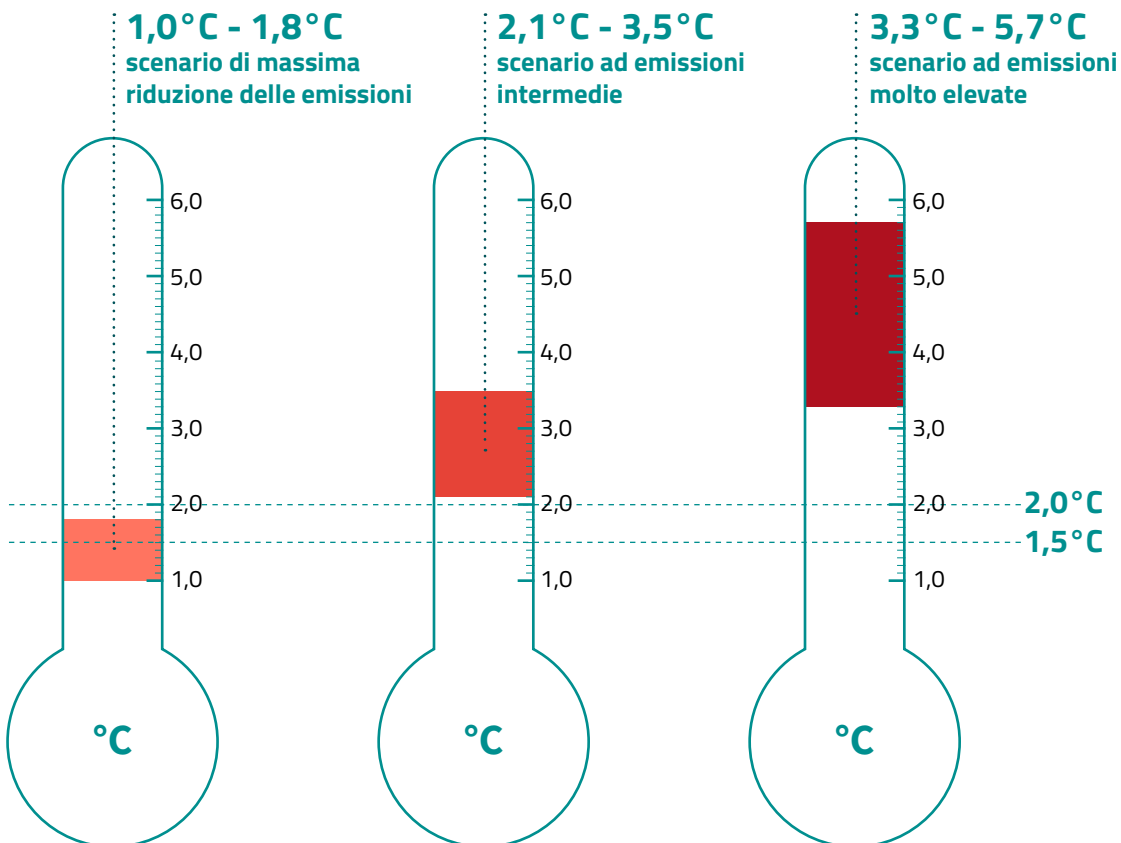
L'Accordo stabilisce di limitare l'aumento della temperatura media globale a fine del XXI secolo ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali, proseguendo gli sforzi per limitarlo a 1,5°C, al fine di ridurre i rischi legati ai cambiamenti climatici, preservando gli ecosistemi e le comunità umane da impatti difficilmente gestibili.

Come conseguenza diretta dell'aumento del riscaldamento globale, la frequenza e l'intensità degli estremi di temperatura e precipitazione, ma anche fenomeni come il degrado della criosfera e l'innalzamento del livello degli oceani, aumenteranno e si amplificheranno.

A scala globale, si prevede che gli eventi estremi di precipitazione giornaliera si intensificheranno di circa il 7% per ogni ulteriore grado centigrado di riscaldamento medio. Le precipitazioni medie annue complessive aumenteranno a scala globale, ma la modalità nella quale tali variazioni avverranno nelle diverse regioni della Terra dipenderà strettamente dai cambiamenti nella circolazione atmosferica a scala globale e regionale.



Celebrazione dell'adozione del testo dell'Accordo di Parigi, COP 21, 13 dicembre 2015 (fonte: UNFCCC secretariat digital archives).



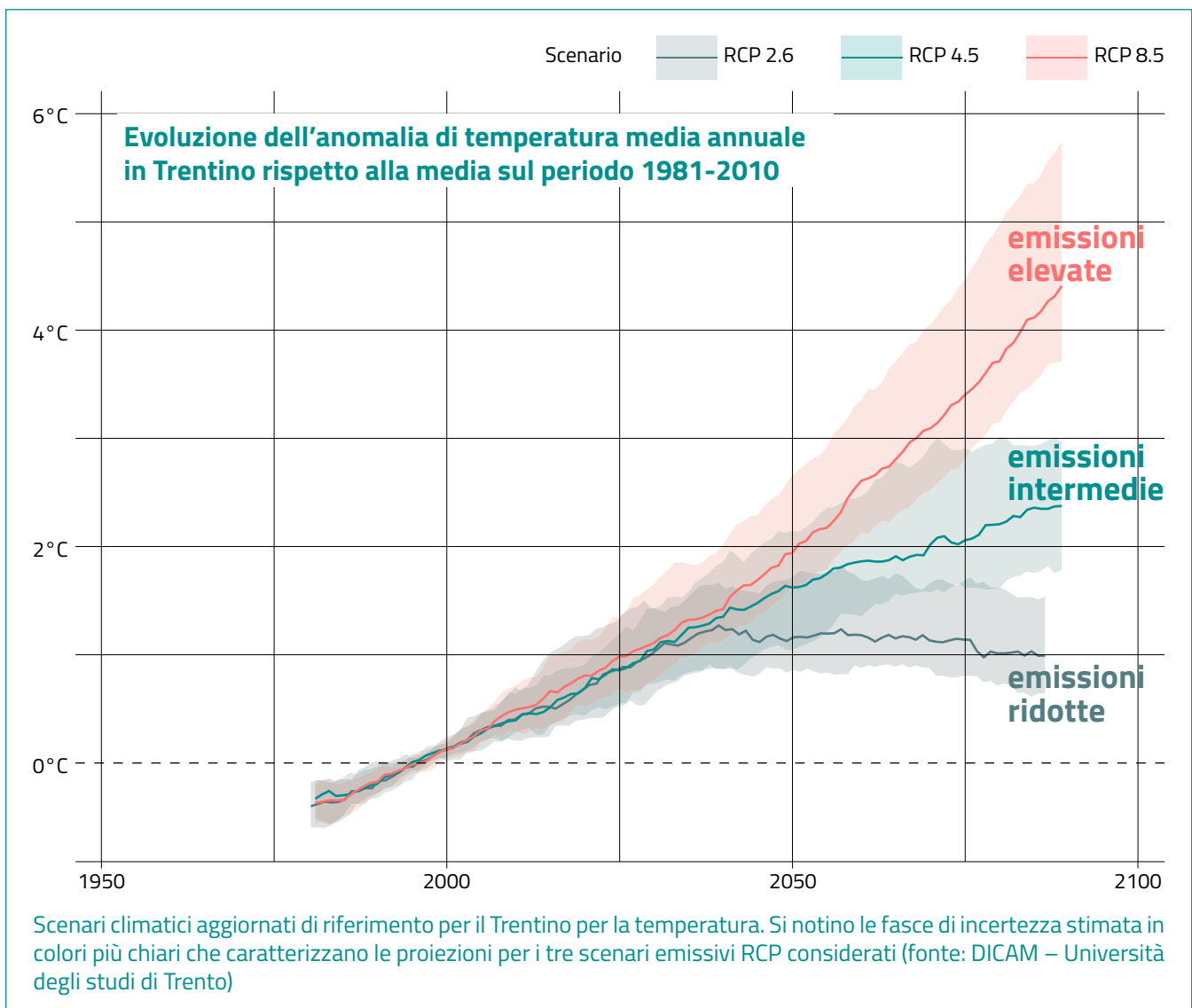
Aumenti di temperatura media globale attesi a fine secolo (2081-2100) rispetto alla media del periodo pre-industriale (1850-1900) per tre diversi scenari futuri. Sono indicate le soglie previste dall'Accordo sul clima di Parigi (fonte: IPCC, 6° Rapporto di valutazione).

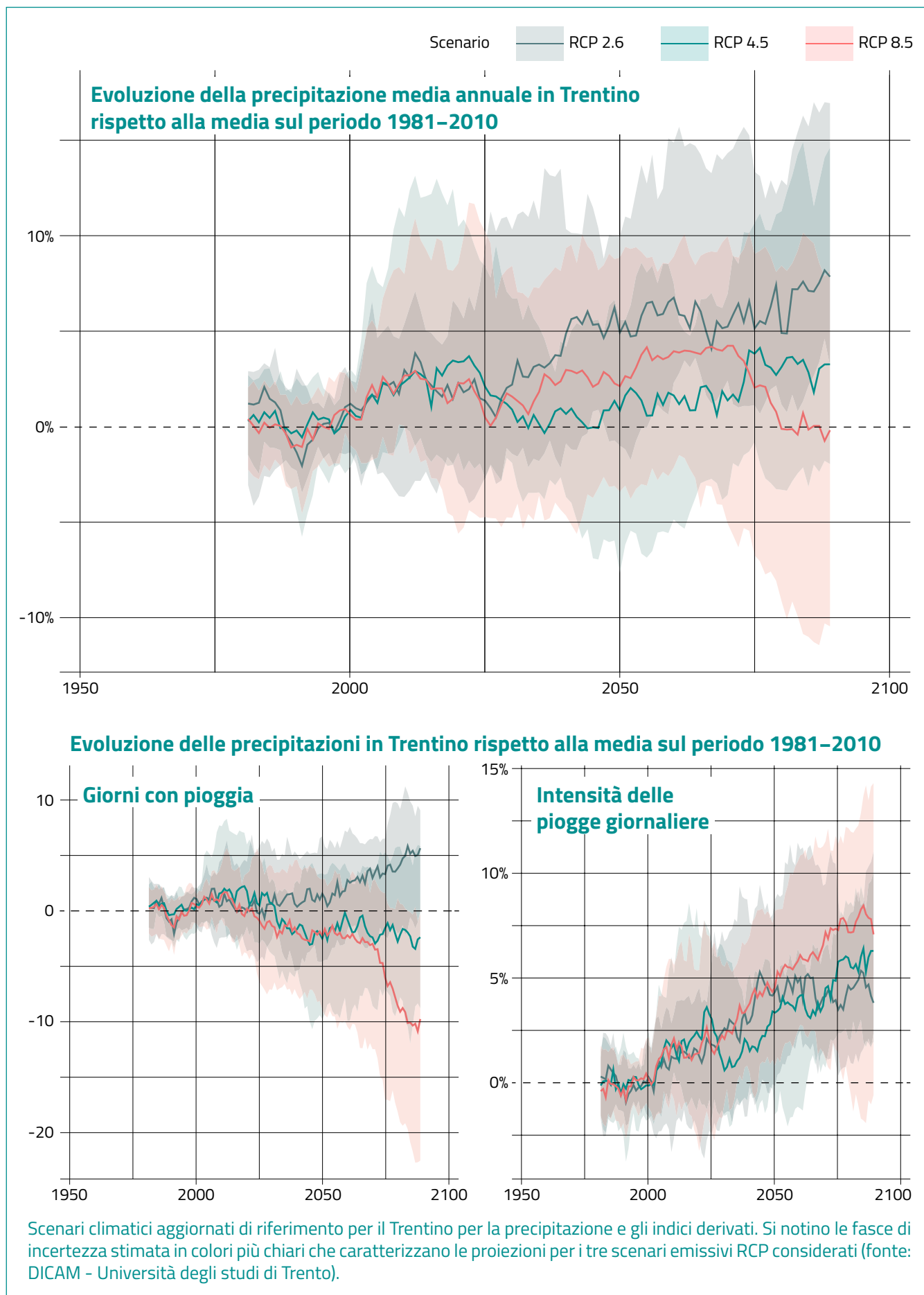
Le proiezioni climatiche per il Trentino

Nell'ambito delle attività di implementazione del programma di lavoro "Trentino Clima 2021-2023" verso la futura Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica (DICAM) dell'Università di Trento ha sviluppato scenari climatici di riferimento per il territorio provinciale, a partire da un *ensemble* di simulazioni a scala europea fornite dal consorzio EURO-CORDEX.

I risultati indicano per il territorio provinciale temperature medie annuali in ulteriore aumento almeno fino al 2050, con un incremento medio atteso rispetto al periodo 1981-2010 pari a circa 1°C al 2030 in ogni scenario emissivo considerato e una variazione complessiva al 2050 compresa tra poco più di 1°C e a circa

2°C a seconda dell'evoluzione delle emissioni climateranti. Fino a metà secolo le tendenze di riscaldamento attese risultano pari a circa 0,03-0,04°C all'anno per gli scenari emissivi RCP4.5 e RCP8.5 (emissioni intermedie ed elevate). Le proiezioni di temperatura divergono in maniera più ampia verso la fine del secolo, con un riscaldamento complessivo stimato che potrà variare tra circa 1°C (RCP2.6), 2.5°C (RCP4.5) e 4.5°C (RCP8.5) rispetto alla media 1981-2010. Per quanto concerne gli andamenti stagionali, le tendenze al riscaldamento appaiono caratterizzate in futuro da maggiore intensità in inverno e in estate. Inoltre, è atteso in generale un ulteriore aumento della frequenza e dell'intensità delle temperature estreme e delle ondate di calore estive.





Per la precipitazione totale annua non si evidenziano invece tendenze analogamente chiare, soprattutto a causa dell'ampia fascia di incertezza che caratterizza i risultati per tutti gli scenari emissivi considerati. L'intensità media delle precipitazioni giornaliere, prevista in probabile aumento (di circa il 5% al 2050 rispetto alla media del periodo di riferimento 1981-2010), e il numero di giorni di pioggia, in lieve diminuzione per due degli scenari emissivi considerati, suggeriscono un aumento futuro degli eventi di precipitazione intensa (pur con una significativa incertezza).

La variazione del regime stagionale delle precipitazioni è ancora incerta. Tuttavia, alcuni studi disponibili sembrano indicare una possibile tendenza alla diminuzione delle precipitazioni più marcata in estate e un possibile incremento negli apporti invernali.

Gli ensemble di modelli climatici

Per tenere in considerazione l'incertezza delle proiezioni climatiche l'approccio attuale non si limita a considerare le stime fornite dei singoli modelli: si adotta invece un cosiddetto approccio di *ensemble*, che consiste nel considerare congiuntamente più simulazioni con configurazioni comparabili ma ottenute grazie a modelli diversi. Il valore medio delle previsioni degli *ensemble* di modelli climatici è quindi utilizzato come la miglior stima disponibile del clima futuro, mentre l'intervallo di variabilità dei risultati rappresenta l'incertezza delle stime stesse.

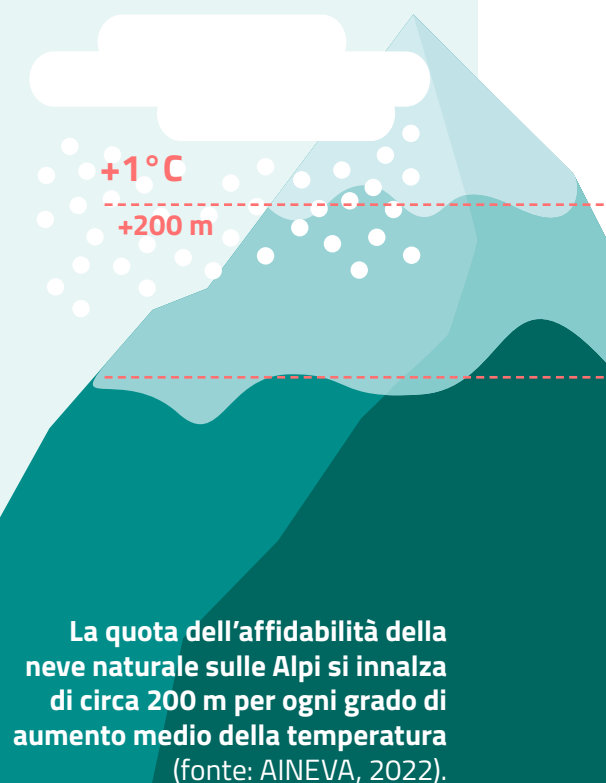
I modelli del consorzio EURO-CORDEX

Il consorzio EURO-CORDEX ("Coordinated Regional Downscaling Experiment") riunisce istituzioni scientifiche e ricercatori con l'obiettivo di sviluppare e distribuire in maniera coordinata modelli climatici regionali ad alta risoluzione per l'Europa. Ad oggi le simulazioni climatiche di EURO-CORDEX, con risoluzione spaziale di circa 12 km, sono riconosciute come lo stato dell'arte consolidato a scala europea.

Il futuro della neve nelle Alpi

Il progetto "CliRSnow: Snow in the European Alps - past, present and future" costituisce il riferimento più aggiornato per le proiezioni delle precipitazioni nevose future a scala alpina.

Per le Alpi italiane, CliRSnow indica diminuzioni significative del numero di giorni con neve presente al suolo sia per lo scenario a basse emissioni (RCP2.6) che per quello ad alte emissioni (RCP8.5). Alle quote comprese tra 1250 e 1750 m s.l.m., a fronte di un numero medio di giorni con neve presente al suolo pari a circa 76, le riduzioni attese saranno pari a circa 20-27 giorni in meno a metà secolo (periodo 2041-2070) rispetto al periodo di riferimento (2001-2020). Alle quote superiori (1750-2250 m s.l.m.), invece, si potrà arrivare ad una riduzione fino a 31-48 giorni con neve al suolo in meno rispetto ad una media per il periodo di riferimento di circa 166 giorni. In termini percentuali l'accorciamento della durata della copertura nevosa al suolo progredirà quindi in maniera più marcata alle quote più basse. L'innalzamento della quota limite delle nevicate e la fusione anticipata della neve naturale nella stagione primaverile varieranno in funzione dell'evoluzione futura delle emissioni climalteranti globali, pur con differenze dovute alle caratteristiche meteo-climatiche locali. (Fonte: clirsnow.netlify.app)





**Impatti dei
cambiamenti
climatici.
Ambiente e
natura**

Neve, ghiacciai e permafrost

- L'aumento delle temperature sta causando anche in Trentino una riduzione diffusa e sempre più rapida delle componenti della criosfera, che comprende la neve, i ghiacciai e il suolo permanentemente ghiacciato (permafrost).



Neve

Si osserva una forte riduzione della nevosità, maggiormente evidente alle quote minori, accompagnata da una fusione anticipata della neve. Tendenze locali leggermente positive sono in atto alle quote più elevate.

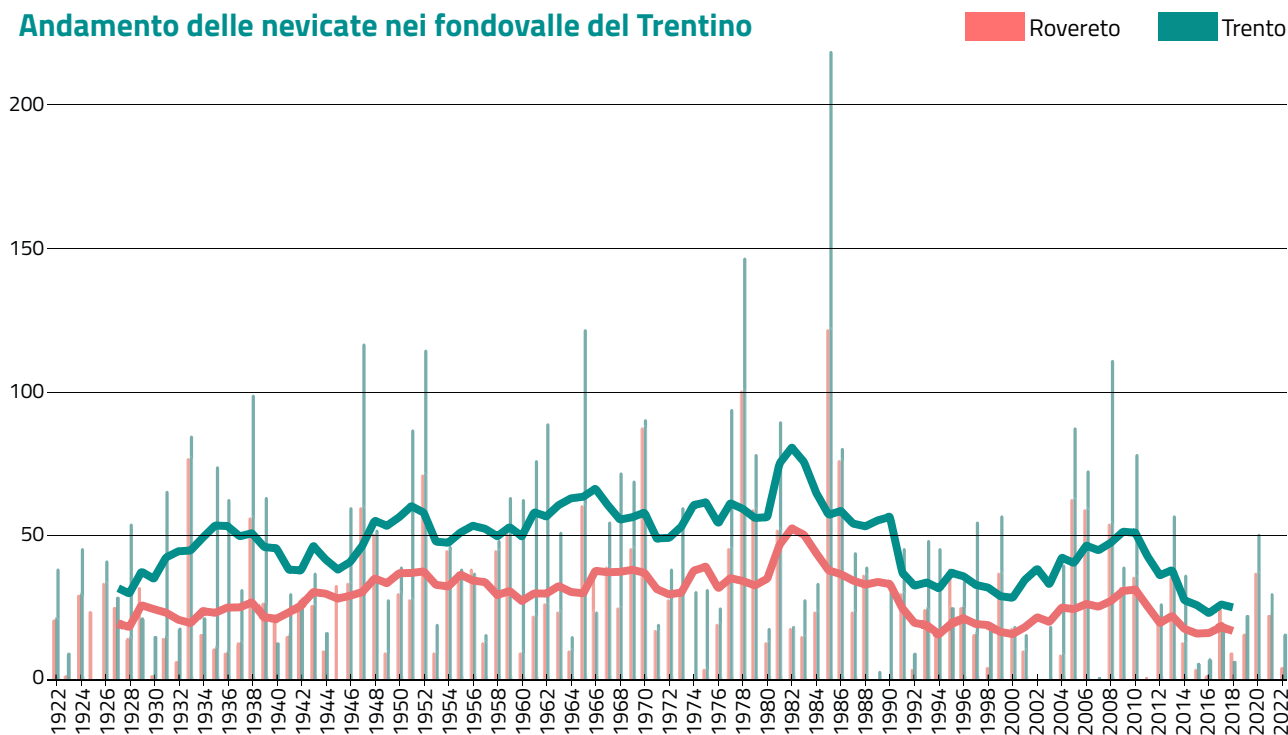
Le principali attività di monitoraggio della neve in Provincia di Trento sono svolte da Meteotrentino, il servizio meteorologico provinciale, che raccoglie sistematicamente dati grazie alle stazioni nivometriche automatiche, distribuite in una rete sul territorio, a partire dalla stagione invernale 1984-1985.

In generale, sulle Alpi la stagione della neve è diventata sempre più breve, con un accorciamento medio della durata del manto nevoso pari a oltre un mese nell'ultimo secolo e a circa 15 giorni nel solo periodo 1982-2020.

A livello provinciale, a partire dagli anni '90 si è osservata una significativa riduzione sia della durata della copertura nevosa al suolo che dello spessore medio stagionale della neve; tale andamento è influenzato in maniera significativa dalla quota e dalla distribuzione altitudinale delle temperature.

Nel periodo 1980-2020 si sono riscontrate nette tendenze negative di innevamento nella fascia altimetrica più bassa (sotto i 1.000 m s.l.m.) durante l'intera stagione nevosa, che va da novembre a maggio, associate al generale aumento delle temperature, mentre la variabilità è maggiore nella fascia altimetrica intermedia. Alcune tendenze positive sono state riscontrate localmente al di sopra dei 2.000 m s.l.m. tra gennaio e marzo, a causa delle maggiori precipitazioni invernali. Tendenze negative significative sono state invece riscontrate a tutte le quote nel mese di aprile. Mentre le aree più a valle registrano una netta diminuzione dell'innevamento a causa di un aumento significativo delle temperature medie, le alte quote in pieno inverno mostrano un leggero aumento delle nevicate, associato a un aumento generale delle precipitazioni.

Andamento delle nevicate nei fondovalle del Trentino



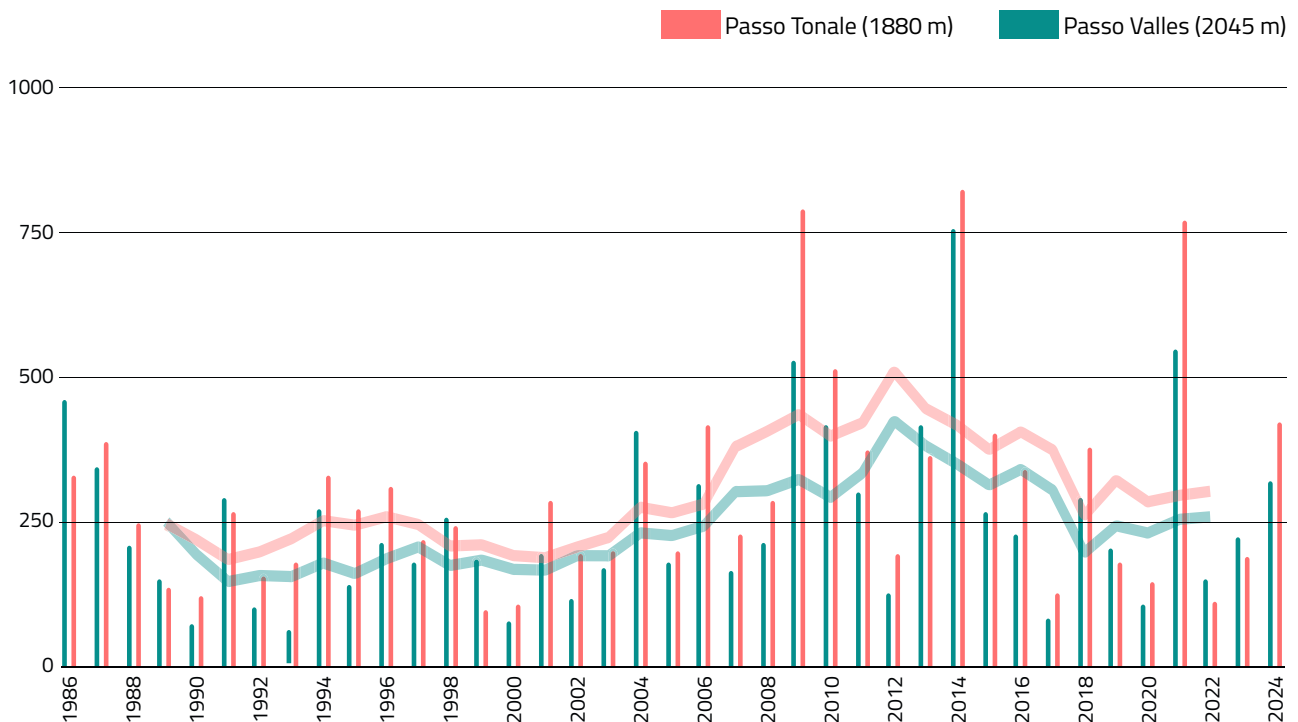
Serie di altezze di neve fresca annuale registrate per Trento (fonte: Meteotrentino PAT) e Rovereto (fonte: Osservatorio Specola di San Rocco) dal 1922 al 2022. Sono sovrapposte anche le medie mobili decennali (linee continue).

L'utilizzo dei dati satellitari per lo studio della neve

Il progetto CRIOPAT (nato nel 2012 dalla collaborazione tra l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della Provincia e il laboratorio di telerilevamento RSLab del Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione dell'Università di Trento) raccoglie informazioni sulla copertura nevosa utilizzando dati satellitari disponibili con cadenza giornaliera a partire dall'anno 2000. La prima versione di CRIOPAT si basa sulle immagini satellitari MODIS fornite dalla NASA, mentre la seconda versione sfrutta i dati Sentinel-3 dell'Agenzia Spaziale Europea. I prodotti CRIOPAT, disponibili sul portale Opendata del Trentino in forma di mappe della copertura nevosa e di serie temporali di parametri come il limite altitudinale medio della neve e la copertura nevosa percentuale per l'intera Provincia di Trento, permettono di identificare l'andamento stagionale delle aree innevate in Trentino e analizzarne la distribuzione anche in funzione dell'esposizione del terreno.

Le analisi dei dati satellitari confermano che la stagione invernale 1984-1985 è stata la stagione più nevosa dall'inizio delle rilevazioni, come rivelato da uno studio che ha analizzato le nevicate verificatesi tra il 1920 e il 2017: in quell'inverno la città di Trento infatti ha registrato la maggior nevicata dell'ultimo secolo.

Andamento della nevosità presso due stazioni di alta quota in Trentino



Serie di altezza di neve fresca cumulata nella stagione invernale (dicembre-gennaio-febbraio) per le stazioni di Passo Valles e Passo Tonale. Sono sovrapposte anche le medie mobili decennali (linee continue) (fonte: Meteotrentino PAT).



Ghiacciai

L'estensione dei ghiacciai e la loro massa si stanno riducendo considerevolmente a causa delle temperature in aumento. I processi di fusione e ritiro stanno accelerando e la quota della fronte dei ghiacciai si è innalzata.

Nel 2015 il Trentino era caratterizzato da circa 115 ghiacciai, un numero pari a circa il 13% del totale nazionale, per una superficie totale di circa 31 km². Rispetto alla fine della Piccola Età Glaciale (1850 circa) l'estensione dei ghiacciai trentini si è ridotta considerevolmente a causa dell'incremento delle temperature dovuto al riscaldamento globale in atto, con un processo di intensa fusione con importanti impatti sui deflussi idrologici a valle. Gli studi disponibili stimano una riduzione areale di circa il 63% fino alla stagione 2006-2007 e di circa il 75% secondo analisi di fotointerpretazione aggiornate al 2015. Il processo di ritiro delle masse glaciali sta accelerando, come confermano studi recenti condotti grazie all'uso di dati satellitari e monitoraggi in situ effettuati per i principali ghiacciai trentini.

Piccola Età Glaciale (PEG)

Rappresenta il periodo più recente di massima espansione dei ghiacciai alpini (XIV fino a metà XIX secolo).

La quota della fronte dei ghiacciai, mediamente localizzata attorno ai 2.550 m di quota al massimo della Piccola Età Glaciale, si è innalzata almeno fino a circa 2.800 m, superando i 3.100 metri di quota per i ghiacciai esposti a sud-est.

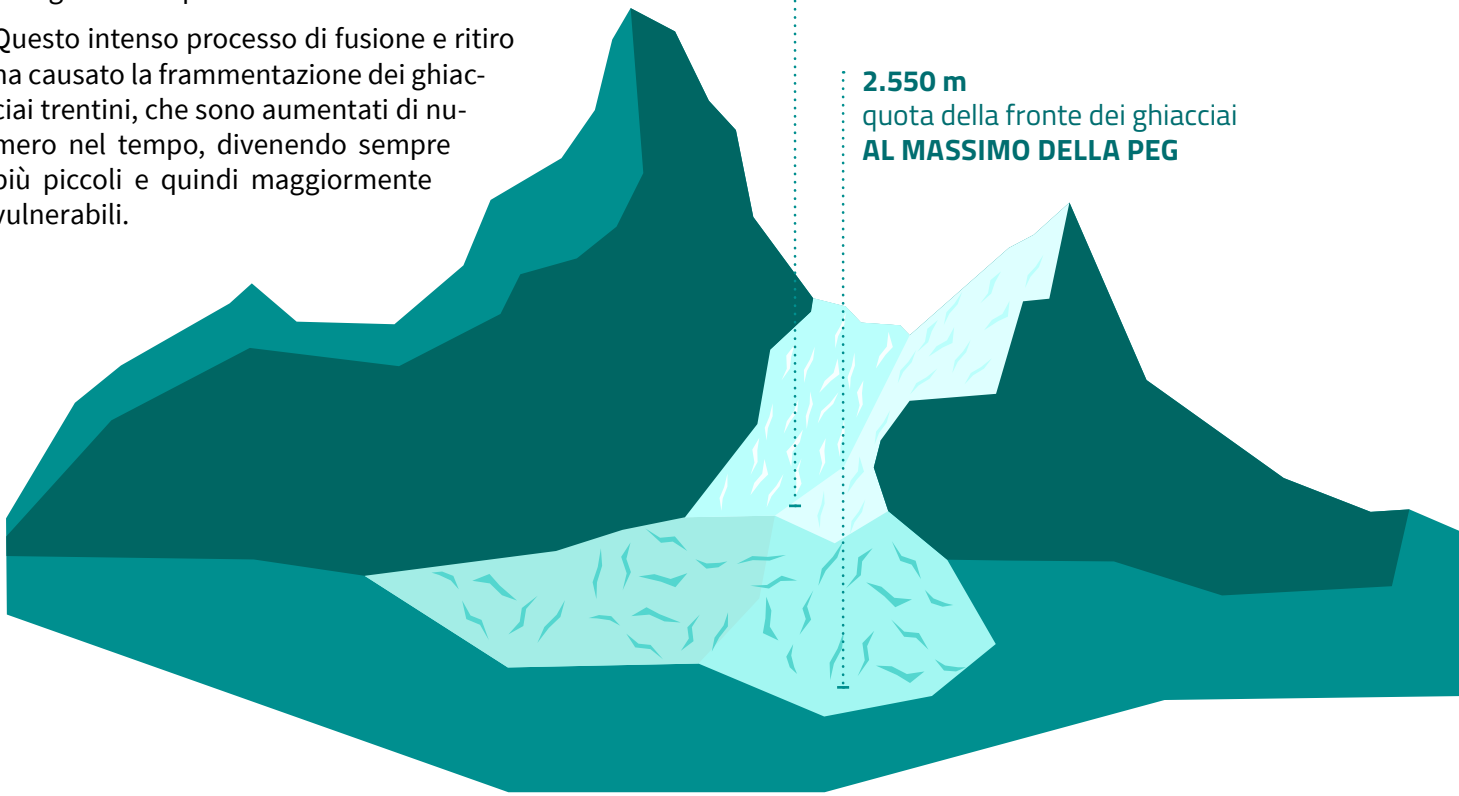
Questo intenso processo di fusione e ritiro ha causato la frammentazione dei ghiacciai trentini, che sono aumentati di numero nel tempo, divenendo sempre più piccoli e quindi maggiormente vulnerabili.

2.800 m - 3.100 m

quota della fronte dei ghiacciai **OGGI**

2.550 m

quota della fronte dei ghiacciai **AL MASSIMO DELLA PEG**



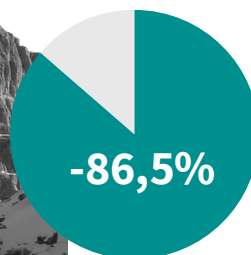
La valutazione dell'estensione areale dei ghiacciai

In Trentino la valutazione dell'estensione dei ghiacciai e delle loro principali caratteristiche, viene effettuata grazie a diversi metodi:

- Immagini aeree: una fonte di informazioni di grande valore per il monitoraggio dei ghiacciai dal momento che coprono interamente l'area di interesse in un'epoca ben definita e consentono un'interpretazione visiva e un'analisi metrica di dettaglio.
- Profili radar: permettono di effettuare studi più specifici sui ghiacciai del territorio caratterizzati da coperture detritiche.
- Immagini satellitari: la Società degli alpinisti tridentini (SAT), ad esempio, monitora ogni anno il totale della superficie glacializzata attraverso l'utilizzo delle immagini satellitari su base Copernicus Sentinel-2.



Gruppo delle Dolomiti di Brenta



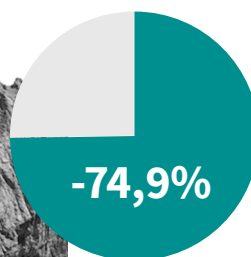
Stima delle riduzioni delle estensioni areali dei ghiacciai di alcuni Gruppi montuosi del Trentino dalla Piccola Età Glaciale al 2013 (fonte: MUSE).



Gruppo delle Pale di San Martino



Marmolada



I bilanci di massa dei ghiacciai del Careser (gruppo Ortles-Cevedale) e Mandrone (gruppo dell'Adamello) sono oggi considerati come campione di riferimento per il territorio trentino. Il 2022, si è rivelato un “*annus horribilis*” per i ghiacciai alpini italiani e ha visto un bilancio netto particolarmente negativo anche per i ghiacciai trentini monitorati, caratterizzandosi come l'anno peggiore dall'inizio delle misure storiche. Sul ghiacciaio del Careser il bilancio di massa 2022 è stato pari a -3965 mm di equivalente d'acqua, corrispondente ad una perdita media di spessore pari a 4,4 m, più del doppio della perdita media degli ultimi 20 anni. Per il ghiacciaio de La Mare la perdita stimata è pari a circa -3000 mm di equivalente d'acqua, pari a uno spessore di 3,3 m, oltre tre volte la media degli

ultimi 20 anni. Considerando che la quota media di questo ghiacciaio è superiore ai 3200 m, tale valore è particolarmente rilevante. Anche per il ghiacciaio del Mandrone è stato misurato un bilancio fortemente negativo, pari a -3674 mm di equivalente d'acqua, corrispondenti a 4,1 m di ghiaccio.

Nel 2023 i bilanci di massa dei ghiacciai trentini sono stati ancora fortemente negativi seppur in misura minore rispetto al 2022. Ad esempio per il ghiacciaio del Careser il bilancio di massa è stato pari a -2855 mm di equivalente d'acqua.

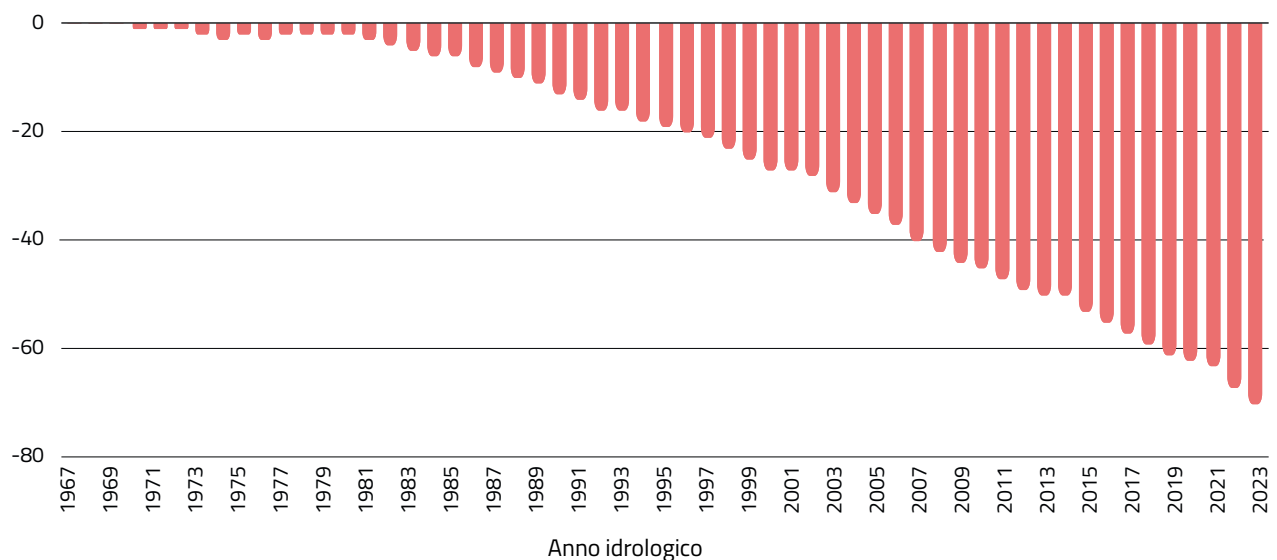
Il 2024 è stato invece caratterizzato da una primavera estremamente nevosa alle alte quote che ha determinato un bilancio annuale meno negativo dei precedenti.

Ghiacciaio del Careser

Bilancio invernale, Bilancio estivo, Bilancio netto (mm acqua equivalente)



Perdita cumulata dall'inizio delle rilevazioni (m acqua equivalente)



Il bilancio di massa del ghiacciaio del Careser rappresenta la serie storica più lunga tra i ghiacciai italiani. Se la perdita di massa continuasse a questi ritmi il ghiacciaio potrebbe scomparire entro metà secolo (fonte dei dati: Meteotrentino PAT).

Convenzione per i Ghiacciai Trentini

Le principali attività di monitoraggio e studio dei ghiacciai trentini sono attualmente svolte in collaborazione tra più enti grazie alla convenzione stipulata nel 2006 e rinnovata nel 2022 tra la Provincia autonoma di Trento, la Società degli Alpinisti Tridentini attraverso la sua Commissione Glaciologica e l'allora Museo Tridentino di Scienze Naturali (ora MUSE).

I monitoraggi biologici ed ecologici

Alle analisi che investigano gli aspetti fisici, si aggiungono monitoraggi e studi biologici ed ecologici su ghiacciai, torrenti glaciali, sorgenti alpine, pozze e piane proglaciali, allo scopo di monitorare la biodiversità di vegetali e artropodi e modalità e dinamiche di colonizzazione delle aree di recente deglaciazione. Il MUSE svolge queste attività prin-

cipalmente all'interno del Parco Naturale Adamello-Brenta e del Parco dello Stelvio, in collaborazione con gli Enti Parco e alcune Università, quali l'Università degli Studi di Milano e l'Università degli Studi di Pavia. I ghiacciai maggiormente studiati da questo punto di vista in Trentino sono Mandrone, Careser, de la Mare, Presena, Amola e Agola.



Il crollo sul ghiacciaio della Marmolada del luglio 2022

Il ghiacciaio principale è soggetto ad un ritiro molto rapido e si è ridotto di poco meno della metà di quello che restava (un ulteriore 40% circa) tra il 2015 e il 2022. Nel luglio del 2022, a causa delle prolungate condizioni di temperatura sopra lo zero anche a quote superiori ai 3.000 m s.l.m., un grosso distacco improvviso ha causato un'enorme frana di ghiaccio, acqua e detriti rocciosi, nella quale 11 persone hanno perso la vita e 7 sono state ferite.

Crollo ghiacciaio Marmolada (foto: Ufficio Stampa PAT).



Permafrost

Sebbene non direttamente osservabile, il permafrost (terreno permanentemente congelato) è soggetto a rapide modificazioni indotte dalle temperature in aumento.

Foto: Archivio MUSE.

Il permafrost (terreno permanentemente congelato) è diffuso nel Trentino in alta quota, sopra i 2500 m s.l.m., sia in versanti in roccia che in pendii di detrito sciolto.

I *rock glacier* sono le principali morfologie legate alla presenza di permafrost in ambiente alpino. Si tratta di lobi di detrito sciolto, sovente contenenti ghiaccio al loro interno, che si collocano lungo i versanti e si muovono verso valle anche di alcuni metri all'anno. La presenza di permafrost contribuisce a rendere più stabili gli ammassi rocciosi ad alta quota, mentre la sua degradazione aumenta il rischio di frane. Il ghiaccio contenuto nel permafrost costituisce inoltre un'importante, ma tuttora poco conosciuta, risorsa idrica, che ha una valenza strategica quale futura riserva di acqua potabile. Per questi motivi è fondamentale conoscere la distribuzione del permafrost nel territorio trentino e monitorarne le variazioni. Ad oggi l'estensione del permafrost si aggira attorno ai 150 km², mentre i *rock glacier* catalogati sono più di 700.

Il monitoraggio del permafrost avviene attraverso misurazioni sistematiche di temperatura del suolo, parametri climatici, movimenti dei *rock glacier*, misure geofisiche e qualità dell'acqua in siti chiave dislocati nei principali gruppi montuosi. I dati vengono raccolti sia sul terreno che tramite indagini da remoto, inclusi l'uso di droni e telerilevamento. L'evoluzione geomorfologica dei versanti di alta quota è fortemente influenzata dal movimento dei *rock glacier*, il quale sta accelerando a causa del riscaldamento globale. Le tecniche utilizzate per misurare tali spostamenti includono stazioni totali, GPS differenziali, scanner laser, fotogrammetria da drone e confronti di ortofoto digitali.

Carta del Permafrost e Rock Glacier

Questi importanti dati geomorfologici sono ora inclusi nelle Carte della Pericolosità (Carta del Permafrost e Rock Glacier) della Provincia autonoma di Trento. Tali cartografie sono importanti strumenti per la previsione dei pericoli connessi a fenomeni idrogeologici, valanghivi, alluvionali, sismici, ecc. e costituiscono la base di riferimento per definire la Carta di Sintesi della Pericolosità (vedi capitolo PERICOLI NATURALI).



Il *rock glacier* della val d'Amola, monitorato dal Servizio Geologico della PAT, in collaborazione con le Università di Pavia e di Padova e la FEM dal 2001 (foto: Servizio Geologico PAT).

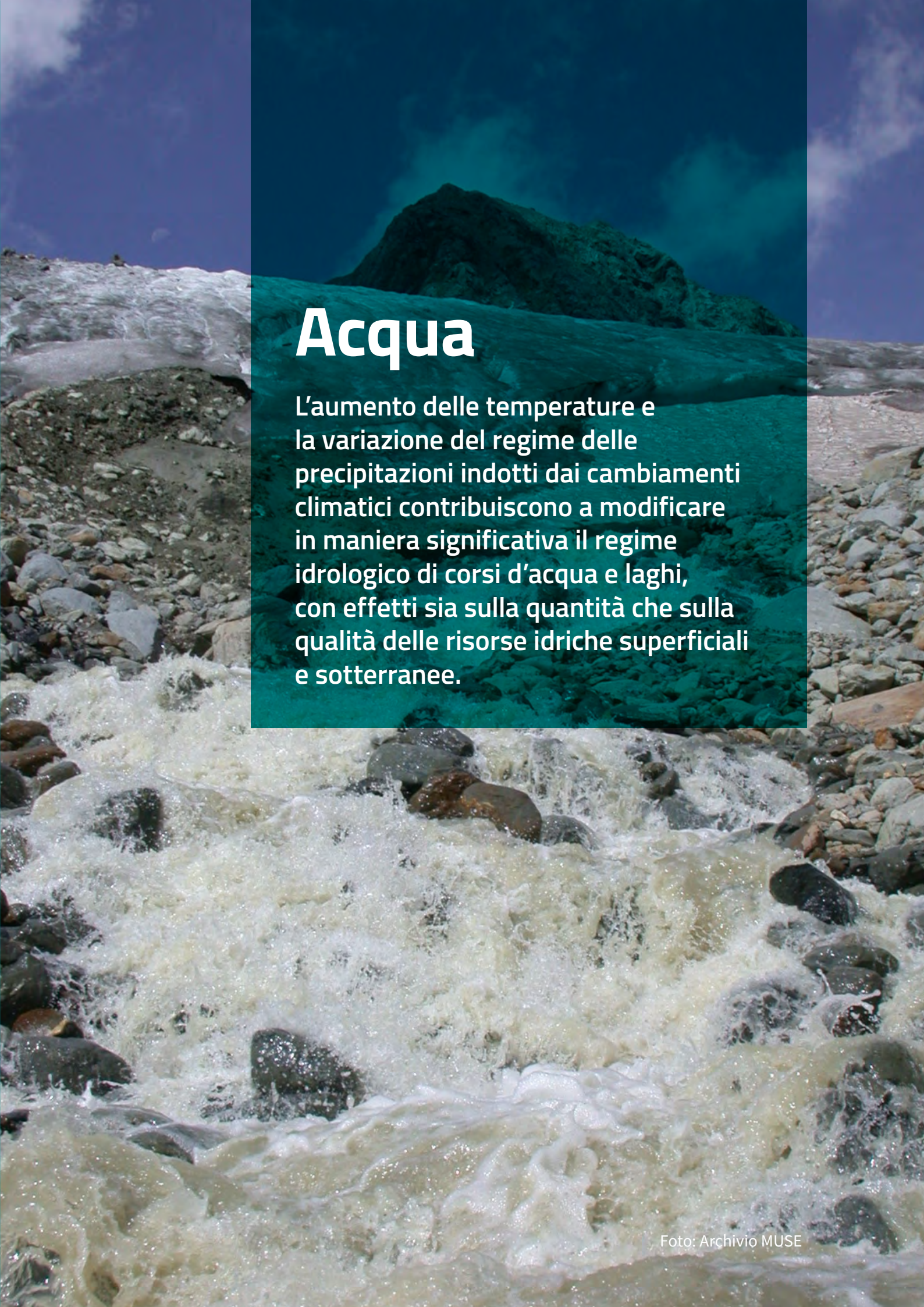


Esempio di crollo di permafrost in Trentino, estate 2023 (foto: Servizio Geologico PAT).

Fin dal 2001 viene monitorata la velocità di spostamento di alcuni *rock glacier*, Marroccaro e Val d'Amola, situati nei principali gruppi montuosi (Presanella, Cevedale e Dolomiti). I dati ottenuti confluiscono in un database internazionale. Queste misurazioni continuative sono cruciali per osservare le variazioni cinematiche in risposta ai cambiamenti climatici e per monitorare possibili accelerazioni che potrebbero risultare in eventi parossistici, interessando potenzialmente interi versanti.

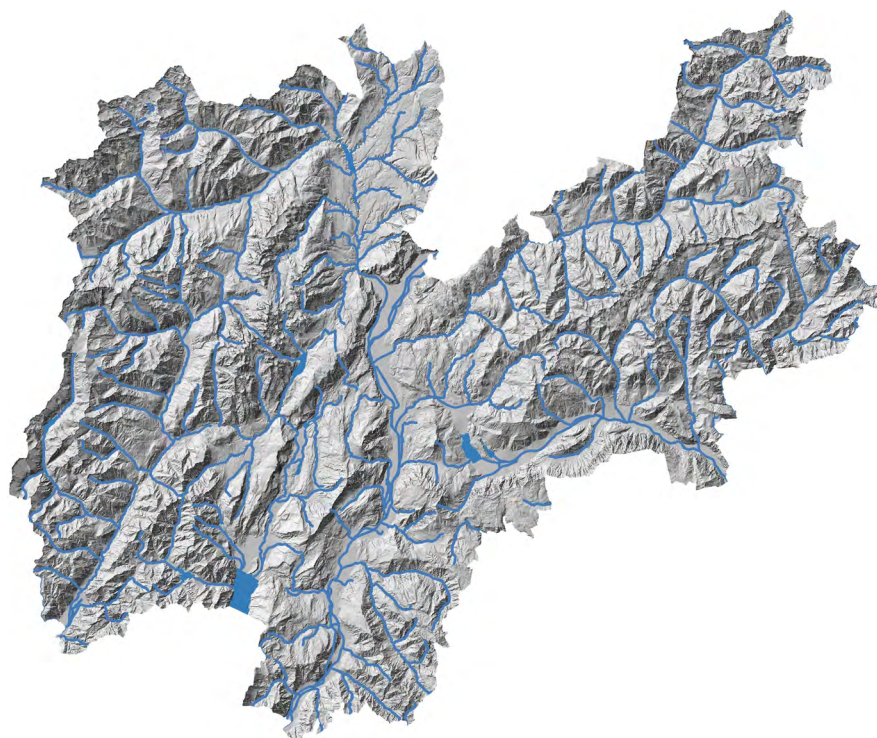
Lo studio e il monitoraggio del permafrost in Provincia di Trento

Le attività sono iniziate da più di tre decenni e sono svolte dal Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento in collaborazione con l'Università di Padova, l'Università di Pavia e la Fondazione Edmund Mach. A queste si aggiungono le attività svolte dal MUSE che, in collaborazione con l'Università degli Studi di Milano, l'Università degli Studi di Pavia, la Libera Università di Bolzano ed EURAC, studia e monitora la biodiversità associata ad alcuni *rock glacier*.



Acqua

L'aumento delle temperature e la variazione del regime delle precipitazioni indotti dai cambiamenti climatici contribuiscono a modificare in maniera significativa il regime idrologico di corsi d'acqua e laghi, con effetti sia sulla quantità che sulla qualità delle risorse idriche superficiali e sotterranee.



I 377 corpi idrici fluviali ed i 21 corpi idrici lacustri della Provincia autonoma di Trento. (Immagine: APPA).

Il Trentino è caratterizzato dalla presenza di una ricca ed articolata rete idrografica, risultato della complessità orografica del territorio, che si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 21.400 km. Il bacino principale della provincia è quello del fiume Adige, il secondo fiume più lungo d'Italia. Nel Trentino occidentale si trovano i bacini di Chiese e Sarca, che confluiscono entrambi nel fiume Po, mentre nella parte orientale della Provincia i corsi d'acqua principali sono il torrente Avisio e il fiume Brenta. Altri bacini idrografici rilevanti a livello provinciale sono quelli dei torrenti Cismon, Fersina e Noce.

Piano di Tutela delle Acque 2022-27

Il Piano di Tutela delle Acque (PTA) 2022-2027 è stato redatto dall'Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente (APPA) in collaborazione con il Tavolo Tecnico Acque (istituito con D.G.P. 144 del 2018), che coordina le strutture della Provincia autonoma di Trento che contribuiscono alla predisposizione e all'attuazione dei Piani di gestione distrettuali delle acque. È lo strumento di pianificazione per conseguire la tutela e la gestione sostenibile delle risorse idriche trentine attraverso opportuni interventi di protezione, risanamento e uso sostenibile dell'acqua. La rilevanza degli effetti dei cambiamenti climatici sulla gestione delle risorse idriche in Trentino è tale che, per la prima volta, è stata inclusa all'interno del PTA una sezione specifica riguardante l'impatto dei cambiamenti climatici sulla quantità e qualità delle acque che riporta potenziali misure e azioni di adattamento (Allegato M: "Il ruolo dei cambiamenti climatici").

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla qualità e quantità delle risorse idriche sono sempre più visibili su tutto l'arco alpino e stanno diventando un tema fondamentale nella pianificazione e valutazione delle politiche e degli interventi per la loro gestione. A tale aspetto viene data rilevanza anche all'interno degli strumenti di pianificazione predisposti dalla Provincia autonoma di Trento negli ultimi anni, come ad esempio il Piano di Tutela delle Acque 2022-27 e il Piano Energetico Ambientale Provinciale 2021-2030.

Impatti sulla disponibilità di acqua

Uno degli effetti principali dei cambiamenti climatici, legato in particolare al riscaldamento e all'aumento in frequenza e intensità di eventi estremi come precipitazioni intense e siccità, è quello di modificare il ciclo idrologico, andando ad alterare i deflussi naturali e la disponibilità nello spazio e nel tempo delle risorse idriche.

Variazione dei deflussi

Il cambiamento climatico influenza il ciclo idrologico, tendendo ad alterare in particolare la stagionalità dei deflussi nei corsi d'acqua superficiali.

L'idrologia del bacino dell'Adige è fortemente influenzata dalle dinamiche di accumulo e fusione della neve e dei ghiacciai nei piccoli bacini situati in quota, mentre le precipitazioni liquide e gli apporti di acque sotterranee, unitamente ai fenomeni evapotraspirativi, sono più rilevanti nel determinare le portate a valle e, in particolare, nella porzione meridionale del bacino.

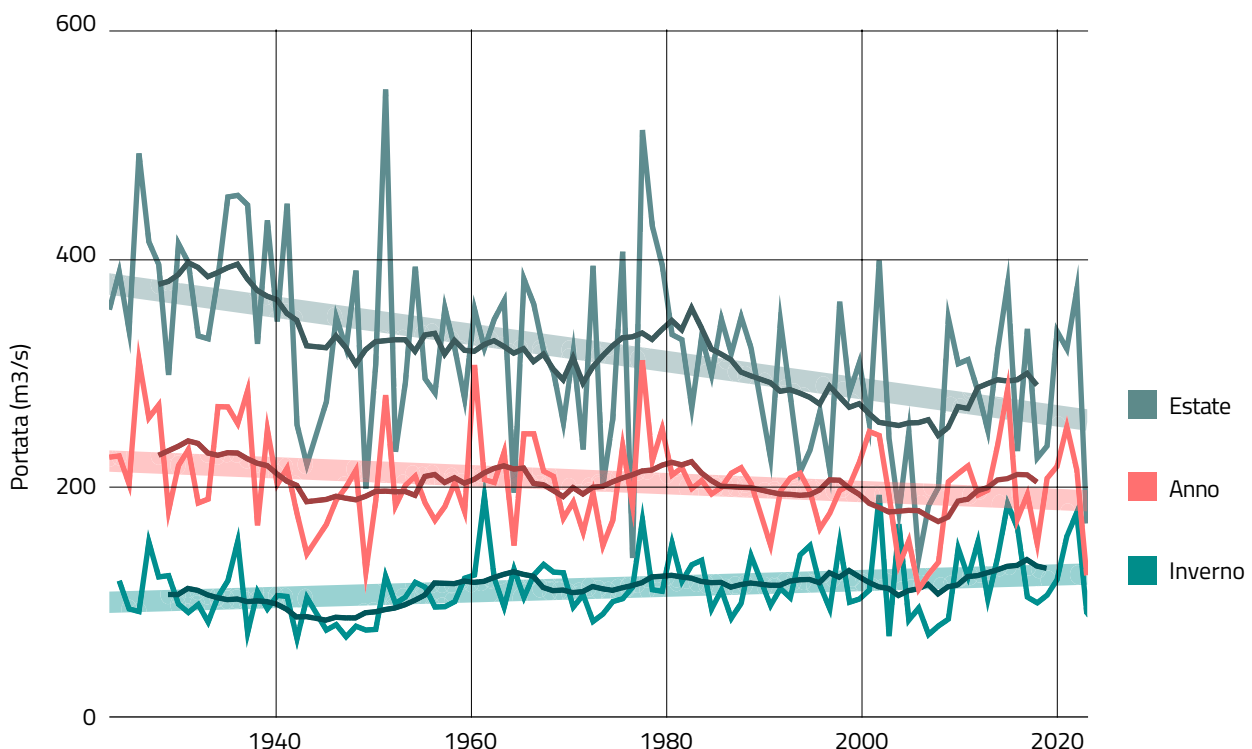
Distinguere in maniera univoca le variazioni naturali dei deflussi in risposta ai cambiamenti climatici rispetto a quelle legate alle derivazioni antropiche risulta spesso difficile, anche per l'incertezza che caratterizza i dati idrologici e che si riflette sull'accuratezza dei risultati. Diversi studi consentono tuttavia di valutare le tendenze su scala annuale e stagionale dei deflussi osservati.

L'analisi statistica di lungo periodo (effettuata su serie di lunghezza compresa tra circa 60 e 150 anni) dei valori di portata annuale per cinque corsi d'acqua alpini, tra i quali Adige (sezione di chiusura a Trento), Mincio

(emissario del Lago di Garda; sezione di chiusura a Monzambano, in provincia di Mantova) e Chiese (sezione di chiusura a Gavardo, in provincia di Brescia) ha rivelato marcate tendenze negative, statisticamente significative e omogenee nell'area di studio, pari alla perdita di un volume di circa 1.45 mm d'acqua in meno all'anno (in termini di altezza della colonna d'acqua distribuita sull'intera area dei bacini idrografici analizzati). In futuro, con l'esaurimento progressivo degli apporti glaciali, ci si attendono tendenze negative ancora più nette, ulteriormente esacerbate dai maggiori fabbisogni idrici legati alle temperature più elevate.

A livello stagionale lo studio di serie storiche di portata osservate in diversi sottobacini dell'Adige evidenzia una diminuzione nei deflussi estivi che interessa la piana dell'Adige a partire dagli anni '70, attribuibile sia alla riduzione delle precipitazioni invernali sia ad un incremento nell'uso dell'acqua per scopi irrigui nella stagione calda. I deflussi invernali sono invece aumentati nello stesso periodo, a causa dell'aumento delle precipitazioni autunnali e della maggior ricarica degli acquiferi che ne consegue.

Serie storica delle portate medie annue e stagionali estive e invernali del fiume Adige a Trento (1923-2022). Le medie mobili decennali e le tendenze lineari consentono di riconoscere le variazioni di lungo periodo: mentre le portate annuali evidenziano un lieve calo, a livello stagionale si osserva una marcata diminuzione delle portate estive e una tendenza di lieve aumento in inverno (fonte: elaborazioni dell'Università di Trento su dati dell'Ufficio Dighe, PAT).



La variazione dei deflussi delle acque di fusione del ghiacciaio del Careser

Nel 2023 uno studio sulla fusione dei ghiacciai alpini ha analizzato le serie temporali di deflusso in uscita dal ghiacciaio disponibili dal 1976. Le analisi evidenziano significativi cambiamenti nella stagionalità dei deflussi, dovuti all'effetto combinato di fusione precoce delle nevi e progressiva riduzione del ghiacciaio. Il regime idrologico è cambiato in modo significativo nel corso del tempo, con l'acqua del ghiacciaio che contribuisce al deflusso del torrente Noce in minor proporzione dopo la metà degli anni '90.

Il ruolo dell'evapotraspirazione nell'area alpina

Al crescere delle temperature, l'aumento dell'evapotraspirazione che ne deriva può condurre ad una ridotta disponibilità della risorsa idrica superficiale. Durante l'ondata di calore dell'estate 2003 l'evapotraspirazione in vaste aree delle Alpi è stata significativamente superiore alla media, con una conseguente riduzione complessiva del 32% del deflusso superficiale (rispetto alla media della stagione 2001-2003) nelle aree comprese tra i 1.300 e i 3.000 m s.l.m.

Agli impatti sulla risorsa idrica indotti dai cambiamenti climatici si possono sovrapporre gli effetti prodotti dai prelievi antropici legati alle attività economiche e produttive come ad esempio nel caso del settore idroelettrico. I rilasci a valle delle centrali possono infatti provocare fenomeni di *hydropeaking* e *thermopeaking*, che interagiscono sia in termini di qualità che di quantità con il regime dei deflussi naturali, con effetti sulla funzionalità e sulla struttura degli ecosistemi.

I cambiamenti climatici possono avere effetti anche sulle acque sotterranee, come conseguenza dell'aumento dei fenomeni di scarsità di copertura nevosa e di assenza prolungata di precipitazioni, che portano ad una riduzione della risorsa sotterranea, oppure per le variazioni dei fenomeni di precipitazione estrema.

Uno studio che ha analizzato le portate generate da tre sorgenti (sorgente Pradidali e sorgenti Acque Nere in Val Canali) durante la tempesta Vaia nell'ottobre

Substrati rocciosi come riserva idrica

Recenti ricerche hanno evidenziato come i substrati rocciosi costituiscano un'importante riserva idrica per le foreste, andando a mitigare l'impatto dei periodi di siccità.

L'acqua immagazzinata nel substrato roccioso è in parte utilizzata dalle foreste ed in parte alimenta gli acquiferi profondi. Come le variazioni climatiche influenzino questa ripartizione è oggetto di studi approfonditi, per comprendere meglio come i territori montani, e quello trentino in particolare, risponderanno ai periodi di siccità che in futuro probabilmente si presenteranno con maggiore frequenza.

Hydropeaking e thermopeaking

- Il fenomeno dell'*hydropeaking* consiste in una sequenza ripetuta di rapidi aumenti e riduzioni della portata in un corso d'acqua, provocati artificialmente dalle restituzioni in alveo delle portate utilizzate dalle centrali idroelettriche per la produzione di energia.
- Il *thermopeaking* è invece caratterizzato da variazioni rapide del regime termico di un corso d'acqua, dovute a immissioni artificiali e/o naturali di acqua.

del 2018 ha messo in evidenza come le acque meteoriche infiltrate riconducibili a tale evento abbiano contribuito ad alimentare il deflusso profondo di base nell'inverno successivo, aumentandone il volume fino all'85% in più rispetto alle condizioni normali.

È stato inoltre rilevato che la risposta delle acque sotterranee alle precipitazioni intense sembra essere influenzata dalla matrice solida che costituisce gli acquiferi. Una sorgente d'alta quota appartenente ad un acquifero carbonatico fratturato mostra una risposta rapida agli apporti temporaleschi, mentre le sorgenti che sgorgano alla base dei pendii montani (depositi misti di carbonato fratturato e porosi) mostrano una risposta ritardata.

Anche uno studio recente, effettuato per i bacini del fiume Brenta e del torrente Noce, suggerisce la necessità di monitorare con attenzione gli acquiferi vallivi, al fine di migliorare la conoscenza dell'impatto delle variazioni climatiche sul comportamento degli acquiferi stessi e garantire così la base informativa necessaria alla gestione delle risorse idriche sotterranee.

La variazione dei deflussi negli scenari climatici futuri

All'interno del progetto OrientGate ("OrientGate: A structured network for integration of climate knowledge into policy and territorial planning", 2012-2014) è stato svolto uno studio al fine di individuare possibili scenari futuri della disponibilità della risorsa idrica superficiale in un contesto di cambiamento climatico, con particolare attenzione all'impatto sul settore idroelettrico.

Sono stati presi in esame due bacini idrografici: quello del torrente Noce, dove sono presenti importanti aree glaciali che alimentano il corso d'acqua, e quello del fiume Brenta, dove non sono presenti aree glaciali. La modellazione idrologica è stata opportunamente accoppiata alla modellazione climatica, utilizzando gli scenari climatici di emissione RCP4.5 e RCP8.5 (vedi capitolo EMISSIONI CLIMALTERANTI).

Lo studio ha evidenziato come in entrambi i bacini sia presente una tendenza a lungo termine alla diminuzione delle portate annuali nei corsi d'acqua, sebbene l'effetto più evidente si manifesti in un cambiamento della stagionalità dei deflussi stessi.

Per il medio termine (2021-2050), rispetto al trentennio 1981-2010, è prevista una diminuzione della disponibilità idrica naturale a scala annuale nello scenario RCP4.5 mentre nello scenario RCP8.5 non si osserva una variazione significativa. A livello stagionale invece, le simulazioni hanno indicato notevoli spostamenti di volumi di deflusso dall'estate, in cui è prevista una diminuzione in ambedue gli scenari, al periodo invernale-primaverile, che vede invece un incremento (vedi infografica).

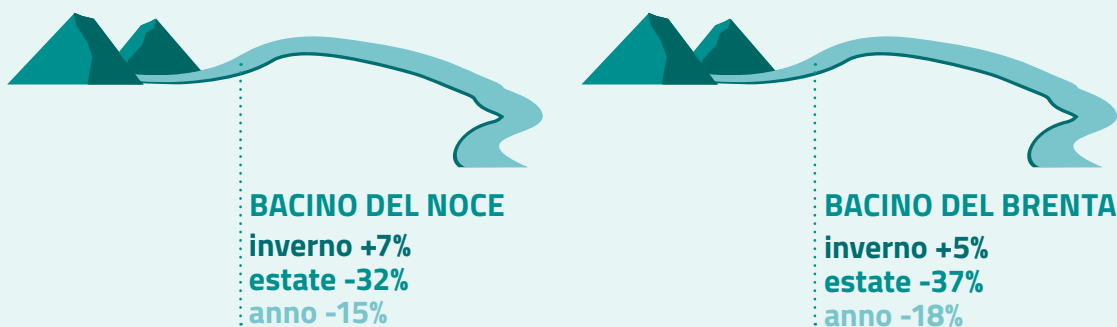
Per il torrente Noce si prevedono forti incrementi di portata primaverile a causa dell'anticipo della fusione della neve. Per il Brenta invece si prevede una diminuzione dei deflussi primaverili, a causa del minor accumulo invernale di neve al suolo ed un aumento di quelli invernali per le maggiori precipitazioni liquide a discapito di quelle nevose.

Gli effetti dei cambiamenti climatici a breve termine si manifesteranno anche sui regimi minimi delle portate. In inverno la maggiore disponibilità idrica comporta l'incremento del numero di giorni in cui si registrano portate superiori al deflusso minimo vitale* (DMV), invece in estate e in primavera si prospetta una diminuzione del numero di giorni in cui il deflusso in alveo è superiore al DMV nei bacini a quote inferiori.

Sono stati valutati inoltre i possibili effetti combinati dei cambiamenti climatici e delle derivazioni antropiche, nell'ipotesi che in futuro siano prelevate le massime portate ad oggi concesse. In inverno l'aumento dei prelievi tenderà ad attenuare l'incremento naturale di risorsa in alveo, mentre in estate la combinazione tra la diminuzione di risorsa idrica prevista e le maggiori derivazioni antropiche potrà esacerbare l'effetto dei cambiamenti climatici e i conflitti per l'uso della risorsa stessa.

** Il Deflusso Minimo Vitale rappresenta la portata limite individuata dalla normativa provinciale (Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche) necessaria a garantire la naturale integrità ecologica del corso d'acqua. Viene preso come valore di riferimento per i deflussi in regime di magra.*

Variazioni attese della disponibilità idrica naturale tra 1981-2010 e 2021-2050



Stima delle variazioni attese in futuro per la disponibilità idrica naturale nei bacini del Noce e del Brenta, per lo scenario emissivo RCP4.5 (fonte dei dati: progetto OrientGate).

Alterazione della qualità delle acque

I corpi idrici ospitano importanti ecosistemi complessi, composti da comunità vegetali e animali che determinano riserve di biodiversità e forniscono importanti servizi ecosistemici, tra i quali quello di autodepurazione, che regolano la qualità delle acque stesse. Tali ecosistemi sono soggetti a fattori di stress sia antropogenici sia climatici, che spesso agiscono in sinergia, rendendo pertanto fondamentale il monitoraggio dello stato ecologico e chimico delle acque superficiali.

Fiumi e torrenti

Uno studio condotto con riferimento al periodo 1990-2015 ha posto in evidenza come l'aumento della temperatura dell'aria abbia un impatto significativo sulle acque superficiali nel bacino dell'Adige, con tendenze negative per la concentrazione di ossigeno disciolto e conseguenze per gli ecosistemi fluviali che potrebbero esacerbarsi in futuro, dato l'ulteriore aumento della temperatura dell'aria previsto.

Un altro fattore di alterazione della qualità delle acque superficiali è la variazione di portata dei fiumi a causa delle modifiche del ciclo idrologico indotte dalla variazione dei regimi di precipitazione (ad esempio, eventi estremi più frequenti), dai minori apporti nevosi e dall'accelerazione della fusione glaciale. Infatti la diminuzione dei deflussi e episodi di magra più frequenti hanno come diretta conseguenza un possibile aumento della concentrazione di contaminanti in acqua, a causa della ridotta capacità di diluizione. Eventi di morbida, ossia con portata abbondante, risultano invece essere direttamente associati a forti mobilitazioni di sedimenti e contaminanti.

Un'ulteriore causa di alterazione della qualità delle acque può essere la più rapida fusione dei ghiacciai: essa può impattare direttamente sugli ecosistemi acquatici d'alta quota (in particolarmente sugli organismi invertebrati) con rilasci di inquinanti accumulatisi nel tempo all'interno degli strati di neve e ghiaccio (vedi capitolo ECOSISTEMI ACQUATICI).

Laghi

Numerosi studi finalizzati ad una migliore comprensione dei processi di rimescolamento profondo nei laghi hanno evidenziato come tali aspetti idrodinamici siano strettamente legati alla qualità delle acque. L'aumento della temperatura dell'aria e della superficie dei laghi può influenzare la stratificazione termica del lago, che a sua volta influisce sulla redistribuzione dei nutrienti, dell'ossigeno disciolto e di eventuali inquinanti.

Picchi temporanei di contaminazione e una ridotta qualità dell'acqua dei laghi possono essere favoriti da diversi fattori associati ai cambiamenti climatici in atto. Gli eventi di siccità possono far crescere la concentrazione di sostanze inquinanti e di nutrienti a causa dell'abbassamento del livello dell'acqua e quindi della riduzione del volume di diluizione; forti precipitazioni possono comportare un aumento del deflusso nei laghi alpini, trasportando maggiori sostanze inquinanti dalle aree circostanti; l'aumento dell'acqua di fusione glaciale e nivale può portare a fluttuazioni dei livelli dell'acqua e del trasporto dei sedimenti, influenzando la limpidezza e la torbidità dell'acqua stessa. I sedimenti possono, a loro volta, trasportare con sé sostanze inquinanti e nutrienti.

Il cambiamento climatico inoltre può modificare gli ecosistemi lacustri (vedi capitolo ECOSISTEMI ACQUATICI), alterando la distribuzione delle specie o favorendo l'introduzione e la diffusione di specie invasive. Questi cambiamenti ecologici possono avere effetti a cascata sulla qualità dell'acqua dei laghi.

Temperatura delle acque superficiali

La variazione della temperatura dell'acqua dei fiumi in risposta al rialzo delle temperature dell'aria e alle ondate di calore richiede ancora un'analisi approfondita; tuttavia si possono già osservare alcune evidenze nelle misure disponibili. La variazione delle temperature medie mensili dell'ac-

qua del fiume Adige tra il periodo 2000-2009 e il 2010-2019 evidenzia un lieve raffreddamento nel periodo primaverile (in aprile e maggio), probabilmente dovuto ad un incremento e un anticipo delle acque di fusione nivale e glaciale, mentre un lieve aumento di temperatura si osserva nel periodo estivo (in particolare in luglio).

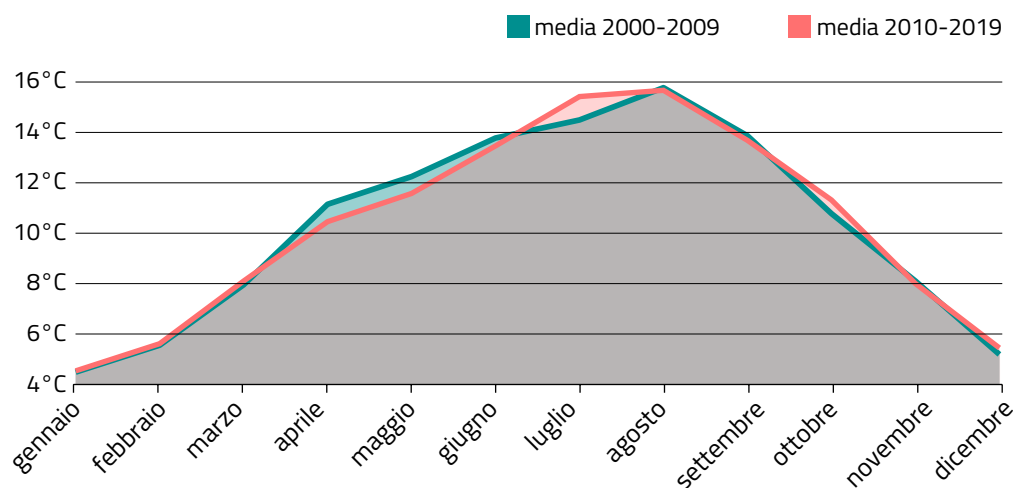
La variazione delle temperature medie mensili dell'acqua del fiume Sarca tra il periodo 2000-2007 e il 2008-2015 mostra un raffreddamento più marcato nel periodo primaverile ed estivo (da aprile ad agosto), probabilmente perché il Sarca risente maggiormente dell'effetto delle acque di fusione glaciale rispetto al fiume Adige (che ha un bacino molto più ampio e in proporzione meno glacializzato), mentre un riscaldamento delle acque prevale nell'intero periodo invernale (da novembre a marzo).

Un importante studio è stato condotto sui fiumi svizzeri caratterizzati da diversi regimi idrologici (regolati, di pianura e innevati), quantificando la loro risposta termica in occasione dei tre eventi più significativi di ondate di calore verificatisi in Europa centrale dal 1950 (2003, 2006 e 2015). Dai risultati osservati è emerso come la risposta termica dei fiumi analizzati sia fortemente variegata a seconda del regime idrologico del fiume. I fiumi di pianura sono risultati estremamente

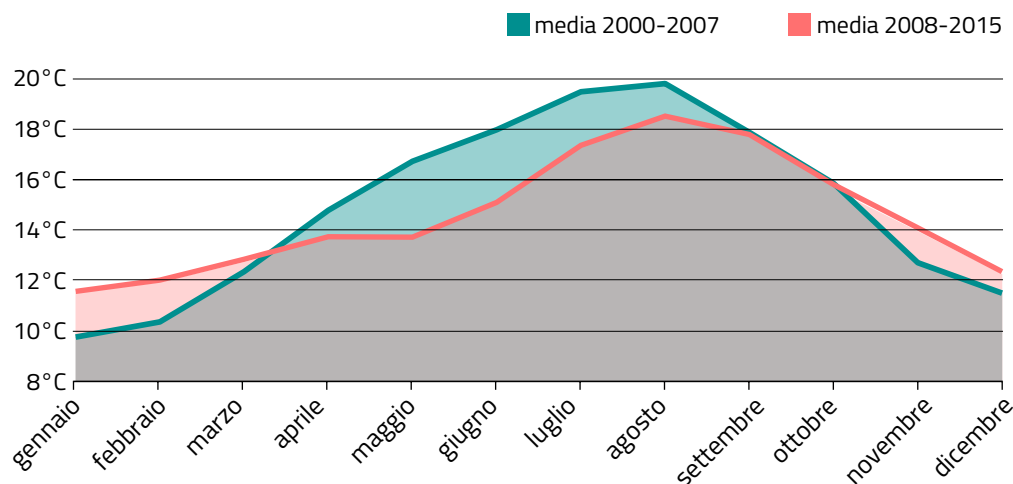
sensibili alle ondate di calore; al contrario, i fiumi ad alta quota e i fiumi regolati che ricevono acqua fredda da bacini idroelettrici o derivazioni ad alta quota hanno mostrato una risposta termica ridotta.

Anche il ritiro dei ghiacciai ha un significativo effetto sulla temperatura dei torrenti di origine glaciale, influenzando la struttura degli ecosistemi ad essi legati e la loro funzione. Ad esempio, per l'aumento della temperatura dell'acqua in uscita dal ghiaccio del Careser è stato stimato un ritardo di circa tredici anni rispetto all'aumento della temperatura dell'aria circostante, con una conseguente risposta da parte delle comunità di invertebrati acquatici (vedi capitolo "ECOSISTEMI ACQUATICI").

Anche i laghi alpini, la cui temperatura superficiale influisce sul mescolamento delle acque e sulla funzionalità degli ecosistemi, risultano termicamente più reattivi, mentre quelli nelle fasce fredde/nivali risultano più resilienti.



Variazione della temperatura media su base mensile del fiume Adige tra il periodo 2000-2009 e 2010-2019 (Fonte dei dati: APPA).



Variazione della temperatura media su base mensile del fiume Sarca tra il periodo 2000-2007 e 2010-2015 (Fonte dei dati: APPA).

Lago di Garda



Il Lago di Garda è il lago più grande d'Italia, con la sua superficie di circa 370 km², ed è situato tra le regioni Lombardia e Veneto e la Provincia autonoma di Trento.

Il monitoraggio dello stato di qualità delle acque del Lago di Garda risulta fondamentale sia per la rilevanza ambientale degli ecosistemi acquatici ospitati, sia per il ruolo che il Lago riveste per il tessuto socio-economico, ad esempio per il settore del turismo.

Lago di Garda, Torbole (foto: Fabio Staropoli, Trentino Sviluppo S.p.A.).

Il Laboratorio di idrobiologia di Riva del Garda, incaricato nel Settore Laboratorio dell'Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente, esegue dal 1990 il monitoraggio delle acque del lago di Garda.

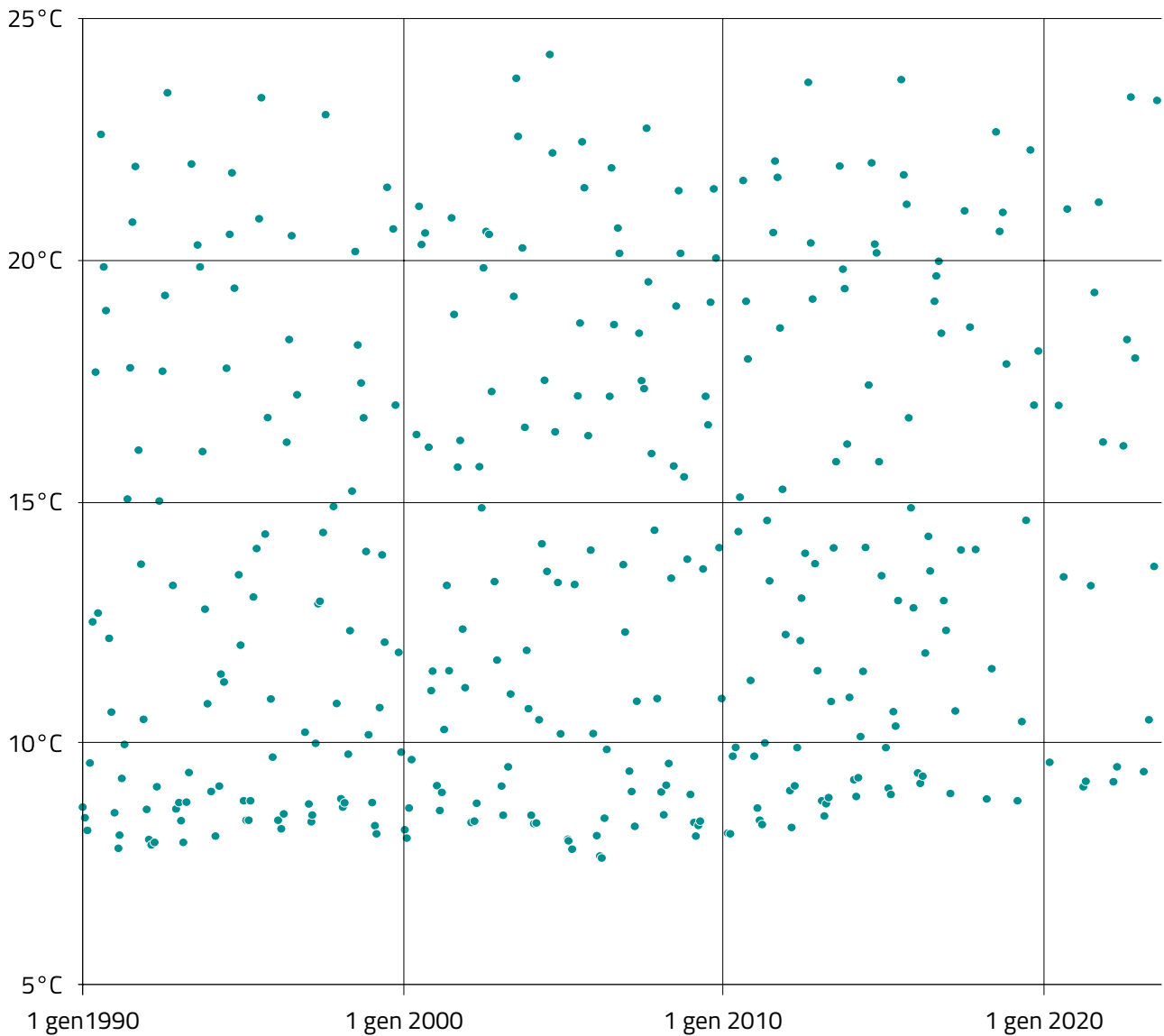
La serie temporale dei dati raccolti a 5, 150 e 250 metri di profondità, nel punto di prelievo situato nella zona trentina del Lago, mostra come la temperatura degli strati più profondi (150 e 250 m) sia aumentata dal 1990, con una velocità media di incremento di circa 0.3 °C ogni 10 anni. La temperatura delle acque superficiali (5 m) mostra un'ampia oscillazione, a causa della maggior influenza della perturbazione esercitata dalle variazioni della temperatura dell'aria sopra il Lago nell'arco dell'anno e nelle diverse giornate. L'ampiezza di tale variazione è molto più pronunciata nei mesi più caldi e più ridotta nei mesi più freddi (gennaio, febbraio e marzo), per i quali la tendenza di riscaldamento di lungo periodo (1990-2023) appare di

entità comparabile a quella evidenziata per le acque più profonde. Per i mesi più caldi, invece, i dati a disposizione non consentono di stimare in maniera robusta la tendenza di lungo termine delle temperature superficiali dell'acqua del Lago.

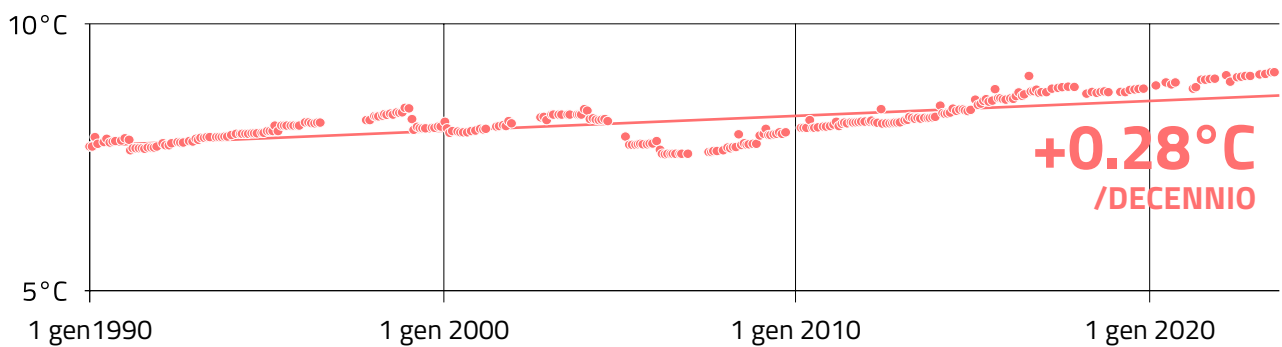
Le dinamiche di risposta al riscaldamento globale in atto possono concorrere a determinare l'evoluzione del gradiente termico tra la superficie del Lago e le zone più profonde, con conseguenze sulla frequenza e sulla profondità di rimescolamento della colonna d'acqua. In uno scenario di riscaldamento superficiale più rapido di quanto avvenga ai livelli più profondi, la stratificazione termica e fisico-chimica del Lago risulterebbe maggiormente stabile e il rimescolamento profondo verrebbe quindi sfavorito in futuro, con conseguenze negative sull'ossigenazione delle acque profonde e significativi impatti sugli equilibri ecosistemici.

Serie storica delle misure di temperatura dell'acqua del Lago di Garda in superficie (5 m) e in profondità (250 m). Si nota la notevole ampiezza della fluttuazione delle temperature superficiali durante l'anno, mentre gli strati profondi presentano temperature che variano più lentamente e in maniera più stabile.

Temperatura delle acque superficiali (5 m di profondità)



Temperatura delle acque profonde (250 m di profondità)



Ecosistemi acquatici

I cambiamenti climatici stanno alterando le comunità acquatiche e lo stato ecologico di corsi d'acqua e laghi, in particolare in alta quota. La conseguente perdita di specie e habitat riduce la disponibilità dei servizi ecosistemici associati alle risorse idriche.

I cambiamenti climatici alterano il regime idrologico dei corpi idrici e la qualità dell'acqua (vedi capitolo ACQUA) modificando gli habitat e la struttura delle comunità biotiche, con effetti su qualità e funzionalità degli ecosistemi acquatici stessi. Tali effetti si stanno manifestando più velocemente negli ecosistemi acquatici d'alta quota, tra cui i torrenti glaciali e i laghi di piccole dimensioni.

Lo stato di salute degli ecosistemi acquatici è fortemente influenzato anche da altri fattori di origine antropica, come l'inquinamento e i cambiamenti di uso del suolo. L'impatto negativo di questi elementi, ad esempio sulla qualità dell'acqua, può essere ulteriormente amplificato dall'interazione con gli impatti dei cambiamenti climatici.

Fiumi e torrenti

Nei fiumi, in particolare nelle aree più a valle, la tendenza è quella di un aumento dei periodi di magra e di secca soprattutto in primavera ed estate (a causa del minor contributo delle acque di fusione nivo-glaciale, che sostiene e rende più costanti i deflussi nei mesi più caldi), con il risultato di un più frequente alternarsi di condizioni di eutrofizzazione estiva e di piene invernali, determinate dall'aumento delle precipitazioni liquide a discapito di quelle nevose nei mesi più freddi.

Le temperature più calde di fiumi e torrenti, determinate dall'aumento delle temperature dell'aria, causano la riduzione della concentrazione dell'ossigeno disciolto in acqua, mentre più frequenti eventi di pioggia intensa possono comportare maggiori fenomeni di erosione e trasporto di sedimenti e nutrienti. Di conseguenza, si assiste al possibile peggioramento della qualità delle acque fluviali e ad impatti ecologici che vanno dai cambiamenti nella distribuzione, nell'abbondanza e nella fenologia delle specie acquatiche (in particolare delle specie che prediligono le acque più fredde), all'alterazione della catena trofica, fino alla perdita di biodiversità e di funzionalità degli ecosistemi. Questo si può tradurre, ad esempio, in una minor capacità di auto-depurazione dei corpi

Cosa sono i servizi ecosistemici?

Gli ecosistemi naturali generano molteplici benefici a favore dell'uomo, i cosiddetti servizi ecosistemici. Questi servizi ricoprono un'importanza fondamentale, in quanto sostengono la vita e il benessere delle comunità umane, sia direttamente che indirettamente, in maniera proporzionale allo stato di conservazione degli ecosistemi stessi. Infatti, quando ben conservati, essi garantiscono la fornitura di un ampio spettro di servizi, anche di rilevante valore economico.

I servizi ecosistemici possono essere raggruppati in quattro categorie principali:

- **servizi ecosistemici a supporto della vita** (cioè i servizi essenziali per garantire gli altri): comprendono la creazione di habitat e la conservazione della biodiversità genetica;
- **servizi ecosistemici di regolazione**: regolano il clima, la qualità dell'aria e delle acque, la formazione del suolo, l'impollinazione, l'assimilazione dei rifiuti, e mitigano i rischi naturali quali erosione, specie infestanti, ecc.;
- **servizi ecosistemici di approvvigionamento**: forniscono beni veri e propri, quali cibo, acqua, legname, fibre, combustibile e altre materie prime, ma anche risorse genetiche e specie ornamentali;
- **servizi ecosistemici culturali**: includono benefici non materiali quali l'eredità e l'identità culturale, l'arricchimento spirituale e intellettuale e i valori estetici e ricreativi.

Quali servizi forniscono gli ecosistemi acquatici in Trentino?

Gli ecosistemi acquatici del nostro territorio forniscono molteplici servizi ecosistemici.

Essi regolano i fenomeni idrogeologici, garantiscono l'approvvigionamento di acqua dolce di qualità tramite il processo di auto-depurazione dei corpi idrici, rendono disponibili alcune specie ittiche per l'alimentazione umana, assicurano una preziosa risorsa di biodiversità a valore culturale, scientifico, ricreativo ed economico. Non ultimo, sono importanti fonti energetiche per la produzione di energia idroelettrica. Gli impatti dei cambiamenti climatici mettono potenzialmente a rischio la fornitura di alcuni di questi servizi.

idrici e quindi in un ulteriore decadimento della qualità della risorsa idrica.

I corsi d'acqua situati alle quote più elevate costituiscono habitat peculiari dal punto di vista biologico. I torrenti alimentati dalla fusione glaciale, ad esempio, caratterizzati da temperature dell'acqua molto basse e portate d'acqua altamente variabili nel corso dell'anno, ospitano poche specie di insetti altamente specializzati, mentre gli organismi vegetali sono quasi

totalmente assenti. Questi ecosistemi sono per natura particolarmente sensibili alle variazioni climatiche e ambientali, il che li rende ideali per il monitoraggio degli impatti dei cambiamenti climatici sulla biodiver-

sità alle quote più alte. Il progressivo ritiro dei ghiacciai causerà in futuro il venir meno dell'alimentazione glaciale e, quindi, la definitiva scomparsa di questi ecosistemi unici.

Impatti sulle comunità di invertebrati dei torrenti glaciali

Il torrente alimentato dal sistema glaciale del Ca-reser è stato studiato allo scopo di conoscere modalità e tempi di risposta delle comunità di invertebrati acquatici dei torrenti alpini d'alta quota al riscaldamento in atto. Negli ultimi dieci anni è stato osservato un aumento medio della temperatura massima estiva dell'aria di circa 1.7-1.8 °C rispetto agli anni '80, mentre il riscaldamento dell'acqua del torrente è iniziato solo nel 2003 con un ritardo di circa 20 anni, raggiungendo nel 2020 una temperatura di 8.1 °C a 2642 m s.l.m. e di 2.4 °C nel tratto più a monte, situato a 2858 m s.l.m. a circa 2 km dalla fronte del ghiacciaio in ritiro.

La comunità di invertebrati acquatici ha manifestato una risposta ritardata di circa 13 anni rispetto al riscaldamento dell'acqua, che consiste nel progressivo aumento del numero di *taxa* (specie di organismi viventi) a causa della colonizzazione

verso monte da parte di specie precedentemente assenti a tali quote a causa delle condizioni troppo estreme e inospitali. La diminuzione dell'influenza glaciale causa, infatti, la progressiva omogeneizzazione tassonomica dei primissimi tratti dei torrenti glaciali, con una complessiva perdita di biodiversità e l'alterazione della funzionalità ecosistemica.

Ad esempio, mentre la numerosità di altre specie è cresciuta, il numero di individui di *Diamesa steinboeckii* (nota come "mosca dei ghiacciai"), un insetto adattato al freddo e ottimo indicatore di questi habitat glaciali caratteristici, è diminuito in tratti del corso d'acqua nei quali 20 anni fa era abbondante. Questa specie è scomparsa nei tratti con temperatura massima dell'acqua superiore ai 6 °C e temperatura dell'aria superiore ai 12 °C in estate, e nei bacini con copertura glaciale inferiore al 30%. Allo stesso tempo, la *Diamesa* ha conquistato alcuni nuovi tratti torrentizi lasciati progressivamente liberi a monte dal ghiacciaio in ritiro.

Con l'aumentare della temperatura dell'acqua le specie adattate al freddo e a vivere nei torrenti glaciali sono destinate a scomparire (*losers*) mentre quelle adattate a vivere in acque sorgentizie più calde a diffondersi maggiormente (*winners*; fonte: MUSE).



Chironomini *Diamesa latitarsis*,
D. steinboeckii e *Diamesa bertrami*



Plecottero
Rhabdiopteryx alpina



Efemerottero
Rhithrogena nivata

LOSERS



Triclade
Crenobia alpina



Efemerottero
Rhithrogena loyolaea

WINNERS

Il degrado del permafrost e gli ecosistemi acquatici alpini

Nel 2016 alcuni corsi d'acqua alpini situati in Val La Mare, Val d'Amola e Valle di Solda, alimentati sia dalla fusione di ghiacciai e rock glacier (vedi il capitolo NEVE, GHIACCIAI E PERMAFROST) che da precipitazioni e acque sotterranee, sono stati studiati nel periodo conclusivo della stagione estiva con l'obiettivo di esplorare la composizione e la biodiversità delle comunità batteriche presenti nel cosiddetto *biofilm epilittico* (lo strato di batteri che cresce sulla superficie dei sedimenti del letto dei corsi d'acqua).

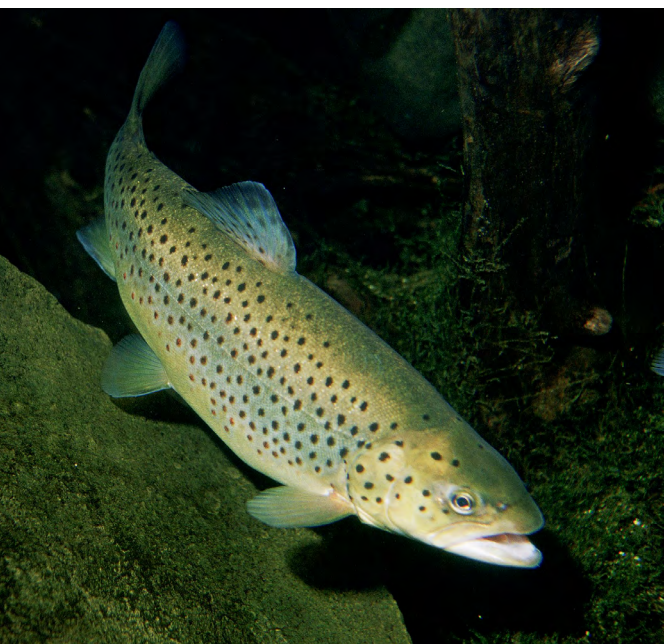
Le ricerche hanno confermato la peculiarità dal punto di vista chimico e biologico dei corsi d'acqua e delle sorgenti alimentati dalla degradazione del permafrost rispetto ai torrenti alimentati da acque di fusione glaciale e da acque sotterranee. Le acque alimentate dai *rock glacier* mostrano infatti alti valori di conducibilità elettrica e alte concentrazioni di elementi in traccia e, di conseguenza, comunità batteriche altamente diversificate, la cui composizione è correlata principalmente alla litologia del bacino di drenaggio e alle caratteristiche chimiche dell'acqua.



Noce Bianco in Val de La Mare (foto: Valeria Lencioni).

In un contesto di rapida fusione e di riduzione dei ghiacciai alpini, questi risultati suggeriscono un potenziale ruolo trainante del contributo idrologico associato alla fusione del permafrost nel modulare i futuri tratti ecologici degli ecosistemi acquatici alpini.

Laghi profondi



Trota di lago (foto: Eric Engbretson for U.S. Fish and Wildlife Service).

Anche per quanto concerne gli ecosistemi acquatici lacustri, i cambiamenti climatici modificano distribuzione delle specie, sia vegetali che animali, e composizione delle comunità, portando potenzialmente alla perdita di biodiversità. Ad esempio, l'effetto diretto delle temperature dell'acqua più elevate è particolarmente negativo per le specie ittiche caratteristiche degli habitat costituiti dalle acque fredde dei laghi alpini e sensibili alle variazioni di temperatura e ossigeno disciolto, come ad esempio la trota, che potrebbero affrontare significative riduzioni di numerosità in futuro.

L'aumento delle temperature può favorire e anticipare le fioriture algali primaverili, in particolare nei laghi e nei bacini artificiali, con un peggioramento della qualità dell'acqua e conseguenze negative su tutta la rete trofica. Tali fioriture, quando non più vitali, precipitano sul fondo dei laghi e contribuiscono ad abbattere i livelli di ossigeno disciolto in acqua, causando l'aumento delle situazioni di ipossia o anossia lacustre. Inoltre, questi fenomeni possono concorrere alla produzione di tossine dannose per gli altri organismi acquatici e, in generale, alterano gli equilibri ecologici degli ambienti lacustri.

*Planktothrix rubescens.**Tychonema bourrellyi.*

Dinoflagellate

L'interazione tra cambiamenti climatici ed eutrofizzazione nel Lago di Garda

Dopo gli anni '60 le pressioni antropiche legate ai carichi di inquinanti e nutrienti da acque reflue hanno indotto un'accelerazione dei processi di eutrofizzazione dei grandi laghi perialpini italiani, cambiando radicalmente le loro caratteristiche ecologiche. Dopo gli anni '90 il significativo riscaldamento e la maggior stabilità della colonna d'acqua hanno indotto in molti casi condizioni di meromissi (stratificazione costante) e la diminuzione della frequenza degli episodi di completo rimescolamento, con ulteriori impatti sulle comunità di fitoplancton.

Le ricerche hanno evidenziato per il Lago di Garda un forte incremento del fosforo totale disciolto fino a metà degli anni 2000, seguito da una tendenza di diminuzione di lungo termine, e temperature dell'acqua in continuo aumento. Questo ha favorito una fase di eutrofizzazione, con la proliferazione di cianobatteri della specie *Planktothrix rubescens* che produ-

cono biotossine come la microcistina, seguito da un loro rapido declino. Le condizioni oligotrofiche (ossia di scarsità di nutrienti) instauratesi in seguito, sia a causa della riduzione dei carichi antropici che della riduzione degli episodi di rimescolamento profondo del lago (l'ultimo risale al 2006), hanno causato il declino della *Planktothrix rubescens*, che è stata parzialmente sostituita da un'altra specie di cianobatteri, *Tychonema bourrellyi*, che produce anatossina-a e homoanatossina-a, due potenti neurotossine. Il progressivo riscaldamento ha inoltre favorito un maggior sviluppo di dinoflagellate e criptofite, specie per lo più unicellulari di alghe flagellate, fortemente adattate alla crescita negli ambienti lacustri caldi e poveri di nutrienti. Mentre l'eutrofizzazione si sta attualmente riducendo grazie al processo di oligotrofizzazione degli strati più superficiali, nuove pressioni stanno emergendo anche a causa dei cambiamenti climatici, come la comparsa e la stabilizzazione delle specie alloctone di pesci, crostacei e molluschi.

L'aumento delle temperature dell'acqua, della velocità di degradazione della materia organica disciolta e, di conseguenza, delle fioriture estive di cianobatteri (batteri fotosintetici di ambiente acquatico, un tempo erroneamente chiamati "alghe azzurre") possono causare danni anche gravi alle popolazioni di macrofite (la vegetazione acquatica), così come alla fauna acquatica e litorale. I cianobatteri sono infatti in grado di produrre tossine, come la anatossina-a, appartenente alla categoria delle neurotossine, o la microcistina, del gruppo delle epatotossine.

I cambiamenti climatici comportano inoltre l'alterazione sia dei cicli idrologici che bio-geochimici dei sistemi costituiti dai bacini lacustri e da quelli idrografici a monte dei primi. L'impatto idrologico sui livelli delle acque dei laghi è particolarmente rilevante per

la funzionalità degli ecosistemi litorali, per il flusso di sedimenti e per il ciclo dei nutrienti.

Una delle conseguenze del riscaldamento delle acque lacustri è la diminuzione della frequenza degli episodi di rimescolamento verticale nei mesi invernali e il rafforzamento delle condizioni di *meromissi*, ossia di stratificazione pressoché costante, nei laghi profondi. Questo comporta l'inibizione dei meccanismi di rilascio dei nutrienti dal fondo verso gli strati superficiali e quindi la diminuzione della loro disponibilità per gli organismi che vi si sviluppano.

D'altra parte, l'alterazione dei regimi di precipitazione e, in particolare, della frequenza e dell'intensità dei fenomeni di precipitazione estrema, ha come effetto quello di cambiare la stagionalità dei carichi di so-



Lago di Serraia con fioritura algale estiva (foto: APPA).

stanze nutrienti e inquinanti. Eventi di forte dilavamento dai territori circostanti possono essere all'origine dell'apporto di alti carichi di nutrienti nei corpi lacustri e quindi di fioriture algali improvvise.

I diversi impatti descritti concorrono ad alterare gli equilibri delle comunità biologiche e a modificare gli areali di distribuzione e la numerosità delle specie vegetali e animali nei laghi trentini, con la riduzione o la scomparsa di specie precedentemente presenti e la possibile comparsa di nuove specie, anche non autoctone e potenzialmente invasive. Le dinamiche che intercorrono tra le diverse specie nella catena trofica ne risultano di conseguenza modificate, con la possibile compromissione di alcuni fondamentali servizi ecosistemici acquatici.

*Il fenomeno di eutrofizzazione del Lago di Serraia (Baselga di Piné), legato in primis agli eccessivi carichi di nutrienti presenti nelle sue acque, ha radici lontane nel tempo. Nell'estate 2023 le condizioni di eutrofizzazione si sono aggravate, anche a causa delle elevate temperature che si sono prolungate fino all'autunno. A dominare la fioritura algale è stata per la prima volta la *Microcystis aeruginosa*, un cianobatterio particolarmente pericoloso per gli ecosistemi d'acqua dolce. Il Lago di Serraia rappresenta un esempio di come i cambiamenti climatici possano contribuire ad aggravare ulteriormente gli effetti della contaminazione di origine antropica.*

Laghi d'alta quota e piccole zone umide



Una minor alimentazione idrica, legata all'alterazione dei sistemi glaciali e delle precipitazioni sia liquide che nevose, associata a temperature più elevate, quindi a una maggior evaporazione, potrebbe causare in futuro la progressiva riduzione dei laghi alpini, in particolare di quelli di piccole dimensioni alle quote più alte, fino ad arrivare in alcuni casi alla completa scomparsa. Questo indurrebbe dapprima importanti variazioni della composizione delle comunità vegetali e animali che li popolano e la colonizzazione

Lago Serodoli Medio (in primo piano, 2379 m s.l.m.) e Lago Serodoli (sullo sfondo, 2371 m s.l.m.; foto: Valeria Lencioni).

da parte di specie caratteristiche delle basse quote, fino alla perdita definitiva di specie e habitat pregiati. Analogamente, anche alcuni ambienti ed ecosistemi tipici delle piccole zone umide, come stagni e torbiere, potrebbero andare incontro in futuro alla completa scomparsa a causa dei cambiamenti climatici.

Questi cambiamenti incidono sugli anfibi in maniera meno severa rispetto ai pesci, ma ne condizionano sia il periodo riproduttivo che l'attività in fase terrestre. Studi recenti indicano che le estati sempre più calde hanno un forte impatto sui girini, che a differenza degli adulti, sono completamente acquatici. Se il prosciuga-

mento estivo degli stagni e dei laghetti alpini (tipicamente stagionali e alimentati dalla fusione nivale) in cui si schiudono i girini, accelera a causa dei cambiamenti climatici, essi non faranno in tempo a metamorfosare e andranno incontro a morie di massa, e nemmeno gli anfibi adulti saranno al sicuro. È possibile che anche le temperature invernali più calde danneggino gli anfibi: normalmente essi vanno in ibernazione per tutto l'inverno, ma i picchi di calore invernali potrebbero risvegliarli temporaneamente, facendo loro consumare calorie che non potranno recuperare fino alla scomparsa della neve.

Gli effetti dei cambiamenti climatici sul Lago di Tovel

Il monitoraggio a lungo termine del Lago di Tovel, nel territorio del Parco Naturale Adamello-Brenta, ha evidenziato come il passaggio da una ricarica idrologica nivale ad una prevalentemente pluviale abbia aumentato la temperatura dell'acqua di questo lago, che è fortemente influenzato da sorgenti sotterranee.

Studi condotti a Tovel hanno inoltre evidenziato che la copertura della superficie del lago da parte del ghiaccio ritarda di circa 5 giorni ogni decade per le temperature autunnali in aumento, con una riduzione complessiva di circa tre settimane dalla metà degli anni '80. Questo ritardo nella formazione del ghiaccio superficiale ha forti ripercussioni sulle dinamiche di mescolamento degli strati profondi del lago. Contrariamente alla maggior parte dei laghi temperati, i cambiamenti climatici hanno causato l'aumento della profondità di rimescolamento

del Lago di Tovel, trasformandolo da *meromittico* (soggetto a stratificazione costante e assenza di mescolamento profondo) a *dimittico* (soggetto a rimescolamento delle acque due volte all'anno), con la conseguenza di una maggior ossigenazione del fondale che è fondamentale per la vita della fauna ittica che lo popola, in particolare per i salmerini che richiedono alte concentrazioni di ossigeno.

Anche la tendenza nel lungo periodo ad una maggior prevalenza di ghiaccio "nero", derivante dal diretto congelamento dell'acqua, rispetto al ghiaccio "bianco", che deriva da processi di congelamento e fusione delle precipitazioni nevose, potrà influenzare in futuro fenologia e composizione del plancton lacustre e quindi tutta la catena trofica del Lago di Tovel. Il ghiaccio "nero", infatti, meno opaco e più trasparente del "bianco", lascia filtrare una maggior quantità di luce solare al di sotto della superficie ghiacciata a beneficio degli organismi fotosintetici.



Ecosistemi terrestri

Gli habitat alpini sono particolarmente vulnerabili agli effetti dei cambiamenti climatici e ambientali, che stanno mostrando impatti significativi su distribuzione e composizione della flora e della fauna terrestri.



I cambiamenti climatici stanno incidendo in particolare sulla distribuzione e sulla composizione della flora e della fauna degli ecosistemi terrestri, causando spostamenti verso nord e verso quote più elevate. Questo porta a una variazione degli areali di distribuzione delle specie, ad una riduzione e frammentazione dell'estensione degli habitat man mano che ci si alza di quota e al potenziale rischio di estinzione locale di specie caratteristiche tra cui quelle endemiche.

Gli ecosistemi terrestri alpini si stanno rivelando più vulnerabili rispetto ad altri ambienti e mostrano cambiamenti molto rilevanti in termini di struttura e funzionalità. In alta quota, in particolare, anche modesti aumenti della temperatura media annuale stanno apportando profondi cambiamenti, soprattutto per la componente floristica e faunistica criofila (ovvero che predilige le basse temperature e che vive in ambienti dominati dalla presenza di permafrost o in prossimità dei ghiacciai).

Gli effetti dei cambiamenti climatici si sommano alle alterazioni che gli ambienti alpini hanno subito nel tempo, avendo l'uso antropico del territorio e, in altri casi, l'abbandono, condizionato profondamente le dinamiche ecosistemiche nelle diverse epoche.

A partire dagli anni Cinquanta il mosaico ecosistemico degli ambienti montani è cambiato molto: l'aumento della copertura e della biomassa forestale, la modifica della composizione e della struttura dei boschi e la riduzione (o perdita in alcuni casi) degli habitat di aree aperte (quali pascoli, prati e radure) hanno modificato gli equilibri. L'impatto antropico legato all'utilizzo diffuso del territorio ha recentemente lasciato il posto a quello del turismo, un impatto stagionale spesso molto concentrato in alcune aree di interesse (piste da sci, sentieri, ecc.). Questo, assieme al cambiamento di qualità e quantità della copertura forestale, ha influenze sulla connettività ecologica e di conseguenza sulla composizione faunistica.

Inoltre, a causa delle variazioni climatiche alcuni ambienti sono sempre più vulnerabili all'ingresso di specie animali e vegetali alloctone invasive, con conseguente impoverimento strutturale e funzionale degli ecosistemi. Anche le modificazioni dei cicli fenologici (i cicli vitali degli organismi viventi), in particolare delle specie vegetali, causate dalle variazioni di temperatura e precipitazione, stanno influenzando le interazioni tra specie, andando ad alterare le dinamiche di impollinazione e la disponibilità di cibo.



Cerastio unifloro o peverina dei ghiaioni (*Cerastium uniflorum*) specie d'alta quota che colonizza ghiaioni e pietraie sopra il limite degli alberi. (Foto: Osvaldo Negra, Archivio MUSE).

Immagine in alto a sinistra: Lepre alpina o variabile (*Lepus timidus*) vive ad altitudini elevate in ambienti erbosi-pietrosi, ha due mute del mantello annuali, grigio-bruno in estate e bianco in inverno. (Foto: Osvaldo Negra, Archivio MUSE).

Impatti sulla flora

I territori alpini come il Trentino sono tra le aree ad alto rischio di perdita di biodiversità per effetto dei cambiamenti climatici. Nei prossimi decenni si prevede l'accelerazione di alcuni impatti già osservati quali: la modificazione delle fasi fenologiche (ossia gli stadi del ciclo vitale) con l'anticipazione delle fioriture di molte piante e il prematuro riavvio del periodo vegetativo; la risalita di specie vegetali che, essendo più adatte ai climi freddi,

Il progetto GLORIA – *Global Observation Research Initiative in Alpine Environments*

Il progetto GLORIA è un'iniziativa di ricerca basata su una rete globale di osservazioni a lungo termine, con siti permanenti in ambiente alpino. Le regioni di alta montagna ospitano un numero notevole di specie endemiche altamente specializzate e adattate al freddo. Si tratta quindi di ecosistemi fragili fortemente minacciati dal rapido riscaldamento climatico. I progetti di monitoraggio risultano quindi fondamentali per determinare entità e direzione dei cambiamenti delle diverse componenti della biodiversità nelle principali zone climatiche della Terra. Nell'ambito di questo progetto uno studio focalizzato sull'ambiente italiano riporta che nei primi 20 anni di monitoraggio sono stati osservati cambiamenti nella copertura vegetale, nella ricchezza di specie e nel grado di termofilizzazione della flora, con perdite locali di biodiversità vegetale in tutte le montagne italiane, incluse le Dolomiti.

cercheranno gli habitat ottimali a quote maggiori, andando incontro alla possibile flessione della popolazione o anche all'estinzione locale; l'innalzamento del limite degli alberi (la cosiddetta *treeline*) e i cambiamenti nella composizione delle foreste (vedi capitolo *FORESTE*); le variazioni di diversi habitat in termini di struttura, distribuzione e produttività; la maggior diffusione di fitopatie forestali a causa dello stato di stress idrico o termico a seguito di eventi meteorologici estremi; la maggior diffusione di specie aliene (ossia *alloctone*) ed invasive.

Lo spostamento in quota delle specie

Uno degli effetti più evidenti del riscaldamento in atto è l'arricchimento della flora sommitale alpina, con la tendenza ad un'accelerazione del tasso di aumento della ricchezza di specie vegetali correlata all'accelerazione osservata per le temperature.

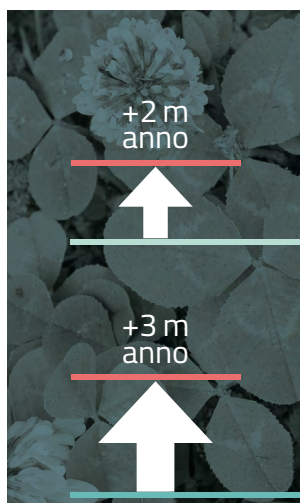
Una base dati di oltre 1 milione di campioni di quasi 1.500 specie vegetali, raccolti dalla Fondazione Museo Civico di Rovereto tra il 1990 e il 2019, ha consentito di valutare come diversi gruppi di specie reagiscono al riscaldamento globale e all'intensificarsi dell'utilizzo di suolo. Si sono osservati, in particolare, gli spostamenti altitudinali dei margini caldi e freddi per tre gruppi: le specie native comuni (circa 1.300 specie, tra le quali il *Trifolium repens* o trifoglio bianco), le specie native rare (quasi 100 specie tra quelle classificate come minacciate o in pericolo secondo la Lista rossa dell'Unione Internazionale per la Conservazione della Natura; ad esempio *Adonis aestivalis* o

adonide estiva) e le specie aliene (quasi 50 specie, tra cui *Sorghum halepense* o sorgo selvatico).

Per le specie native comuni il margine freddo (o anteriore) e caldo (o posteriore) si sono spostati entrambi verso l'alto, mentre l'intervallo di altitudine di presenza delle specie rare si è ridotto più di quello delle specie comuni, con il margine freddo rimasto quasi invariato e quello caldo alzatosi più velocemente che per le specie comuni. Le specie aliene sono le uniche ad aver espanso il loro areale, con il margine caldo sostanzialmente invariato e quello freddo in rapido avanzamento.

La maggior parte delle specie autoctone e la grande maggioranza delle specie aliene si sono così adattate alle temperature mediamente più elevate, ma solo quelle aliene hanno mostrato grande capacità di competere e prosperare nelle condizioni create dall'espansione dei terreni ad uso agricolo verso l'alto.

Specie native comuni



Specie native rare



Specie aliene



Spostamento altitudinale degli areali delle specie floristiche alpine

MARGINE FREDDO

MARGINE CALDO

I ritrovamenti da record della flora della Lobbia Alta

Secondo uno studio effettuato nel Parco Naturale Adamello-Brenta sulla vetta della montagna della Lobbia Alta (3.196 m s.l.m.), per la quale è disponibile un inventario floristico completo delle *tracheofite* (piante caratterizzate dalla presenza di elementi vascolari, tra le quali rientra la famiglia delle *Orchidacee*), risulta che tra il 1935 e il 2021 il numero di specie presenti su questa vetta sia triplicato, passando da 17 a 51, con un'accelerazione negli ultimi anni.

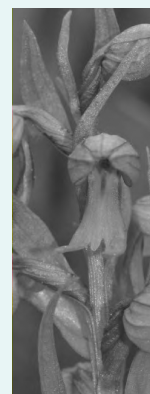
Ben 6 specie hanno raggiunto il loro record di altitudine nelle Alpi proprio sulla Lobbia Alta, suggerendo che quest'area è particolarmente incline all'ascensione delle specie.

Nel 2021 l'orchidea selvatica *Coeloglossum viride* è stata scoperta poco sotto la cima, a 3.144 e 3.150 m s.l.m., stabilendo il nuovo record altitudinale per un'orchidea spontanea in Europa. Quelli precedenti appartenevano sempre al *Coeloglossum viride*, trovato sul Monte Unterrothorn (Svizzera) a 3.092 m s.l.m. nel 2016, e alla *Nigritella rhellicani* (nigritella comune), trovata nel 2017 a 3.002 m s.l.m. in Alto Adige.

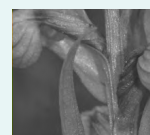
Spostamento in quota delle tracheofite.

Specie presenti in vetta nel 1935 e nel 2021:

51



17



1935

2021

Gli impatti del ritiro dei ghiacciai

Il ritiro dei ghiacciai comporta un profondo cambiamento nella biodiversità d'alta quota, con il rischio dell'estinzione a scala locale delle specie criofile, la cui sopravvivenza è legata anche alla presenza di ghiacciai neri (coperti da detriti rocciosi) e ghiacciai rocciosi (conosciuti come *rock glaciers*; vedi capitolo NEVE, GHIACCIAI E PERMAFROST) che fungono da aree di rifugio.

Il ritiro dei ghiacciai lascia inoltre progressivamente libere aree note come proglaciali, la cui osservazione permette di comprendere i modelli di colonizzazione

delle specie, la formazione delle comunità e le dinamiche delle successioni vegetazionali.

L'accelerazione della velocità di colonizzazione da parte delle cosiddette piante "pioniere" nelle aree proglaciali a causa del riscaldamento in atto è evidente. Già dopo pochi anni dal ritiro del ghiacciaio, queste sono in grado di colonizzare terreni con una bassissima disponibilità di nutrienti. La loro sopravvivenza nelle prime fasi è favorita dalla cooperazione tra specie vegetali che si aggregano, mentre più avanti si stabiliscono successioni di comunità vegetali caratteristiche dei primi



+ 0,61
specie all'anno

● 19 nuove specie
○ 2 specie scomparse



Il processo di colonizzazione delle morene glaciali dell'Amola e del Nardis

La Fondazione Museo Civico di Rovereto ha monitorato l'evoluzione del processo di colonizzazione primaria degli ambienti d'alta quota e periglaciali dal 1991 al 2019, grazie a rilevamenti svolti nelle aree moreniche dei ghiacciai dell'Amola e del Nardis nel gruppo montuoso della Presanella.

stadi di sviluppo di un ecosistema. In questo momento la biodiversità vegetale è massima e il terreno inizia ad essere più maturo, quindi più ricco di sostanza organica e di nutrienti, nonché maggiormente stabilizzato.

Per anni si è pensato che le piante colonizzassero per prime le aree di recente deglaciazione. Studi recenti hanno invece dimostrato come batteri, alghe, muschi,

funghi e, a seguire, artropodi siano gli organismi che per primi conquistano questi substrati vergini. Tra gli artropodi, i collemboli, i coleotteri carabidi e i ragni dominano le prime fasi di evoluzione e sono in relazione trofica (ossia relativa alla nutrizione) tra loro. A loro volta coleotteri e ragni diventano prede per micro-mammiferi e uccelli d'alta quota.

Impatti sulla fauna

Tra i numerosi effetti osservati sulla fauna alpina emerge la tendenza di molte specie di mammiferi, uccelli e artropodi a spostarsi verso nord e verso quote maggiori, come per le specie vegetali, con riduzione e frammentazione del loro areale preferenziale. A questo conseguono modifiche comportamentali, della distribuzione delle popolazioni e della diversità genetica, con effetti sulla capacità adattiva e di combattere patogeni.

I cambiamenti nella struttura degli habitat, così come nella disponibilità e reperibilità di cibo e altre risorse, stanno influenzando le dinamiche delle popolazioni.

Si sono osservati cambiamenti morfologici, nel peso corporeo e nella fecondità di molti mammiferi, nonché alterazioni dei periodi di attività e riproduzione di molte specie di uccelli, anfibi e artropodi. Ad esempio, l'anticipazione degli arrivi di molte specie di uccelli migratori, della riproduzione di molti anfibi e dello sviluppo dello stadio adulto di molti insetti (tra i quali anche gli impollinatori) sono ormai comuni. La presenza in aumento di nuove specie aliene invasive, inclusi parassiti e patogeni, contribuisce ad un maggior rischio di estinzione di popolazioni e specie autoctone.

Mammiferi

I grandi erbivori alpini hanno sviluppato meccanismi fisiologici e comportamentali per far fronte alle fluttuazioni del clima e alla disponibilità di risorse, che tendono tuttavia a non essere più adeguati a causa del rapido riscaldamento.

L'osservazione del comportamento delle femmine di stambecco (*Capra ibex*) sulle pendici meridionali del massiccio della Marmolada (1.700-2.900 m s.l.m.) ha rivelato come in estate gli stambecchi si spostino più

in alto rispetto alle giornate più fresche e compensino anticipando o ritardando il pascolo nel corso della giornata in presenza di temperature al di sopra della soglia di circa 13-14 °C. Soprattutto le femmine riproduttive diminuiscono fortemente l'attività diurna e rimangono ad altitudini maggiori. Il superamento con maggior frequenza della temperatura critica in futuro limiterà ulteriormente verso l'alto l'habitat disponibile per il riparo termico.

Anche le popolazioni di altri ungulati tendono a modificare i propri spostamenti altitudinali in relazione alle variazioni climatiche. Il capriolo (*Capreolus capreolus*), ad esempio, in presenza di innalzamento del limite delle nevicate e di una minor permanenza della neve al suolo riesce potenzialmente ad occupare aree libere dalla neve a quote più elevate, a volte anche rimanendo tutto l'anno nell'areale estivo, senza cioè compiere la migrazione autunnale verso valle. Questo, tuttavia, espone le popolazioni di capriolo alle possibili conseguenze negative indotte da nevicate tardive.

I cambiamenti climatici influenzano indirettamente anche le dimensioni corporee dei mammiferi alpini, poiché alterano disponibilità e qualità delle risorse rispetto a momenti chiave dell'esistenza, quali la riproduzione e le nascite. Ad esempio, è stato osservato un decremento nel peso dei piccoli in alcune popolazioni trentine di camoscio (*Rupicapra rupicapra*), dovuto alla combinazione di un forte aumento della densità di popolazione e dell'anticipo delle condizioni primaverili, non più sincronizzate con il momento delle nascite, con il risultato di un accesso limitato a un foraggio di maggior qualità.



Camoscio (*Rupicapra rupicapra*). (Foto: Alessandro DeGuelmi, Archivio MUSE).

Uccelli



Civetta capogrosso (*Aegolius funereus*). (foto: Carlo Frapporti, Archivio MUSE).

Il cambiamento climatico può influenzare anche le comunità ornitiche delle varie fasce altitudinali, agendo spesso in sinergia con trasformazioni ambientali già in atto (ad esempio l'abbandono dei pascoli d'alta quota) e amplificandone gli effetti.

Se da un lato le specie di ambiente forestale saranno in generale favorite dall'aumento della copertura forestale (vedi capitolo FORESTE), dall'altro potranno essere favorite alcune specie più generaliste (che si adattano facilmente a diversi ambienti e non sono legate a un'unica risorsa alimentare) a scapito di altre. Il MUSE ha studiato le distribuzioni future di quattro specie ornitiche che nidificano in cavità sull'intero arco alpino, ipotizzando che il cambiamento climatico avrà un impatto sia a livello di singola specie che di comunità: la potenziale sovrapposizione degli areali, rilevante per le interazioni tra le specie, cambierà in futuro. Ad esempio, la civetta capogrosso (*Aegolius funereus*), una tra le specie più sensibili ai cambiamenti climatici, si ritirerà e la sovrapposizione dell'areale con il suo principale predatore, l'allocco (*Strix aluco Linnaeus*), aumenterà nell'area idonea rimanente.

Le specie della fascia alpina, invece, dovranno confrontarsi con il restringimento, già in atto, delle praterie d'alta quota. Le previsioni future indicano una progressiva diminuzione dell'areale di distribuzione e della connettività per diverse specie alpine, assieme a una sempre maggiore sovrapposizione delle aree idonee per queste specie con quelle idonee alle attività

ricreative invernali. Una tra le specie più minacciate è il fringuello alpino *Montifringilla nivalis*, per il quale diversi studi indicano effetti diretti negativi su sopravvivenza, strategie di movimento e interazioni sociali.



Anche le specie legate ai prati da fieno subiscono, e subiranno sempre più in futuro, il duplice impatto dei cambiamenti climatici e delle trasformazioni socio-economiche del territorio di montagna. Indagini e monitoraggi condotti dal MUSE nell'ambito della Rete Natura 2000 a partire dal 2012 hanno dimostrato come le profonde trasformazioni dei prati da fieno abbiano un forte impatto sull'avifauna nidificante e sulla biodiversità.

Fringuello alpino (*Montifringilla nivalis*). (foto: Mauro Mendini), Archivio MUSE.

Artropodi

Il riscaldamento in atto sta spingendo gli habitat di alcune specie criofile (adatte alle basse temperature) verso quote più elevate, a vantaggio invece di taxa più competitivi, quali specie termofile e xerofile (che tollerano bene le temperature elevate e la siccità).

Per esempio nelle Dolomiti di Brenta il limite inferiore dell'areale del coleottero *Nebria germarii* si è innalzato di circa 350 m nell'arco di 90 anni, il suo areale si è dimezzato e frammentato e tale specie, che si è rivelata un'ottima sentinella degli effetti dei

cambiamenti climatici, è oggi estinta nelle praterie d'alta quota, che, fino ai primi anni '80 del secolo scorso, erano uno degli habitat in cui risultava più abbondante.

Secondo la letteratura recente, cambiamenti simili sono documentati in molti altri taxa e potrebbero portare all'estinzione locale o globale di taxa specializzati ed endemici delle aree montane.

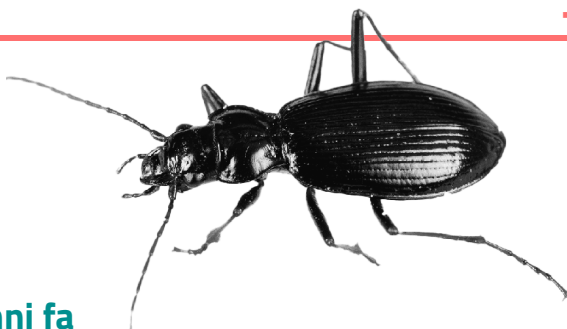
Lo spostamento del coleottero *Nebria germarii*.

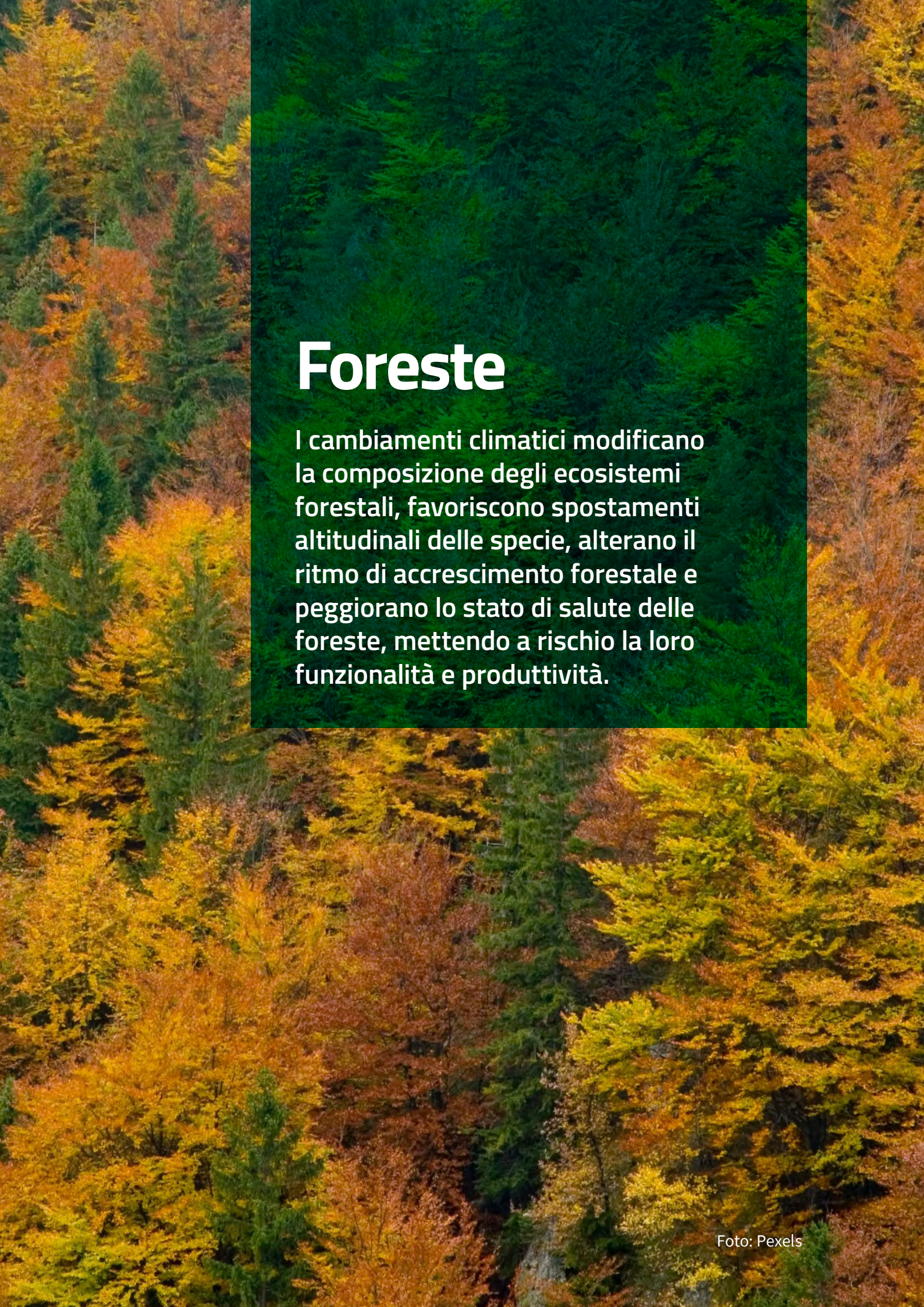
Nelle Dolomiti di Brenta risulta che, nell'arco di 90 anni, il limite inferiore dell'areale di questa specie si sia spostato verso l'alto di circa 350 m e la sua distribuzione areale si sia dimezzata e frammentata, con l'estinzione nelle praterie d'alta quota.

oggi

+350 m

90 anni fa



An aerial photograph of a forest. A large, dense, dark green coniferous forest canopy occupies the upper central portion of the image. Surrounding this central area are numerous deciduous trees with vibrant autumn foliage in shades of yellow, orange, and brown. The perspective is from directly above, looking down on the forest canopy.

Foreste

I cambiamenti climatici modificano la composizione degli ecosistemi forestali, favoriscono spostamenti altitudinali delle specie, alterano il ritmo di accrescimento forestale e peggiorano lo stato di salute delle foreste, mettendo a rischio la loro funzionalità e produttività.

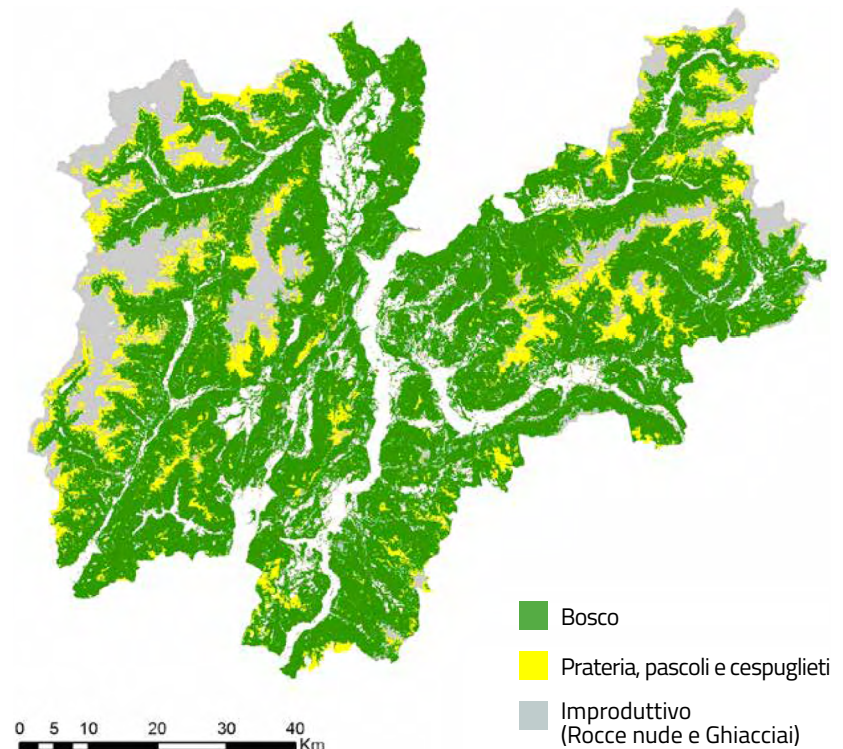
Le foreste costituiscono un elemento identitario per la Provincia di Trento di notevole valore ambientale, innanzitutto per la loro estensione: i boschi trentini ricoprono infatti una superficie di 391.781 ettari, pari al 63% del territorio provinciale, con un tasso di crescita annuale della superficie forestale pari a circa +0,1%.

La categoria forestale dominante è quella dei boschi di abete rosso, che occupano circa il 31% della superficie forestale, seguite dai larici-cembreti con il 16,2% e dalle faggete con il 15,1%.

Gli effetti dei cambiamenti climatici hanno diverse ripercussioni sulle foreste. Si possono distinguere effetti diretti e improvvisi come quelli causati da eventi siccitosi, forti venti, schianti da neve, proliferazioni di insetti e malattie fungine. Ma anche effetti progressivi correlati all'aumento della temperatura e alle variazioni del regime delle precipitazioni, come ad esempio l'alterazione dell'accrescimento degli alberi, l'innalzamento del limite del bosco,

l'allungamento della stagione vegetativa, l'ingresso di specie invasive e l'alterazione del ciclo del carbonio.

Suddivisione dell'uso del suolo montano in Trentino (dato aggiornato al 2018; fonte: Servizio foreste e fauna PAT).



Gli impatti sull'accrescimento e sulle dinamiche forestali

Nelle foreste dell'Europa meridionale, ma in parte anche in quelle dell'Europa centrale e settentrionale, diversi studi indicano come le condizioni di crescita possano peggiorare per l'aumento delle temperature e la minore disponibilità di acqua nel suolo durante la stagione vegetativa. Il risultato è una riduzione della crescita e, per alcune specie, un aumento del rischio di mortalità. Questi aspetti emergono in modo coerente sia nelle foreste gestite dall'uomo che in quelle ad evoluzione naturale. Le riduzioni della capacità di adattamento degli ecosistemi forestali sono statisticamente collegate a bruschi cali della produttività primaria delle foreste, che si verificano in risposta a una lenta deriva verso una soglia critica di resilienza. L'insieme di questi segnali rivela una tendenza futura

di diffuso declino della capacità delle foreste di resistere alle perturbazioni.

Un numero crescente di evidenze suggerisce che sono in atto processi di espansione verso l'alto del limite del bosco (la cosiddetta *treeline* o *linea degli alberi*) e di innalzamento degli areali di vegetazione in risposta al cambiamento climatico, con modifiche della distribuzione altitudinale delle specie. Tuttavia, diversi studi pongono in evidenza come i segnali del cambiamento climatico possano essere confusi con alcuni effetti delle attività umane; ad esempio, lo spostamento del limite altitudinale degli alberi è da ascrivere all'accoppiamento degli effetti climatici e del fenomeno di abbandono dei pascoli di alta montagna.

Cambiamenti climatici e defogliazione

Un recente studio svolto nell'ambito del progetto "LIFE MODERn(NEC) - new MONitoring system to Detect the Effects of Reduced pollutants emissions resulting from NEC Directive adoption" riporta i risultati del monitoraggio estensivo della salute delle foreste italiane effettuato grazie alla rete di monitoraggio nazionale di Livello I del programma Europeo ICP Forests, analizzando la defogliazione media delle varie specie forestali per il periodo 2010-2022.

La defogliazione delle foreste italiane è andata aumentando in maniera significativa nel periodo di analisi, con picchi nel 2012, 2017 e nel biennio 2021-2022 che corrispondono ad anni siccitosi e ad at-

tacchi di insetti e patogeni particolarmente estesi e intensi. Le conifere, maggiormente concentrate nelle Alpi, hanno mostrato in generale un livello di defogliazione inferiore rispetto alle latifoglie. Solo negli ultimi anni (2021-2022) la defogliazione nelle conifere ha raggiunto valori simili, e in alcuni casi anche maggiori. Il peggioramento delle condizioni delle conifere nell'arco alpino può essere messo in stretta relazione alle conseguenze della tempesta Vaia del 2018 e agli attacchi di bostrico che ne sono seguiti; tuttavia, il fatto che il peggioramento interessi anche il larice alle quote più alte suggerisce un ruolo rilevante anche per le anomalie climatiche di temperatura e precipitazione e l'intensa siccità che hanno caratterizzato in particolare il 2022.

I danni da eventi estremi

Le variazioni in frequenza e intensità dei fenomeni estremi legati alle precipitazioni, alle temperature e al vento, stanno determinando impatti negativi sul settore forestale anche in Trentino (vedi capitoli PRODUTTIVITÀ FORESTALE E FILIERA e PERICOLI NATURALI). Tali effetti sono apparsi con particolare evidenza a seguito dell'eccezionale evento della tempesta Vaia verificatosi nell'ottobre 2018, quando forti venti e piogge intense hanno provocato lo schianto di milioni di alberi e la distruzione di decine di migliaia di ettari di foreste alpine di conifere (in particolare di abeti rossi), configurandosi come un vero e proprio disastro ecologico.

Si stima che in Europa, durante gli ultimi decenni, le maggiori cause di danni alle foreste siano rappresentate dalle tempeste di vento e dagli incendi boschivi, che localmente ammontano anche a più del 50% dei danni complessivi.

I danni da vento

I danni da vento sono probabilmente destinati ad aumentare a causa del generale riscaldamento, che accorcia la durata delle condizioni di terreno gelato, che consente un migliore ancoraggio al suolo delle piante dal tardo autunno all'inizio della primavera. In aggiunta, l'imbibizione del suolo nel tardo autunno, che andrà probabilmente aumentando per l'aumento delle precipitazioni in tale stagione, potrà indebolire il radicamento degli alberi al suolo, rendendo più vulnerabili le foreste, in particolare le formazioni di abete rosso che sono caratterizzate da un apparato radicale più superficiale.

I danni da incendi

L'attuale regime degli incendi a livello provinciale mostra un picco principale nel periodo invernale seguito da un picco secondario nel periodo estivo (fonte: Piano per la difesa dei boschi dagli incendi della Provincia di Trento, 2010). Il cambiamento climatico può influire sulla frequenza degli incendi forestali: le temperature più elevate e l'aumento della frequenza e della gravità dei periodi di siccità estiva in futuro potrebbero infatti favorire l'innescio e la diffusione di questi fenomeni, inducendo danni più gravi e più frequenti (vedi capitolo PERICOLI NATURALI).



I danni forestali causati dalla tempesta Vaia (Foto: Roberto Barbiero).

I danni forestali causati dalla tempesta Vaia

La tempesta Vaia del 28-29 ottobre 2018 costituisce il primo esempio documentato di danni da vento su grande scala nel versante meridionale delle Alpi. Nelle regioni colpite, tra le quali la Provincia di Trento, sono stati interessati oltre 38 mila ettari di superficie con un volume forestale danneggiato pari a circa 16,5 milioni di metri cubi. La gravità del danno da vento è stata in parte aggravata dall'elevata quantità di precipitazioni cadute nei giorni precedenti, che hanno ulteriormente indebolito la resistenza degli apparati radicali.

I danni da nevicata

Se paragonati ai danni causati dal vento, i danni causati dalla neve sono in genere meno gravi: quantità eccessivamente abbondanti di neve provocano la rottura dei fusti oppure la loro inclinazione o flessione. Particolarmente esposti a tali fenomeni sono i pini silvestri, i larici o le latifoglie con un elevato rapporto tra altezza e diametro, indice di scarsa stabilità individuale e di minore resistenza alle sollecitazioni fisiche. La carenza di diradamenti, che riducono la densità degli alberi nelle fasi di crescita giovanile e stabiliz-

zano i popolamenti, accentua questo pericolo. Anche per gli schianti dovuti alla neve, il terreno gelato ha invece il ruolo di favorire l'ancoraggio al suolo. In futuro, con l'aumento delle temperature e la riduzione dei periodi con terreno gelato durante l'inverno, è possibile che aumenti questa tipologia di danno; tuttavia le nevicatae mostrano tendenze negative, in particolare, alle quote minori, che potrebbero condurre al contrario a minori danni forestali di questo tipo.

Impatti biotici: diffusione di patogeni e malattie

I maggiori fattori di stress indotti dai cambiamenti climatici, come la siccità e gli schianti da neve o da vento, predispongono gli alberi all'attacco di diversi patogeni, influenzandone la sporulazione e la dispersione o innescando migrazioni che possono aumentare sia l'incidenza della malattia che l'areale geografico colpito. Possono infine comparire nuove minacce su questo fronte, anche a seguito del cambiamento nella com-

posizione delle specie arboree forestali o dell'arrivo e della diffusione di specie invasive.

L'aumento delle pullulazioni di bostrico è una tra le più evidenti minacce nell'immediato futuro per le foreste trentine, sia a causa delle mutate condizioni climatiche che ne favoriscono la diffusione, sia per il probabile aumento della frequenza di disturbi da vento e da neve.

Lo sviluppo epidemico delle popolazioni di bostrico è favorito dalle temperature elevate, che permettono lo sviluppo di due generazioni all'anno anche a quote superiori ai 1500 m, ma anche dalla scarsità delle precipitazioni nel periodo tra aprile e luglio dell'anno precedente, sempre più frequente, e dal verificarsi in precedenza di schianti da neve o da tempeste.

La tempesta Vaia, oltre ad aver causato ingenti danni diretti, ha creato quindi le condizioni ideali per la grave infestazione da bostrico ancora in corso nei boschi del Trentino orientale. Nonostante gli interventi di prevenzione e pulizia delle aree colpite, le popolazioni di questo coleottero hanno continuato a crescere e a causare danni in tutte le regioni interessate dal 2019 in poi, con danni che ad oggi ammontano ad un volume di circa 7 milioni di metri cubi. Il Servizio foreste della PAT, in collaborazione con la Fondazione E. Mach, ha monitorato la situazione usando trappole a feromoni per osservare la dinamica delle popolazioni e cercare di prevedere l'evoluzione delle infestazioni in un ambiente in continua evoluzione a causa dei cambiamenti climatici. Anche la siccità che ha colpito il Trentino nel corso del 2022 ha infatti contribuito ulteriormente al proliferare del bostrico nei boschi danneggiati da Vaia.

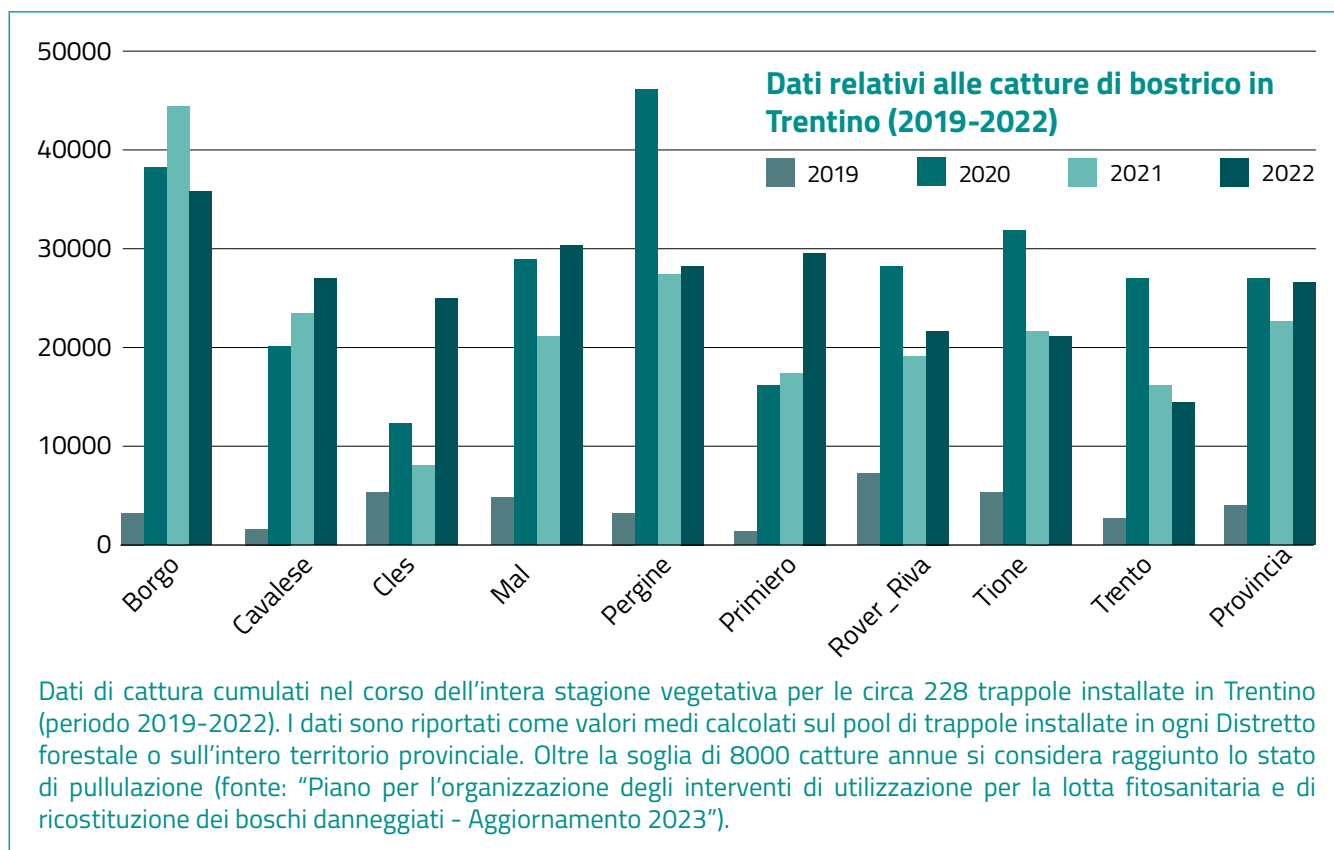
Il bostrico tipografo *Ips thypographus* è un piccolo coleottero presente naturalmente nei boschi di abete rosso dell'arco alpino, scava gallerie sotto la corteccia interrompendo il flusso della linfa, portando in poco tempo a morte le piante. Negli ultimi dieci anni i disturbi dovuti a questo coleottero sono aumentati in tutta Europa e il numero di piante da esso danneggiate è cresciuta quasi del 70% negli ultimi 40 anni.



Bostrico tipografo *Ips thypographus* (foto: Wikimedia Commons).



I danni causati dal bostrico nelle foreste di abete rosso del Trentino (foto: Servizio Foreste, PAT).



Nido di processionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* (foto: stAn, Wikimedia Commons).

Altre minacce biotiche dovute ai cambiamenti climatici

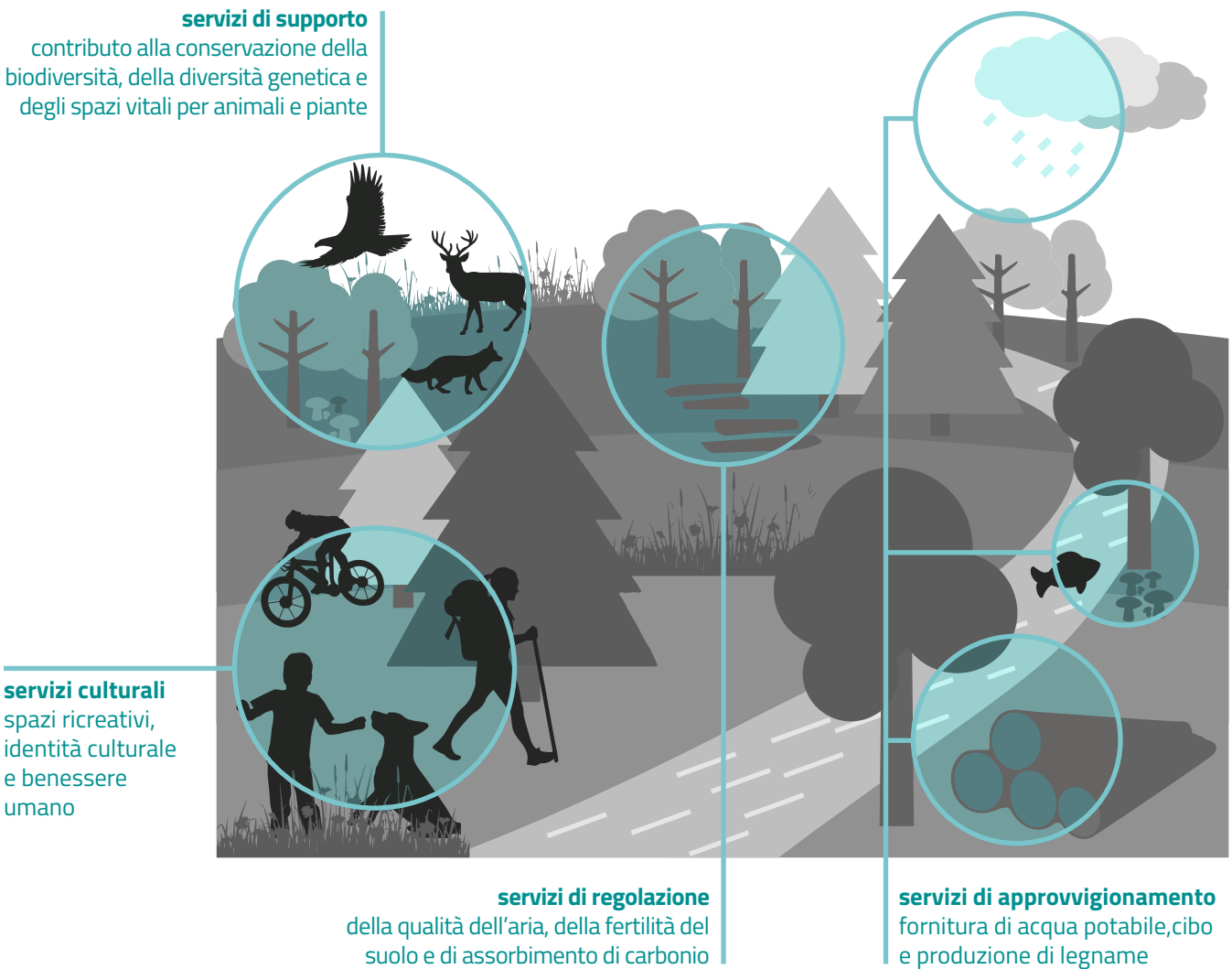
L'aumento della temperatura e più frequenti eventi estremi favoriscono la riproduzione, la crescita e l'espansione dell'area di distribuzione di altre specie che possono causare problemi alla salute delle foreste.

Temperature più alte favoriscono la diffusione in foreste semi-naturali di specie dannose e specie aliene invasive verso latitudini più settentrionali e quote più alte. Con l'aumento delle temperature invernali lo sviluppo di molti insetti defogliatori, che passano l'inverno in forma larvale, potrà vedere favorita la loro riproduzione e aumentare il rischio dovuto a tali specie nel futuro.

Il marciume radicale, provocato dal fungo *Heterobasidion spp.*, è già una delle malattie più distruttive per le conifere e l'aumento delle temperature potrebbe favorire ulteriormente la formazione di spore e aumentare il periodo e il tasso di crescita dei suoi miceli. Lo stesso effetto è stato confermato in Trentino anche per il fungo parassita *Kretzschmaria deusta* che causa marciume radicale ai danni di faggi, querce, tigli e aceri. Siccità e alte temperature si confermano anche all'origine del *Marciume bruno delle castagne*.

Specie tolleranti al caldo e sensibili al freddo, come la processionaria del pino *Thaumetopoea pityocampa* (un lepidottero dal significativo potere urticante che può determinare gravi reazioni allergiche), hanno espanso i propri areali e costituiscono una crescente minaccia per foreste urbane e parchi.

Impatti sui servizi ecosistemici forestali



Le foreste forniscono una grande varietà di servizi ecosistemici che potrebbero essere a rischio in futuro a causa dei cambiamenti climatici, in particolare per l'aumento di condizioni di siccità e temperature elevate.

Per quanto riguarda i servizi di approvvigionamento, si attende una potenziale riduzione della produzione di legname, un'alterazione e una maggiore volatilità delle dinamiche della filiera (vedi capitolo PRODUTTIVITÀ FORESTALE E FILIERA).

Importanti conseguenze negative si prevedono per i servizi di regolazione, soprattutto in conseguenza della maggiore frequenza di schianti, incendi, infestazioni parassitarie. I servizi colpiti sono la protezione dalla caduta di massi, dal distacco di valanghe e da frane superficiali, la regimazione delle acque, il contenimento dell'erosione del suolo e dei fenomeni di trasporto di detrito, l'assorbimento dell'anidride carbonica, l'autodepurazione e il miglioramento della qualità delle acque.

I servizi culturali potenzialmente danneggiati sono riconducibili ad alterazioni del paesaggio. Schianti da vento o da neve potrebbero aumentare i rischi di interruzioni di sentieri escursionistici, come pure aumenta il rischio di caduta di piante su infrastrutture e linee di distribuzione elettrica. Potrebbe diminuire la capacità di regolazione microclimatica e di rimozione degli inquinanti.

Tra i servizi di supporto va considerata la potenziale perdita di biodiversità legata alla sparizione di habitat collegati agli ecosistemi forestali attuali; per contro ciò può essere in parte compensato dall'aumento di biodiversità conseguente all'ingresso di altre specie (pioniere, vegetazione di aree aperte, ingresso di latifoglie dalle fasce vegetazionali inferiori). Per lo shift altitudinale della vegetazione è possibile infine una perdita di biodiversità locale, legata al venir meno degli spazi colonizzabili dalle specie più legate alle alte quote.

Suolo

I cambiamenti climatici incidono sul contenuto di acqua dei suoli, favoriscono i fenomeni di erosione, provocano variazioni dei cicli biogeochimici di carbonio, azoto e fosforo, e alterano la capacità di stoccaggio dell'anidride carbonica nel terreno. La tutela del suolo è fondamentale per preservare questa preziosa risorsa non rinnovabile.

Per suolo si intende lo strato superiore della crosta terrestre formato da diversi elementi come componenti minerali, sostanza organica, acqua, aria e organismi viventi. Si tratta di un sistema complesso, un vero e proprio ecosistema fitto di interazioni, che si interfaccia con atmosfera, biosfera, idrosfera e litosfera. Caratteristica fondamentale del suolo è la sua dinamica di crescita molto lenta, nell'ordine di qualche millimetro al secolo, il che lo rende di fatto una risorsa non rinnovabile.

Questa preziosa risorsa è minacciata da numerosi fenomeni di degrado che interagiscono tra loro, tra i quali erosione, perdita di sostanza organica, perdita di biodiversità e consumo di suolo. Erosione e perdita di sostanza organica in particolare sono direttamente influenzate dai cambiamenti climatici e possono essere accelerate o rallentate dalle variazioni dell'uso antropico del territorio e del suolo.

Per la regione alpina in particolare l'aumento della temperatura e la variazione dei regimi di precipitazione riducono l'umidità nel suolo, alterano i cicli biogeochimici di carbonio, azoto e fosforo, con una

possibile riduzione della materia organica contenuta nel suolo. L'alternarsi di eventi estremi come piogge intense e periodi siccitosi favoriscono l'erosione del suolo, mentre il ritiro dei ghiacciai e il degrado degli strati del permafrost favoriscono la mobilitazione di sedimenti, l'aumento delle condizioni di instabilità dei terreni rocciosi alle alte quote e l'erosione dei pendii.

Il suolo ricopre un ruolo di straordinaria importanza nella mitigazione dei cambiamenti climatici, in quanto esso rappresenta un serbatoio naturale di assorbimento di carbonio. Dopo gli oceani, il suolo è infatti il secondo serbatoio di assorbimento per importanza, superando il contributo delle foreste e di forme di vegetazione per quanto concerne la capacità di catturare e immagazzinare l'anidride carbonica atmosferica. Preservare i suoli è pertanto cruciale non solo per l'adattamento ai cambiamenti climatici e la riduzione degli impatti che ne conseguono sui servizi forniti dai suoli sani, ma anche in ottica di mitigazione e prevenzione degli effetti dei cambiamenti climatici attraverso la conservazione del potenziale di assorbimento del carbonio.

Il ciclo idrologico

L'impatto dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico agisce prevalentemente in termini di variazioni del contenuto di umidità e degli effetti di erosione del suolo, due fattori strettamente interconnessi. La riduzione dell'umidità del suolo aumenta infatti l'erodibilità dello stesso, dal momento che la sua coesione dipende dal contenuto d'acqua. D'altro canto, una maggior erosione comporta la riduzione della capacità di ritenzione idrica da parte del suolo.

Umidità del suolo

Il contenuto di acqua nel suolo, ossia l'umidità del suolo, è fortemente dinamico e, considerando solo i fattori naturali, deriva dal bilancio tra pioggia, evapotraspirazione, deflusso superficiale e percolazione profonda. Cambiamenti nella temperatura e nella frequenza e intensità degli eventi estremi, quali siccità e precipitazioni più intense, influenzano i tassi di evapotraspirazione e di infiltrazione e quindi l'umidità del suolo, oltre che l'accumulo d'acqua nel sottosuolo.

Secondo uno studio dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, dal 1951 al 2012 l'umidità del suolo si è mediamente ridotta nella maggior parte della regione mediterranea e, con riferimento al territorio italiano, soprattutto nel Nord-Est e nel Centro

Il progetto IdroClima

Per simulare la distribuzione spazio-temporale del bilancio idrico dei suoli in Trentino la Fondazione E. Mach ha analizzato dati di umidità dei suoli per il periodo 1992-2012, utilizzando il modello idrologico GEOtop e la classificazione degli usi del suolo fornita dal prodotto CORINE Land Cover nell'ambito dei servizi forniti a livello europeo dal sistema COPERNICUS.

I risultati evidenziano che le condizioni idrologiche naturali tipiche di ogni stagione sono fortemente determinate dalle caratteristiche del suolo in termini di spessore e capacità di ritenzione dell'umidità stessa. I tassi di evapotraspirazione più elevati previsti in futuro a causa dell'aumento generale delle temperature avranno presumibilmente l'effetto di ridurre ulteriormente il contenuto di umidità dei suoli, anche in assenza di modifiche sostanziali dei regimi pluviometrici per il territorio trentino.

Italia. In particolare, considerando l'andamento del contenuto d'acqua del suolo in estate dal 1951 al 2012, si è stimata una riduzione dell'umidità nel suolo statisticamente significativa e abbastanza rilevante soprattutto nel Trentino meridionale. Lo stesso

studio evidenzia come le proiezioni future stimino ancora un'ulteriore moderata riduzione nel Trentino meridionale e come questo persistente calo dell'umidità possa causare minori raccolti e rendere necessari maggiori apporti idrici ai terreni agricoli.

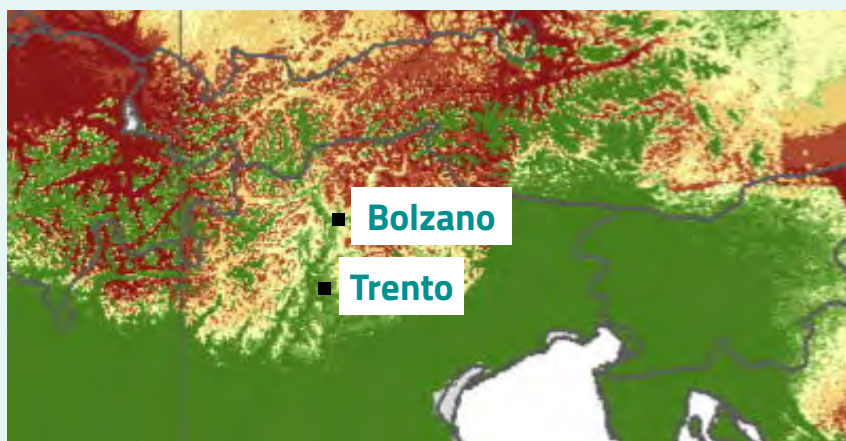
Erosione dei suoli

Precipitazioni più intense e irregolari possono favorire l'erosione del suolo, che comporta una perdita dello strato più superficiale a causa dell'azione meccanica dell'acqua piovana. L'erosività delle piogge indica la loro capacità di disintegrare gli aggregati del suolo e renderli disponibili al trasporto, e dipende sia dall'intensità che dalla durata della precipitazioni.

Nei territori di montagna gli effetti di erosione possono essere amplificati a causa dello sviluppo di superfici agrarie su versanti con pendenza significativa. Il possibile spostamento delle aree coltivate a quote più elevate di quelle attuali per effetto del riscaldamento generale potrà in futuro rendere tale impatto potenzialmente più rilevante per il territorio.

Variazioni future di erosività nella regione alpina e in Trentino

Uno studio condotto a livello europeo ha valutato come i cambiamenti climatici influenzeranno l'erosività delle precipitazioni ponendo a confronto i valori attesi nel 2050 rispetto a quelli osservati nel 2010. In Italia, come in altre aree del Mediterraneo e dei Balcani, l'erosività delle precipitazioni tende a calare principalmente a causa delle minori precipitazioni attese. Per l'Italia si stima un calo di circa il 24% del fattore di erosività. Le Alpi invece rientrano tra quelle aree, come Centro e nord Europa, caratterizzate da un aumento dell'erosività delle precipitazioni a causa di eventi temporaleschi attesi più intensi in futuro e/o da eventi erosivi più frequenti. Per le Alpi si stima un aumento del fattore di erosività di circa il 13%, un incremento che potenzialmente interessa anche porzioni del territorio trentino che si trovano in una situazione di transizione tra le aree caratterizzate da tendenze opposte.



Mappa della differenza tra i valori del fattore di erosività futuro previsto nel 2050 e quello valutato in riferimento all'anno 2010 (immagine tratta da Panagos et al. 2017). Le tonalità marroni indicano aree caratterizzate da un aumento futuro di erosività, mentre le aree con tonalità verdi indicano aree caratterizzate da erosività in calo.

Il cambiamento climatico intensifica il riscaldamento estremo del suolo

Secondo un recente studio, i fenomeni di caldo estremo si manifestano in maniera amplificata nel suolo rispetto all'aria sovrastante e l'Italia è tra le aree più colpite.

L'analisi si è concentrata sull'andamento dei valori delle temperature massime giornaliere registrate nello strato più superficiale del terreno (i primi 10 cm) e nell'aria vicino al suolo (fino a 2 m di altezza), nella

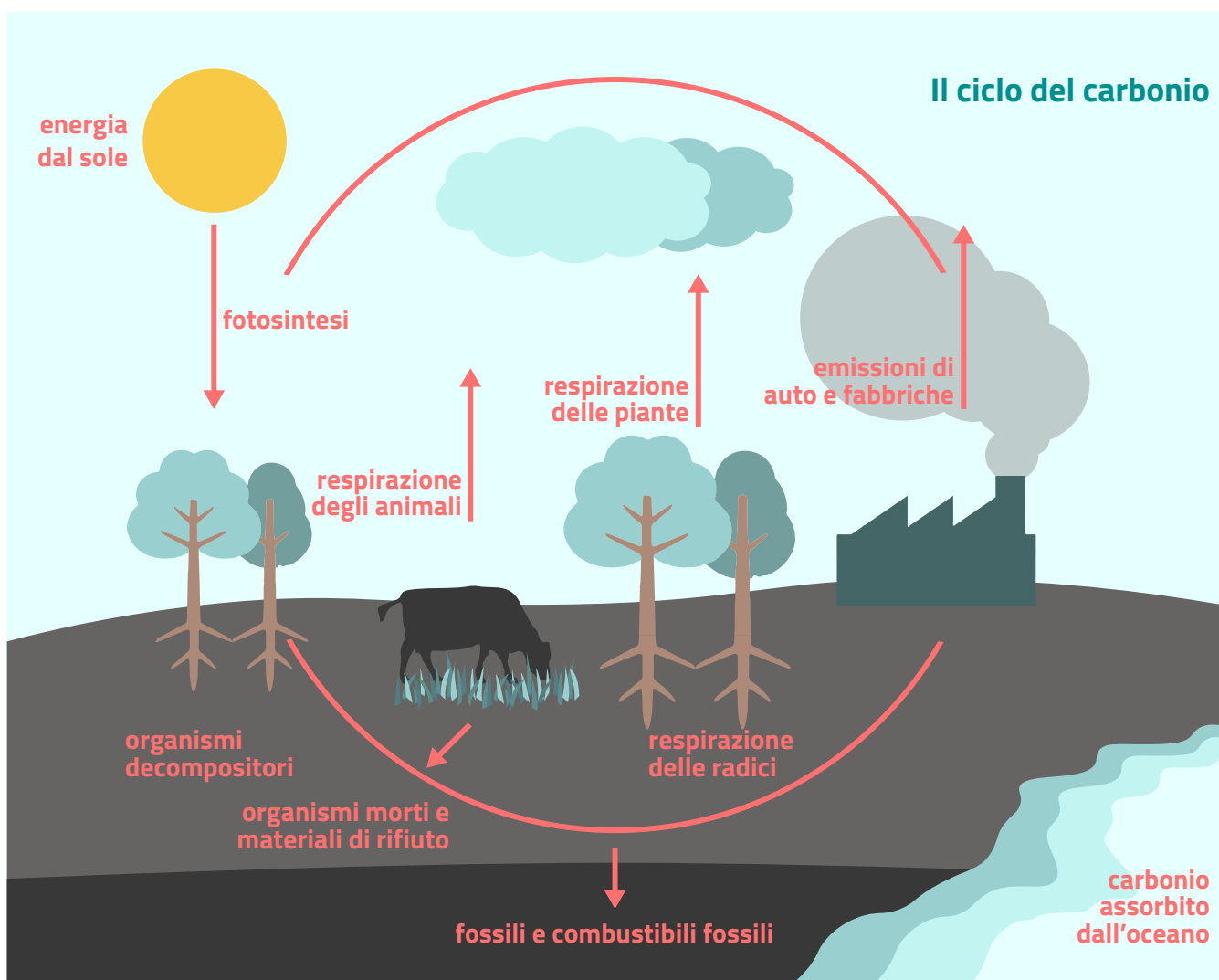
settimana più calda di ogni anno per il periodo 1996-2021. Si è osservato che gli estremi di calore si sviluppano molto più rapidamente nel suolo che nell'aria.

Fondamentale nel regolare il flusso di calore è il ruolo dell'umidità del suolo, che impatta sullo scambio termico tra l'aria e il terreno. Il fenomeno indagato ha importanti conseguenze, in quanto può contribuire ad intensificare gli estremi caldi di temperatura in alcune aree, in particolare in condizioni di scarso contenuto di umidità nel terreno.

I cicli biogeochimici

I cambiamenti climatici influenzano anche i cicli di carbonio, azoto e fosforo, influenzando sulla fertilità del suolo, sullo stato della vegetazione e della pedofauna (gli organismi animali che vivono nel suolo), sul con-

tenuto di sostanza organica e acqua, sui fenomeni di erosione e, in ultima analisi, sulla produzione agricola e sull'uso del suolo.

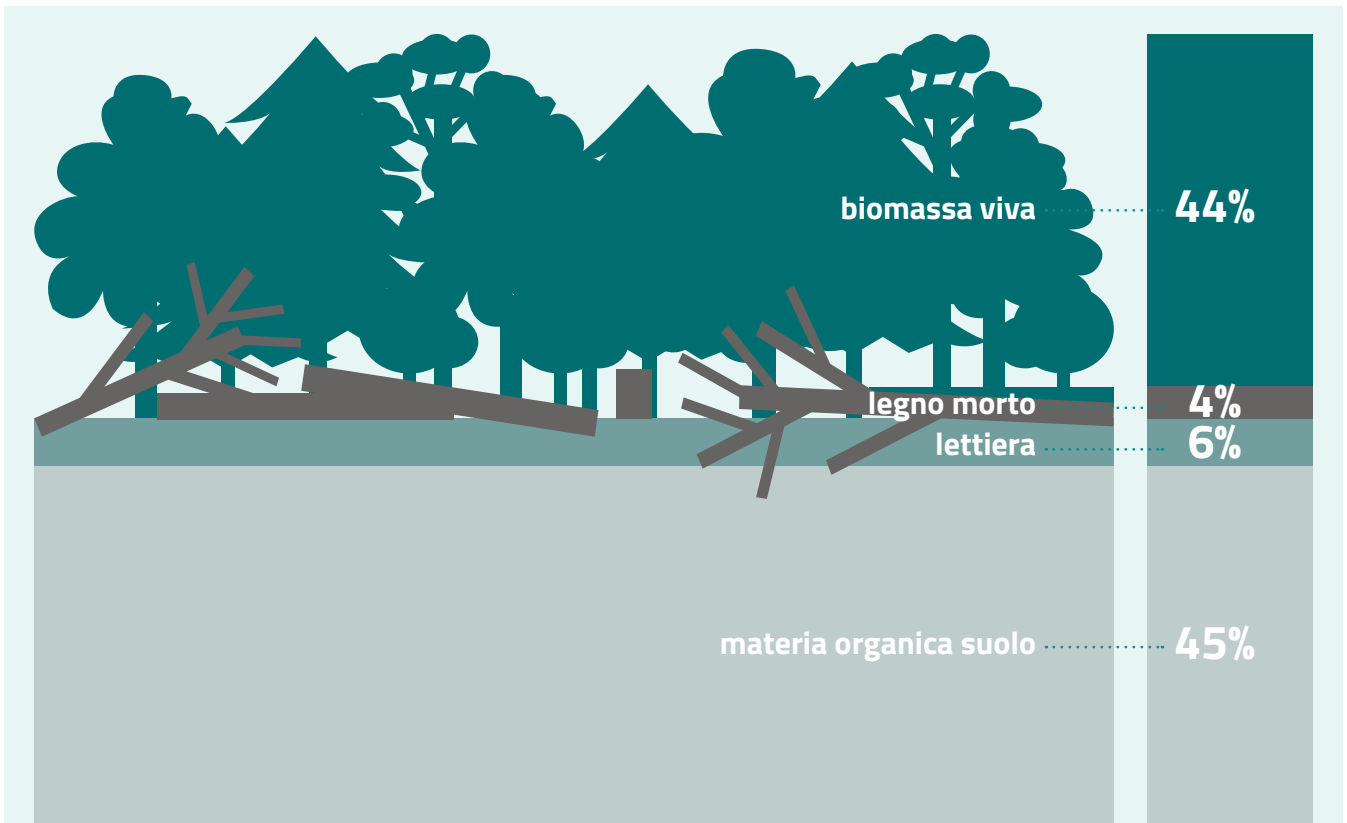


Il ciclo del carbonio

Il ciclo della sostanza organica è estremamente complesso perché costituito da un insieme di vari cicli più semplici. Il ciclo del carbonio contribuisce per circa il 50% della sostanza organica presente nei suoli e vede l'utilizzazione da parte della vegetazione della CO_2 presente nell'atmosfera, che viene fissata nei tessuti vegetali grazie all'attività fotosintetica delle piante e poi accumulata nel suolo sotto forma di sostanza organica più o meno umificata, attraverso i residui

vegetali e quanto rilasciato dalle radici delle piante viventi (essudati radicali). La presenza di carbonio organico contribuisce alla fertilità chimica, fisica e biologica dei suoli, e quindi favorisce la crescita e l'attività di assorbimento del carbonio delle piante stesse.

Il ruolo che il suolo svolge all'interno del ciclo del carbonio è fondamentale e la diminuzione del contenuto di carbonio organico rappresenta un elemento di



Il carbonio organico contenuto nei suoli in Trentino

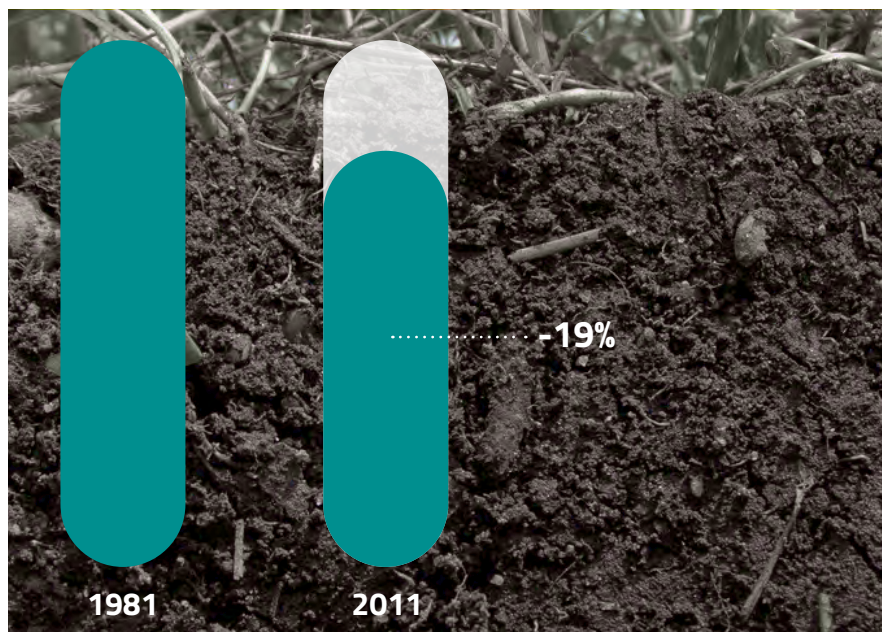
In uno studio del 2014 sono state analizzate le variazioni di carbonio organico nel suolo in conseguenza all'espansione delle foreste a svantaggio della prateria, in un'area situata nel Comune di Lavarone. I risultati hanno indicato che il carbonio organico veniva maggiormente trasferito nella biomassa arborea, riducendo le quantità immagazzinate nel suolo.

Nel 2010 sono state pubblicate le stime del carbonio organico immagazzinato negli ecosistemi forestali dell'intera Provincia, grazie a INFOCARB, un inventario che include 150 punti di campionamento in Trentino. I risultati indicano che la biomassa forestale fuori terra e il suolo riescono ad immagazzinare rispettivamente il 43,2% e il 44,6% del carbonio totale immagazzinato dell'ecosistema. A causa dell'elevata variabilità delle stime tra siti diversi, le relazioni statistiche tra contenuto di carbonio del suolo e principali variabili ecosistemiche e climatiche appaiono deboli. Tuttavia, in base alla classificazione della tipologia di foresta dominante, i siti caratterizzati dalla presenza di faggi differivano in modo significativo da quelli ricchi di conifere per quanto riguarda l'accumulo di carbonio e il rapporto Carbonio/Azoto degli strati organici del suolo: i siti di faggio hanno mostrato infatti un minor contenuto di carbonio negli strati organici per unità di superficie.

degrado del suolo. Preservare l'accumulo di carbonio organico nei suoli favorisce quindi la mitigazione dei cambiamenti climatici oltre a garantire la fertilità dei suoli stessi.

L'effetto del riscaldamento in atto sul bilancio dei processi di assorbimento ed emissione di carbonio dai suoli e dai terreni alpini è ancora oggetto di studi. Da un lato, infatti, il riscaldamento del terreno può depotenziare la funzione di assorbimento di carbonio: i microrganismi diventano più attivi con il crescere della temperatura e proliferano, trasformando e

degradando maggiori quantità di sostanza organica contenuta nel suolo e liberando più CO₂ in atmosfera. Questo processo tuttavia viene contrastato dalla maggior attività di fotosintesi delle piante, che catturano e rilasciano nel terreno maggiori quantità di carbonio. Ondate di calore estremo e siccità invece deprimono anche la fotosintesi.



La Fondazione E. Mach ha eseguito un monitoraggio della sostanza organica presente in 63 suoli viticoli del Trentino dal 1980 al 2011, evidenziando una diminuzione pari al 19% in 31 anni. L'uso dei concimi in luogo delle tradizionali pratiche di sovescio e di aggiunta di ammendanti, il compattamento del suolo, il disseccamento dello strato erboso tramite diserbanti insieme ai cambiamenti climatici sono tra i fattori all'origine di tale impoverimento.

Il ciclo dell'azoto

Nel terreno l'azoto si trova in grande quantità sia in forma organica sia in forma inorganica o minerale, ed è noto per essere l'elemento più importante per la crescita della vegetazione nelle foreste come negli agroecosistemi.

Pur non essendo disponibili studi specifici in Trentino, in futuro è possibile aspettarsi una variazione della concentrazione di azoto nel terreno a causa dei cambiamenti climatici. Le temperature più elevate possono infatti accelerare l'attività microbica nel suolo, portando potenzialmente a un aumento dei tassi di mineralizzazione dell'azoto, il processo mediante il quale l'azoto organico viene convertito in forme che le piante possono assorbire.

Eventi estremi di precipitazione o siccità prolungate

possono influenzare la disponibilità di azoto nel suolo: le piogge intense possono aumentare la lisciviazione, dilavando l'azoto dal suolo e facendolo potenzialmente defluire nei corpi idrici più vicini, mentre le condizioni di siccità, d'altro canto, possono ridurre l'attività microbica e rallentare i processi del ciclo dell'azoto.

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulle comunità vegetali possono influenzare negativamente o positivamente l'attività di alcune piante che hanno rapporti simbiotici con i batteri che fissano l'azoto atmosferico contribuendo alla sua disponibilità nel suolo.

Anche la riduzione della durata della copertura nevosa, infine, può modificare le condizioni di umidità e di temperatura del suolo, influenzando l'attività microbica e le trasformazioni dell'azoto.

Il ciclo del fosforo

Il ciclo del fosforo è fondamentale perché le sue implicazioni riguardano da vicino molti organismi. Il fosforo è essenzialmente contenuto nelle rocce nei fosfati e la sua diffusione avviene prevalentemente attraverso le catene alimentari. Tutti gli organismi ne assorbono una certa quantità che viene "restituita" all'ambiente alla morte dell'organismo stesso, tramite i processi di decomposizione.

Non sono disponibili studi sull'effetto dei cambiamenti climatici sul ciclo del fosforo in Trentino. Tuttavia, tra

gli effetti potenziali segnalati in letteratura figurano: l'aumento dell'attività microbica nel suolo con un maggiore rilascio di fosforo e quindi una maggior disponibilità per l'assorbimento da parte delle piante; modifiche nelle comunità vegetali associate a diverse esigenze nutrizionali e diverse capacità di assorbire il fosforo, con la modifica del fabbisogno e dell'assorbimento di fosforo; una maggior mobilitazione e trasporto di sedimenti contenenti fosforo a causa dell'aumento delle precipitazioni estreme e dell'erosione dei suoli.



Modifiche di uso del suolo e cambiamenti climatici

L'uso del suolo è legato ai cambiamenti climatici a doppio filo.

Da un lato, infatti, le modifiche di uso del suolo possono contribuire alle cause dei cambiamenti climatici (o contrastarle), alterando i flussi di massa e di energia verso l'atmosfera. Dall'altro, i suoli subiscono gli impatti dei cambiamenti climatici a diverse scale temporali e spaziali, rispondendo con variazioni d'uso.

Ad esempio l'innalzamento del limite superiore degli alberi in montagna (la cosiddetta *treeline*), il potenziale spostamento a quote più elevate delle aree coltivabili o, ancora, i fenomeni di deforestazione causati da eventi estremi (come la tempesta Vaia) rappresentano effetti diretti o indiretti causati sulla destinazione d'uso dei suoli alpini dai cambiamenti climatici.

Foto: Luigi Rosa

Il ruolo delle torbiere

La torbiera è un ambiente caratterizzato da una grande abbondanza di acqua a bassa temperatura in lento movimento, dove si sviluppa una vegetazione prevalentemente erbacea tipica dei luoghi umidi. Generalmente le zone umide ospitano numerosi habitat e una grande biodiversità, assicurando numerosi servizi ecosistemici. In particolare,

nelle torbiere la sostanza organica si accumula più rapidamente di quanto venga decomposta, sotto forma di torba appunto.

Le zone umide, e in particolare le torbiere, rappresentano una grande riserva di carbonio e l'aumento delle temperature può far passare questi sistemi da serbatoi a fonti emissive di carbonio, soprattutto se l'apporto idrico si riduce, ad esempio a causa di condizioni di siccità. In questo senso, le zone umide presenti in Trentino sono ambienti vulnerabili o molto vulnerabili ai cambiamenti climatici, in quanto spesso costituiscono sistemi idrologici di dimensioni ridotte e/o basati su apporti idrici di origine nivo-glaciale.

Sono comunque necessari ulteriori studi in merito agli impatti dei cambiamenti climatici sulle torbiere e sulle zone umide del Trentino, così come appare di vitale importanza tutelare e salvaguardare questi preziosi habitat naturali.



Lago del Vedes (foto: Antonella Agostini).

Qualità dell'aria

Le conseguenze future dei cambiamenti climatici per la qualità dell'aria sono ad oggi ancora poco conosciute per l'area alpina e il Trentino: è infatti molto difficile valutare gli impatti di lungo termine, anche a causa della complessità dei meccanismi che governano i fenomeni di inquinamento atmosferico.

L'aria che costituisce l'atmosfera terrestre è una miscela di gas composta principalmente da azoto e ossigeno, oltre a piccole quantità di altri gas, tra i quali il vapore acqueo. La sua composizione a livello del suolo e negli strati più superficiali, ossia l'aria che respiriamo, può essere alterata da alcune sostanze, gassose o in forma di particelle, dette inquinanti atmosferici, che, se presenti in alte concentrazioni, possono nuocere alla salute umana, oltre a causare danni alla vegetazione e agli ecosistemi in genere e accelerare il deterioramento dei materiali che costituiscono edifici e monumenti. Queste sostanze, che peggiorano la qualità dell'aria, ossia la misura di quanto l'aria sia libera da inquinamento atmosferico e innocua se

respirata dall'uomo, sono principalmente prodotte ed immesse in atmosfera da attività antropiche di vario tipo, ma possono avere anche origine naturale.

Ad oggi non sono molti gli studi scientifici che descrivono l'impatto che i cambiamenti climatici hanno avuto e avranno sulla qualità dell'aria a livello globale, e in particolare non sono disponibili evidenze scientificamente consolidate di quali siano le conseguenze a livello alpino e nel territorio trentino.

Di conseguenza, è possibile solo ipotizzare quali potranno essere i potenziali effetti del clima che cambia (e delle future azioni di mitigazione che saranno intraprese a livello internazionale) sulla qualità dell'aria

in Trentino, prendendo in considerazione l'evoluzione attesa per gli elementi che governano il problema: le emissioni di inquinanti primari in atmosfera, i processi di formazione degli inquinanti secondari e i fenomeni meteorologici che determinano la concentrazione delle sostanze inquinanti alle diverse scale spazio-temporali.



Foto: Pexels.

Inquinanti atmosferici primari

Gli inquinanti primari sono le sostanze dannose per la salute umana che vengono immesse direttamente nell'aria ambiente dalle cosiddette sorgenti o fonti emissive, a causa di attività di matrice antropica ma anche di fenomeni naturali.

Rientrano tra gli inquinanti tipicamente primari gli ossidi di azoto (NO_x), il monossido di carbonio (CO) e gli ossidi di zolfo (SO_x), che sono prodotti dalle reazioni di combustione che avvengono ad esempio nelle centrali termoelettriche, negli impianti industriali e di riscaldamento civile, nei motori a combustione interna dei veicoli, qualunque sia il

combustibile utilizzato ma principalmente a causa dell'utilizzo di combustibili fossili (carbone, petrolio e derivati, gas naturale).

Anche il particolato atmosferico, conosciuto più comunemente con il nome di polveri sottili o PM10 (quando il diametro aerodinamico delle particelle liquide o solide aerodisperse non supera i 10 micrometri), può essere un inquinante di tipo primario, anche se non in maniera esclusiva. Il particolato di origine primaria deriva principalmente da fenomeni di combustione incompleta sia di combustibili fossili che di biomassa legnosa, legati a processi produttivi, riscaldamento civili e veicoli motorizzati.

Il traffico, in particolare quello su strada, contribuisce ulteriormente all'emissione di polveri sottili a causa dell'usura di manto stradale, freni e pneumatici. Anche alcuni fenomeni naturali, quali le eruzioni vulcaniche, gli incendi forestali, il rilascio di sostanze organiche volatili da parte delle specie vegetali (ad esempio i pollini), l'erosione dei suoli e la formazione di aerosol marino danno origine a particolato atmosferico cosiddetto primario.

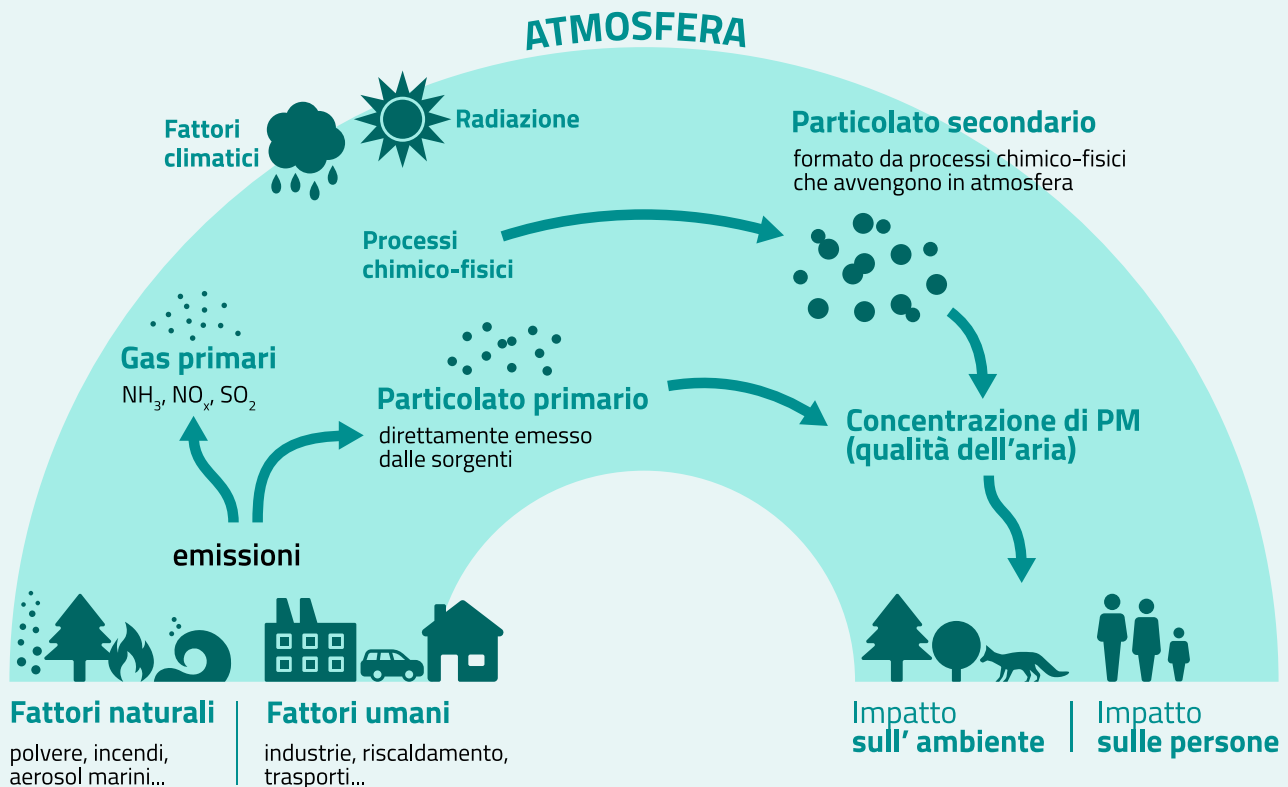
Inquinanti atmosferici secondari

Gli inquinanti secondari sono quelli che si formano in atmosfera a partire da altre sostanze, dette precursori, a seguito di reazioni che possono essere di tipo chimico, foto-chimico e/o fisico, e quindi influenzate dalle condizioni di temperatura, umidità atmosferica e radiazione solare.

Ad esempio, in condizioni di ristagno prolungato degli inquinanti e assenza di precipitazione,

la quota secondaria di particolato atmosferico può arrivare a costituire gran parte delle polveri sottili rilevate in atmosfera. Il particolato di origine secondaria si può formare a partire da precursori quali ammoniaca (NH_3), ma anche ossidi di azoto e di zolfo e composti organici volatili, ossia da inquinanti considerati primari.

L'ozono (O_3) troposferico (ossia l'ozono che incontriamo a livello del suolo, dove lo respiriamo) costituisce invece un inquinante di origine esclusivamente secondaria. La sua produzione avviene a partire da inquinanti primari, principalmente ossidi di azoto e composti organici volatili, grazie al verificarsi di condizioni di irraggiamento solare elevato, in una complessa catena di reazioni di tipo fotochimico. Alte concentrazioni di questo inquinante secondario, dal potere fortemente ossidante, si possono manifestare anche lontano dai siti di emissione dei suoi precursori.



Mentre le concentrazioni degli inquinanti primari sono determinate principalmente dall'entità delle emissioni in atmosfera e dalle condizioni meteorologiche a scala locale, per gli inquinanti secondari

è assolutamente determinante la presenza e la disponibilità delle sostanze che ne sono precursori, che rappresenta un vero fattore limitante per lo sviluppo delle reazioni che li originano.

La differenza tra climalteranti e inquinanti atmosferici

Spesso nel linguaggio comune climalteranti e inquinanti atmosferici vengono confusi tra loro, come se si trattasse di una sola categoria. In realtà, anche se possono condividere la fonte di emissione (ad esempio, l'uso di combustibili fossili o le eruzioni vulcaniche), c'è una differenza sostanziale: mentre le principali sostanze climalteranti, ossia i gas ad effetto serra anidride carbonica, metano e protossido di azoto (CO_2 , CH_4 e N_2O), hanno l'effetto di trattenere, sotto forma di calore, parte dell'energia del Sole nell'atmosfera terrestre (vedi capitolo EMISSIONI CLIMALTERANTI), gli inquinanti sono sostanze che danneggiano la salute umana se respirate, oltre a causare danni alla vegetazione e ai materiali che costituiscono edifici e monumenti.

Inoltre, mentre per quanto riguarda l'effetto serra (che costituisce un fenomeno di origine naturale che le emissioni climalteranti antropiche stanno

amplificando in maniera inequivocabile e rapida, causando il riscaldamento globale) le concentrazioni dei climalteranti sono adeguatamente valutabili alla scala planetaria, ossia in termini di concentrazione atmosferica media globale, per le concentrazioni di inquinanti la scala spaziale significativa è quella locale.

Si noti che alcune sostanze inquinanti hanno anche un effetto climalterante di segno opposto a quello dei gas serra, meno noto. Ad esempio, gli aerosol atmosferici (che rientrano nella categoria del particolato atmosferico), sia di origine antropica che naturale, riflettono la radiazione solare verso lo spazio con un effetto raffreddante significativo a livello globale. Un commento a parte merita il cosiddetto black carbon, ossia il particolato carbonioso o fuliggine, che deriva dalla combustione incompleta di combustibili fossili e biomassa legnosa. Le sue particelle scure assorbono la radiazione solare, contribuendo al riscaldamento globale.



Stazione di qualità dell'aria in strada ad elevato traffico (foto: APPA PAT).

Variazione delle emissioni di inquinanti primari

Il riscaldamento globale e l'inquinamento atmosferico, pur rappresentando due fenomeni distinti che inducono ordini diversi di conseguenze negative per l'uomo, condividono cause comuni, collegate alle attività antropiche che ne sono all'origine: l'utilizzo di combustibili fossili per la produzione di energia ad utilizzo industriale e civile e le attività agricole e zootecniche per la produzione di cibo, che rilasciano in atmosfera sia gas climalteranti, come anidride carbonica, metano e protossido di azoto, che inquinanti, come ossidi di azoto, particolato atmosferico e precursori di inquinanti secondari.

Non sorprende quindi che anche le soluzioni di contrasto ai cambiamenti climatici e di tutela della qualità dell'aria possano essere, almeno in parte, comuni. Molte soluzioni di mitigazione, cioè di taglio delle emissioni di gas climalteranti, ad esempio comportano obiettivi di riduzione dei consumi di combustibili fossili, attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica o la transizione a fonti di energia rinnovabili, con tecnologie alternative e "più pulite". Le emissioni di sostanze inquinanti e dei loro precursori sono così abbattute "all'origine" anch'esse. La sinergia tra le politiche di mitigazione e di contrasto

all'inquinamento atmosferico ha quindi il potenziale per apportare significativi co-benefici per la salute umana ed appare evidente che, anche in Trentino, le due sfide vadano affrontate congiuntamente a livello di pianificazione e di implementazione delle politiche in una logica di tipo win-win.

L'innalzamento delle temperature in Trentino comporta un ulteriore contributo positivo al miglioramento della qualità dell'aria a scala locale. Infatti, almeno dagli anni '80 sono già diminuiti in maniera significativa (e continueranno a decrescere in futuro, viste le tendenze attese per le temperature medie nell'area) i fabbisogni energetici legati al riscaldamento invernale delle abitazioni private e degli spazi costruiti commerciali e pubblici (vedi capitolo ENERGIA). Questo implica che le emissioni di inquinanti associate al settore della combustione civile, come ossidi di azoto e particolato di origine primaria prodotti essenzialmente dalla combustione di gasolio, gas metano e biomassa legnosa, si riducono di conseguenza. Le potenziali ricadute positive si potranno apprezzare nei mesi più freddi dell'anno, che sono anche quelli tipicamente caratterizzati dalle maggiori criticità in termini di qualità dell'aria.

Variazione dei processi di formazione degli inquinanti secondari

Per quanto concerne la disponibilità in atmosfera delle sostanze che agiscono come precursori degli inquinanti atmosferici secondari più significativi (principalmente particolato secondario e ozono), le azioni di mitigazione dei cambiamenti climatici, come già illustrato, hanno potenzialmente un effetto benefico di riduzione delle emissioni. È il caso ad esempio delle emissioni di ossidi di azoto e di zolfo e di ammoniaca che derivano da combustibili fossili e sorgenti agricole e zootecniche. Ci si aspetta che questo risultato, a cascata, in una complessiva diminuzione delle concentrazioni degli inquinanti secondari associati, in particolare dell'ozono troposferico, che costituisce tuttora una criticità anche in Trentino. Per altri precursori, come i composti organici volatili che sono rilasciati dagli organismi vegetali (ad esempio i polli-

ni) la tendenza è invece opposta (vedi capitoli ECOSISTEMI TERRESTRI e SALUTE). Resta difficile effettuare una valutazione del risultato combinato in termini di qualità dell'aria.

L'aumento delle temperature ha inoltre, in generale, l'effetto di accelerare le reazioni chimiche, incluse quelle che portano alla formazione degli inquinanti secondari. In merito alle reazioni foto-chimiche che conducono alla generazione di ozono troposferico, per le quali la radiazione solare ha un ruolo fondamentale, non sono oggi disponibili previsioni accurate di come la nuvolosità, e di conseguenza la radiazione effettivamente incidente al suolo, potranno variare in futuro in un'area con un'orografia complessa come quella alpina nei diversi scenari di evoluzione climatica.

Variazione dei processi meteorologici che influenzano la qualità dell'aria

La concentrazione delle sostanze inquinanti in aria, che definisce lo stato di qualità dell'aria a scala locale, è altamente variabile nel tempo e nello spazio e dipende fortemente non solo dalle quantità complessive di sostanze immesse in atmosfera per cause antropiche e naturali, ma anche dalle condizioni meteorologiche. A causa della natura stessa dei fenomeni che la regolano e dalle scale spazio-temporali che la caratterizzano, infatti, la qualità dell'aria appare maggiormente influenzata dalla meteorologia che dalla climatologia locale.

I processi meteorologici che governano i fenomeni di trasporto e di dispersione degli inquinanti negli strati più superficiali dell'atmosfera sono vari: dalle circolazioni atmosferiche che si sviluppano e interagiscono alle differenti scale spaziali, da quella globale a quella regionale e locale, alle condizioni di stabilità atmosferica in prossimità del suolo che determinano il grado di rimescolamento delle masse d'aria e il volume nel quale esso avviene. Anche le precipitazioni atmosferiche, in particolare quelle liquide, contribuiscono in maniera significativa a influenzare le concentrazioni di inquinanti tramite meccanismi di rimozione umida dall'aria

ambiente di gas e particolati inquinanti, che vengono depositati al suolo passando nel terreno e contaminando potenzialmente anche i corpi idrici superficiali e sotterranei.

Gli studi scientifici indicano che il riscaldamento globale sta causando un indebolimento e un rallentamento della circolazione atmosferica globale, un fenomeno complesso sul quale la ricerca è tuttora in corso. Se ci siano alterazioni sistematiche delle circolazioni atmosferiche alle scale spaziali più significative per l'area alpina, ossia i venti che caratterizzano la maggior parte dei fenomeni di trasporto degli inquinanti sulle scale regionali e locali, è un ambito di analisi attualmente ancora aperto e non compiutamente affrontato.

Un elemento che appare ragionevolmente probabile è invece il fatto che l'aumento generale delle temperature stia influenzando la frequenza con la quale si verificano quei fenomeni meteorologici caratteristici del microclima di montagna conosciuti con il nome di "inversione termica". Si tratta di condizioni di elevata stabilità e stratificazione persistente delle masse d'aria, che intrappolano gli inquinanti negli strati più bassi



Inquinanti atmosferici intrappolati in prossimità del suolo, a causa dello sviluppo del fenomeno di inversione termica nella zona di fondovalle (foto: APPA PAT).

dell'atmosfera e ne causano l'accumulo progressivo, con concentrazioni anche molto elevate in prossimità del suolo. Questo tipo di fenomeno ricorre in particolare nella stagione invernale in Trentino e nei territori circostanti, con il risultato di indurre episodi di inquinamento acuto. Se da un lato le temperature mediamente più alte implicano l'instaurarsi di condizioni locali di inversione termica con minor frequenza, con impatti potenzialmente positivi sulla qualità dell'aria, dall'altro non è ancora noto quanto i cambiamenti climatici altereranno invece il verificarsi di quelle condizioni meteorologiche a grande scala (solitamente condizioni anticicloniche, ossia di alta pressione) che favoriscono la formazione e la persistenza delle inversioni termiche per più giorni di seguito.

Da ultimo, le modificazioni del regime delle precipitazioni già avvenute o attese in futuro per il territorio trentino non sembrano essere particolarmente in grado di giocare un ruolo significativo in questo contesto. Nella stagione invernale, quando i fenomeni di inquinamento atmosferico sono tipicamente più critici, sono invece le condizioni di assenza prolungata di precipitazioni, e quindi di mancata rimozione umida degli

inquinanti dall'aria, a rivelarsi problematiche. Queste ultime sono attese in probabile aumento in Trentino, ma principalmente nella stagione più calda, quando il rimescolamento dovuto alla turbolenza atmosferica è maggiore e i problemi di cattiva qualità dell'aria sono normalmente meno pronunciati (se si esclude l'inquinante ozono).

In sintesi, la valutazione dell'impatto complessivo dei cambiamenti climatici sulla qualità dell'aria a livello locale è piuttosto incerta e decisamente complessa a causa della natura stessa dei fenomeni, e non sono ad oggi disponibili in letteratura scientifica elementi che forniscano indicazioni esaustive in merito. Le valutazioni qui riportate fanno sì che il settore della qualità dell'aria non sia tra quelli per i quali l'azione di adattamento agli effetti dei cambiamenti climatici è prioritaria e urgente. Ciononostante, è indubbio che, anche a livello provinciale, nella pianificazione e nell'implementazione delle future politiche di mitigazione dei cambiamenti climatici e tutela della qualità dell'aria debbano essere tenuti in adeguata considerazione la stretta sinergia tra i due ambiti e i co-benefici reciproci.



Stazione di qualità dell'aria di Riva del Garda (foto: APPA PAT).

Lo stato della qualità dell'aria in Trentino

Lo stato della qualità dell'aria ambiente nella Provincia autonoma di Trento è complessivamente positivo. I dati provenienti dalle stazioni della rete provinciale di monitoraggio gestita dall'APPA confermano la tendenza al miglioramento in atto, in particolare nell'ultimo decennio. Nel dettaglio, mentre per alcuni degli inquinanti normati i livelli di concentrazione sono ampiamente al di sotto dei limiti di legge da anni, per biossido di azoto e particolato atmosferico la situazione è positiva con un margine più limitato o solo da qualche anno, oppure evidenzia alcune criticità, come nel caso dell'ozono.

Biossido di azoto (NO₂)

A livello provinciale più della metà delle emissioni di biossido di azoto sono riconducibili al settore del trasporto su strada, mentre la combustione negli impianti industriali e civili conta solo il 15% e 13% rispettivamente.

Per quanto riguarda la media annua è confermato il trend positivo degli ultimi anni con concentrazioni medie annue in progressiva diminuzione. Nel 2023, per il quarto anno consecutivo, anche presso il sito di traffico di Trento via Bolzano, è stato rispettato il limite sulla media annua di 40 µg/m³ con il valore registrato più basso di sempre pari a 32 µg/m³.

Polveri sottili (PM10)

Il contributo emissivo prevalente per il PM10 è quello dato dal settore del riscaldamento civile, per la maggior parte dovuto agli impianti domestici alimentati a biomassa legnosa (84%) in funzione nella stagione più fredda. Il trasporto su strada conta solo per il 9% sul totale.

Nel 2022 per l'undicesimo anno consecutivo il limite previsto per la concentrazione media giornaliera (50 µg/m³) è stato rispettato in tutto il territorio provinciale, mentre le medie annuali sono al sotto del limite da sempre (con l'unica eccezione della stazione di Riva del Garda nel 2006).

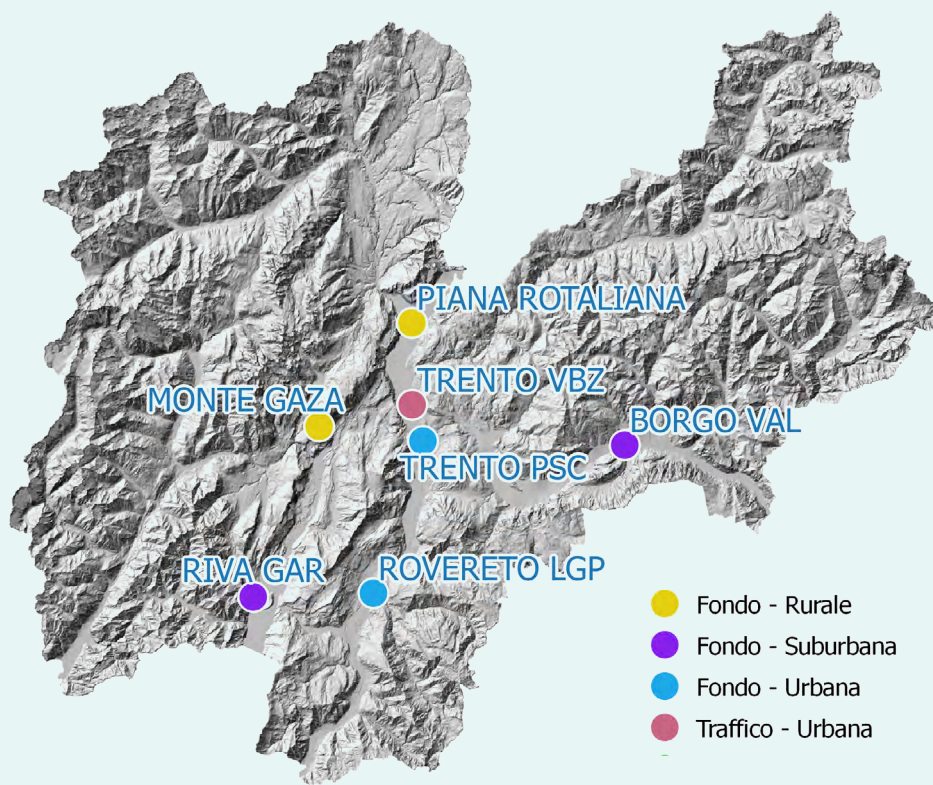
Ozono (O₃)

I valori registrati per questo inquinante mostrano una variabilità interannuale piuttosto marcata, strettamente legata alla variabilità meteo-climatica, data la forte dipendenza delle concentrazioni di ozono dalle variabili meteorologiche quali radiazione solare e temperatura.

I dati raccolti negli ultimi anni confermano la criticità per questo parametro, con il valore obiettivo di 120 µg/m³ (calcolato come media su tre anni e riferito alla media massima giornaliera calcolata su 8 ore, da non superare più di 25 volte per anno civile) che viene ancora superato in maniera diffusa sul territorio provinciale.

Anche nel 2023, come in precedenza, si sono inoltre registrati alcuni valori superiori alla soglia di informazione (media oraria pari a 180 µg/m³).

Data la natura di inquinante secondario dell'ozono, soggetto a processi di formazione influenzati dalla concentrazione dei suoi precursori e a meccanismi di trasporto su distanze dell'ordine di oltre 100 km, per poter conseguire una sua riduzione sistematica sono indispensabili misure coordinate di ampio respiro che siano implementate su una scala territoriale più estesa di quella provinciale o regionale.



La rete delle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria in Trentino, la cui gestione è affidata all'Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente (APPA PAT). Le diverse stazioni presso le quali sono misurate le concentrazioni degli inquinanti normati sono considerate rappresentative di condizioni e ambienti diversi, tra i quali l'ambito urbano, suburbano e rurale.

Incendi boschivi, cambiamento climatico e inquinamento atmosferico

Una conseguenza dei cambiamenti climatici già osservata negli anni recenti a livello globale, ma non nel territorio trentino, è l'aumento del numero di incendi forestali, della loro estensione e persistenza, a causa della concomitanza di condizioni di siccità prolungata più frequenti e temperature relativamente elevate, particolarmente favorevoli sia all'innesco che alla propagazione del fuoco. Questi fenomeni possono contribuire in maniera significativa all'immissione in atmosfera sia di inquinanti (principalmente ossidi di azoto e polveri) che di gas serra (anidride carbonica).

Nel corso del 2023 numerosi e devastanti incendi, come quelli avvenuti in Canada e in Grecia, si sono verificati nel mondo anche a causa della combinazione persistente di alte temperature e condizioni di siccità a scala locale. Essi hanno avuto un enorme impatto negativo sulla qualità dell'aria per le comunità locali colpite, ma non solo. Ad esempio, il monitoraggio delle emissioni derivanti da questi incendi da parte del Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) ha rilevato un'influenza non trascurabile degli incendi canadesi sulle concentrazioni di

particolato misurate in gran parte del Nord America e, addirittura, in alcune zone d'Europa. Il fumo è stato trasportato dai venti e ha oltrepassato l'Atlantico, con conseguenze sui livelli di inquinamento e di visibilità atmosferica registrate a livello locale a migliaia di chilometri di distanza.

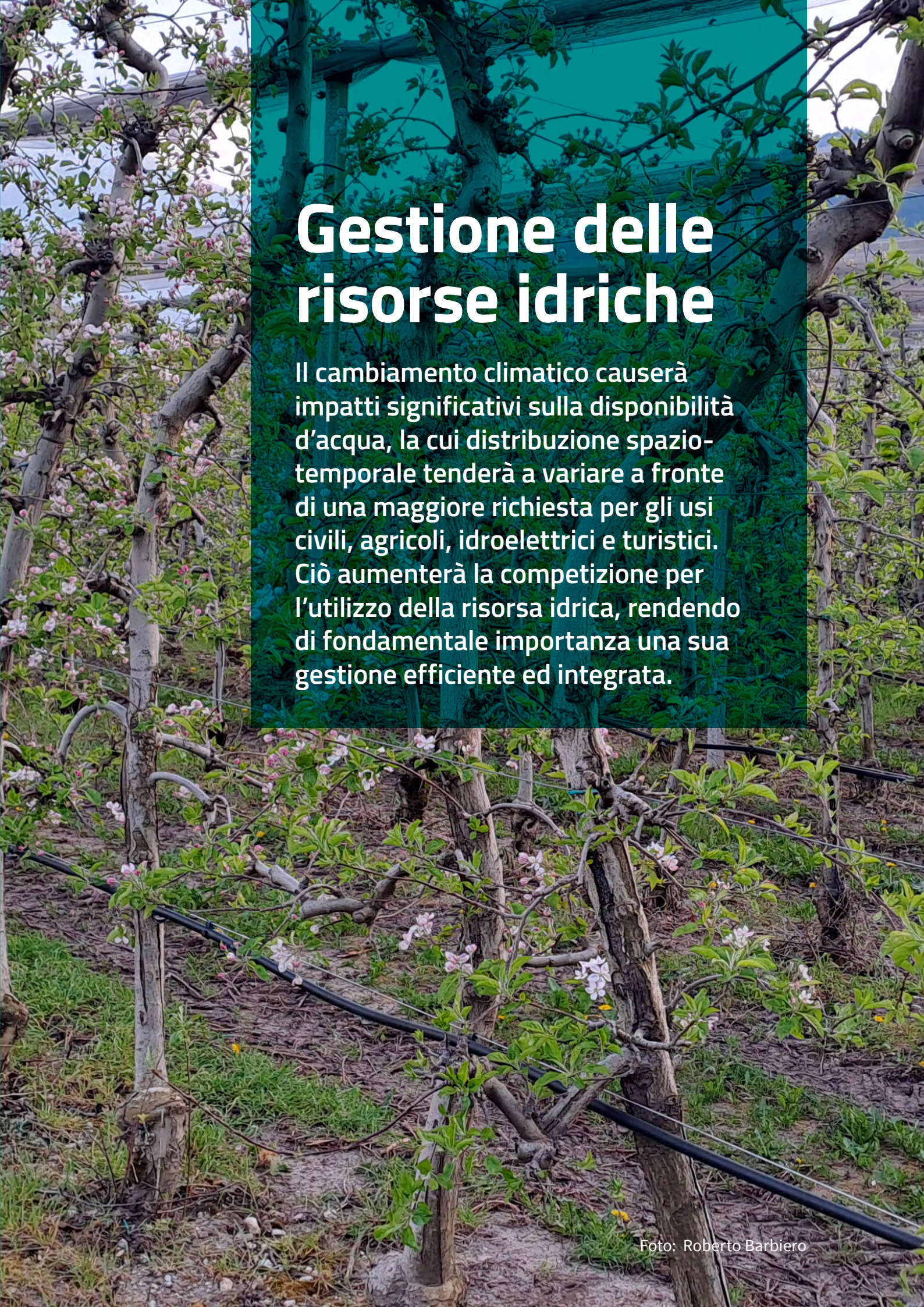


Incendio boschivo (foto: Pexels).



The background image shows a forest with tall, thin trees and a playground with a yellow slide and blue equipment in the distance. A large, dark log lies on the ground in the foreground. A teal semi-transparent rectangle is overlaid on the right side of the image, containing the text.

Impatti dei cambiamenti climatici. Economia e società



Gestione delle risorse idriche

Il cambiamento climatico causerà impatti significativi sulla disponibilità d'acqua, la cui distribuzione spazio-temporale tenderà a variare a fronte di una maggiore richiesta per gli usi civili, agricoli, idroelettrici e turistici. Ciò aumenterà la competizione per l'utilizzo della risorsa idrica, rendendo di fondamentale importanza una sua gestione efficiente ed integrata.

L'aumento della temperatura e le variazioni di intensità e distribuzione nelle stagioni delle precipitazioni causate dal cambiamento climatico stanno influenzando l'idrologia dei bacini idrografici montani, sia in termini di minor copertura nevosa e minor estensione dei ghiacciai che di minor disponibilità di risorsa che scorre nei corsi d'acqua, in particolare nella stagione estiva, o che è accumulata nei corpi idrici superficiali (laghi) e nelle falde acquifere sotterranee (vedi il capitolo ACQUA). Eventi di pioggia intensa più frequenti causano inoltre intorbidimento delle sorgenti, oltre a minor infiltrazione nel terreno e, quindi, minor ricarica degli acquiferi, con effetti negativi sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo.

A fronte dei prefigurati cambiamenti nella disponibilità di acqua, si prevede che i fabbisogni tenderanno ad aumentare, specialmente nelle stagioni estive, che, secondo gli scenari sviluppati, saranno più calde e secche rispetto al passato. Di conseguenza, alcuni settori strategici per il Trentino, quali quello della produzione di energia idroelettrica, dell'agricoltura e del turismo, oltre ai cosiddetti usi civili (che includono l'uso potabile, per l'alimentazione umana e gli usi igienico-sanitari), che complessivamente utilizzano grandi quantità di acqua, vedranno con probabilità una domanda progressivamente crescente. In una prospettiva di medio termine, le pressioni ambientali e umane sulla risorsa acqua potranno avere conseguenze significative, esacerbando le potenziali situazioni di competizione per l'uso tra i settori sopra citati, che potranno estendersi alle regioni limitrofe e, in particolare, ai territori di pianura che dipendono fortemente dalle portate derivabili dai corsi d'acqua che si originano dalla catena montuosa delle Alpi. Anche l'obbligo di rilascio del Deflusso Minimo Vitale (DMV) o del Deflusso ecologico al fine di assicurare il mantenimento dei servizi ecosistemici forniti dai corsi d'acqua, potrà costituire un ulteriore elemento di competizione.



Trento, fontana di Piazza Duomo (foto: Roberto Bragotto).

Il Decreto Direttoriale n. 30 del 13/02/2017 distingue e definisce i concetti di Deflusso Minimo Vitale (DMV) e Deflusso Ecologico (DE), del quale il DMV rappresenta una componente.

Deflusso Minimo Vitale (DMV)

Il DMV è definito come la portata che, in ogni tratto omogeneo del corso d'acqua, garantisce la salvaguardia delle caratteristiche fisiche (ossia morfologiche ed idrologiche) del corso d'acqua e il mantenimento del suo stato di qualità chimica e ecologica delle acque, tale da consentire il perseguimento degli obiettivi di qualità delle acque individuati dal D. Lgs. 152/2006 in recepimento della Direttiva Quadro Acque (DQA; Direttiva 2000/60/CE). Il DMV è individuato dal Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche della PAT.

Deflusso ecologico (DE)

Il DE è il regime idrologico che, in un tratto omogeneo di un corso d'acqua, è conforme al raggiungimento degli obiettivi ambientali definiti dalla DQA: impedire il deterioramento dello stato di tutti i corpi idrici superficiali, raggiungere il buono stato ecologico per i corpi idrici superficiali naturali, rispettare norme e obiettivi per le aree protette, compresi quelli di protezione di habitat e specie.

Ad oggi in Trentino le concessioni provinciali di prelievo dell'acqua sono circa 14.000 e consentono un prelievo teorico complessivo di 20 miliardi 201 milioni di metri cubi l'anno (dati relativi al 2022). Il primo settore per volume di derivazioni autorizzate è quello idroelettrico, con 18 miliardi 410 milioni di metri cubi, dei quali il 75% circa è associato alle Grandi Derivazioni Idroelettriche (quelle a servizio di centrali idroelettriche con potenza nominale media superiore a 3 MegaWatt). L'idroelettri-

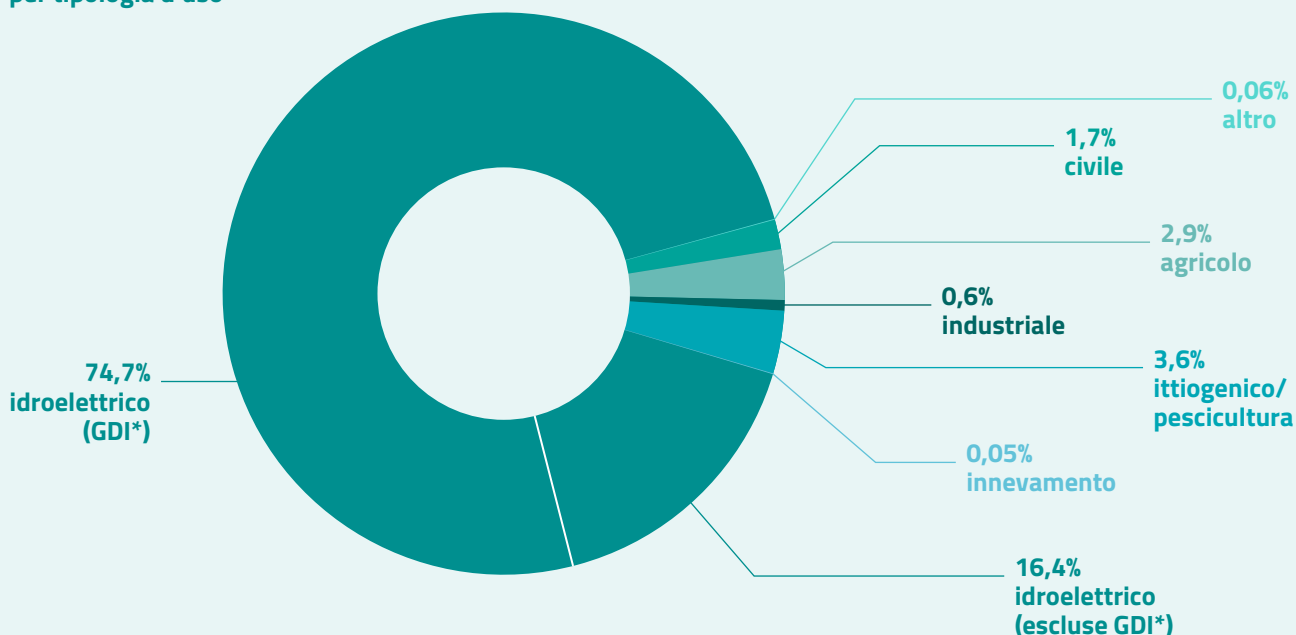
co resta di gran lunga il settore che usa i maggiori volumi di acqua, restituendola tuttavia dopo l'impiego, senza dissipazione della risorsa.

Al secondo posto si trova il settore della piscicoltura con 715,1 milioni di metri cubi d'acqua l'anno, seguito dall'agricoltura (592,3 milioni di metri cubi l'anno), dagli usi civili (331,1 milioni di metri cubi l'anno), dall'industria (128,8 milioni di metri cubi l'anno) e dall'innevamento artificiale (10,5 milioni di metri cubi l'anno).

Le concessioni di derivazione idrica in Trentino

Distribuzione percentuale per tipologia d'uso

*GDI: Grandi Derivazioni Idroelettriche.



Fonte: ISPAT, dati aggiornati al 2022.

Consumi idrici per gli usi civili

A livello provinciale non è disponibile, al momento, un dato aggregato certo e verificabile (ossia misurato e certificato) sul volume annuo effettivamente consumato per l'uso potabile e/o per altri utilizzi che attingono dagli acquedotti pubblici. Il dato infatti è gestito, al momento, dai singoli gestori di acquedotti (in gran parte si tratta di Comuni) con criteri, cadenze e precisioni non omogenee. Per questo è difficile quantificare le tendenze temporali dei consumi che, tuttavia, si ritiene possano crescere sia per effetto dei cambiamenti climatici, a causa dell'aumento previsto delle temperature, sia per l'aumento dell'afflusso turistico che contribuisce ad aumentare la pressione sulla risorsa idrica.

Le stime del consumo giornaliero pro capite di acqua potabile effettuate dalla PAT, che tengono conto anche dei maggiori consumi dovuti alle presenze turistiche nell'arco dell'anno, indicano per il Trentino un valore di circa 217 litri/abitante/giorno, perfettamente in linea con quello nazionale pari a 215 litri/giorno/abitante. Per il 2022 il dato complessivo è pari a circa 46,75 milioni di metri cubi (compresi i consumi domestici e non domestici allacciati all'acquedotto).

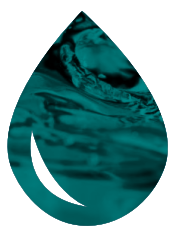
Anche il dato relativo al volume d'acqua potabile immesso in rete, necessario per poter stimare le perdite degli acquedotti, è affetto da una notevole incertezza. Con l'aggiornamento annuale dei bilanci idrici di acquedotto si potranno avere dati più affidabili grazie al sistema informativo

Strumenti di controllo dei consumi idro-potabili

Ogni Comune provvede autonomamente, o per il tramite dei propri gestori o di ditte specializzate, alla raccolta dei dati, attraverso sia letture dei contatori delle singole utenze che autoletture, ai fini della fatturazione dei servizi di acquedotto, fognatura e depurazione. Con la D.G.P n. 1241/2022 ("Individuazione di criteri tecnici inerenti il servizio idrico di acquedotto") è stato introdotto l'obbligo per i Comuni e/o per i Gestori di acquedotti pubblici di aggiornare annualmente il bilancio idrico degli acquedotti di competenza dove è presente anche il dato del consumo annuo fatturato misurato (ossia il volume annuo fatturato alle utenze).

SIR-FIA (Servizi Idrici in Rete - Fascicolo Integrato di Acquedotto), la piattaforma che raccoglie i dati acquedottistici provinciali. Esso raccoglie le informazioni su localizzazione e caratteristiche di tutte le opere che prelevano acqua da sorgenti, pozzi e corsi d'acqua, nonché dei serbatoi e delle condotte che costituiscono gli acquedotti potabili pubblici del Trentino. Sulla base dei dati ad oggi disponibili attraverso tale

piattaforma le perdite medie ponderate della rete acquedottistica provinciale possono essere stimate pari al 38%, un valore calcolato come rapporto tra il volume non erogato (volume immesso meno volume erogato) e il volume immesso in rete. Tale valore medio sull'intero territorio provinciale non può però considerarsi rappresentativo dello stato di efficienza reale dei singoli acquedotti.



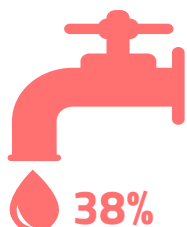
Consumo d'acqua potabile
giornaliero pro capite stimato
(Trentino):

217
litri/giorno/abitante



Consumo d'acqua potabile
complessivo (Trentino, 2022):

46,75 milioni
metri cubi/anno



Perdite medie stimate della
rete acquedottistica trentina

38%

L'adeguamento del sistema acquedottistico provinciale

Gli impatti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di acqua in futuro accrescono la necessità di un miglioramento urgente dell'efficienza del sistema acquedottistico trentino, che presenta una serie di sfide come: l'elevato numero di acquedotti e l'alto tasso di frammentazione delle reti e dei gestori ad esse associati, con mancanza di mutualità in caso di situazioni critiche (ossia mancanza della possibilità di compensazione tra diversi sistemi acquedottistici); la ridotta efficienza del 51% degli acquedotti e la conseguente necessità di investimenti per l'ammodernamento; la numerosità delle fonti di approvvigionamento (quasi 2000) che implicano alti costi di vigilanza, studio, manutenzione e gestione delle opere, nonché una grande attenzione al rispetto dei vincoli urbanistici sugli usi del territorio; la differenza tra la portata prelevabile prevista dalle concessioni per uso potabile e quella realmente derivata e utilizzata, che risulta sensibilmente inferiore alla prima, specialmente a seguito di periodi con scarse precipitazioni o di stagioni invernali con ridotto accumulo nevoso.

Una recente ricognizione delle infrastrutture del servizio idrico, effettuata dall'Agenzia Provinciale per le Risorse Idriche e l'Energia della PAT, ha evidenziato un fabbisogno finanziario molto consistente per rendere più efficienti gli acquedotti comunali. Tale fabbisogno non può essere sostenuto dal solo finanziamento provinciale e pertanto alcuni Comuni e gestori trentini hanno fatto richiesta di accesso a fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per l'efficientamento degli acquedotti e dei sistemi idrici.

Impatti sul settore idroelettrico

Uno dei settori socio-economici trentini dipendente dalla risorsa idrica che potrà essere maggiormente influenzato dagli impatti dei cambiamenti climatici è la produzione di energia idroelettrica. Le variazioni della disponibilità idrica connesse all'alterazione dei regimi di deflusso (vedi capitolo ACQUA) potrebbero comportare infatti importanti conseguenze, in particolare per gli impianti idroelettrici ad acqua fluente,

che sono strettamente condizionati dalla disponibilità naturale di risorsa idrica, mentre gli impianti serviti da grandi serbatoi di accumulo sono meno soggetti agli effetti di variabilità stagionale e di più lungo termine. Come approfondito nel capitolo ENERGIA, grazie agli studi effettuati nell'ambito del progetto Orientgate per i soli bacini del fiume Noce e del fiume Brenta, in Trentino probabilmente i cambiamenti



Diga del Careser (foto: Ariele Pitruzzella).

climatici lasceranno inalterata in maniera sostanziale la quantità totale di domanda idrica a scopo idroelettrico almeno fino al 2030 (come evidenziato dal Piano Energetico Ambientale Provinciale 2021-2030), ma più in avanti sono attese alterazioni più significative. A metà secolo (ossia per il trentennio 2041-2070) i risultati del progetto Orientgate prevedono per i due bacini del fiume Brenta e del fiume Noce una diminuzione della produzione idroelettrica potenziale annuale sia per i piccoli impianti che per le Grandi Derivazioni Idroelettriche, in maniera più accentuata per il bacino del Brenta che per quello del Noce. In generale, la maggior disponibilità idrica invernale non sembra in grado di controbilanciare negli anni a venire il decremento atteso nelle altre stagioni, in particolare in estate, stagione nella quale è infatti previsto in futuro un sensibile calo di produzione idroelettrica.

In questo scenario futuro, nei mesi estivi i grandi serbatoi idroelettrici potrebbero svolgere una funzione di compensazione dei volumi idrici “mancanti” nei corsi d’acqua, prestando però la dovuta attenzione a conciliare questo utilizzo con il ruolo strategico che i serbatoi stessi ricoprono nel garantire la stabilità del funzionamento delle rete nazionale, soprattutto in ragione dello sviluppo massivo di fonti di energia rinnovabile non programmabile (eolico e solare).

Gli utilizzi irrigui in agricoltura

L’agricoltura dovrà affrontare la sfida della diminuzione della disponibilità d’acqua potenzialmente accompagnata da una crescente richiesta per uso irriguo, in particolare in estate, a causa di episodi di siccità più frequenti, e in primavera, per fronteggiare la richiesta d’acqua legata al funzionamento degli impianti di irrigazione antibrina e al possibile aumento dei fenomeni di gelata tardiva, determinato dall’anticipo della ripresa vegetativa (vedi il capitolo AGRICOLTURA).

L’agricoltura rappresenta in Trentino il terzo settore in termini di concessioni d’uso della risorsa idrica dopo idroelettrico e piscicoltura, per un totale di 592,3 milioni di metri cubi l’anno. L’uso parsimonioso della risorsa idrica, promosso negli ultimi anni dalla Provincia autonoma di Trento attraverso investimenti specifici dedicati ai sistemi di irrigazione, ha determinato un consumo reale significativamente più basso. Infatti, ad oggi più dell’80% della superficie irrigata provinciale (circa 20.000 ettari) utilizza sistemi di irrigazione a goccia che consentono un grande risparmio di risorsa. Il rimanente 20% della superficie agricola, oggi ancora irrigata con sistemi cosiddetti a pioggia o ad aspersione, potrà essere auspicabilmente convertito ad una maggiore efficienza negli anni a venire.



Lago di Santa Giustina, panorama dai meleti (foto: Diego Marini).

L'efficienza e il risparmio idrico nell'irrigazione agricola, perseguito finora attraverso l'installazione diffusa di impianti a goccia, costituiranno anche in futuro una priorità per il territorio ed in particolare per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Un esempio è l'adozione di sistemi e tecnologie dell'agricoltura 4.0, tra le quali tipologie di irrigazione automatica ancora più efficienti, che si avvalgono di tecnologia gestibile da remoto e di applicazioni di intelligenza artificiale, che integrano la stima dei fabbisogni irrigui, dell'umidità dei suoli e del bilancio idrico con le previsioni meteorologiche, per una maggior sostenibilità delle pratiche di irrigazione.



Ripartizione delle superfici irrigate provinciali (irrigazione provinciale collettiva*; circa 17.300 ettari) per sistema di irrigazione.

*irrigazione provinciale collettiva: indica l'irrigazione effettuata grazie a consorzi irrigui, di bonifica o di miglioramento fondiario.

I Consorzi Irrigui e di Miglioramento Fondiario e di Bonifica

Sono oltre 230 i Consorzi Irrigui e di Miglioramento Fondiario della PAT, che complessivamente gestiscono oggi oltre un quarto del territorio provinciale e oltre il 78% della superficie irrigata provinciale. Grazie a costanti investimenti in infrastrutture e manutenzione, la Provincia può attualmente vantare uno dei sistemi di irrigazione più moderni d'Italia, con un sistema diffuso di irrigazione localizzata a goccia gestita tramite sistemi di automazione e controllo.

Il progetto IRRITRE a supporto di un'irrigazione più efficiente in Trentino

Il progetto, finanziato dalla Provincia autonoma di Trento, coinvolge la Fondazione Bruno Kessler, la Fondazione Edmund Mach e Trentino Digitale S.p.A., e interessa, nella sua fase sperimentale, tre aree campione del territorio trentino. Si tratta della realizzazione di un sistema informativo territoriale a supporto degli operatori agricoli, progettato per promuovere e favorire una gestione efficiente della risorsa idrica attraverso pratiche di irrigazione di precisione basate sulle esigenze delle colture (vedi capitolo AGRICOLTURA).

Uso dell'acqua per l'innevamento artificiale

A causa dei cambiamenti climatici ed in particolare dell'aumento previsto delle temperature, l'innevamento naturale e la permanenza stessa della neve al suolo stanno diminuendo, soprattutto nelle località di fondovalle e alle quote minori dove la riduzione progressiva dell'altezza media di neve che cade nella stagione invernale è netta, con conseguenze negative sul settore dello sci. Per ovviare alla riduzione di disponibilità di neve naturale, i comprensori sciistici si affidano sempre più all'innevamento artificiale, una pratica di adattamento in utilizzo da molti anni che tende a richiedere grandi quantità di acqua e di energia elettrica e che generalmente si avvale di bacini multifunzionali.

Per quanto le concessioni provinciali di utilizzo dell'acqua per l'innevamento artificiale costituiscano oggi una percentuale minima rispetto al totale (0,05%), alla luce degli impatti dei cambiamenti climatici sarà sempre più importante proseguire il processo di innovazione tecnologica in atto in modo da garantire efficientamento energetico e soluzioni che riducano i consumi idrici associati.

Il progetto Interreg Alpine Space Smart Altitude

Il progetto Smart Altitude, attivo tra il 2018 ed il 2021, annovera tra i partner principali la Fondazione Bruno Kessler. Tra gli obiettivi del progetto si inserisce quello di mettere in atto strategie e di utilizzare tecnologie avanzate volte all'ottimizzazione della produzione di neve artificiale, rendendo più efficiente il consumo d'acqua associato proveniente dal Lago Montagnoli, un bacino utilizzato a servizio dell'innevamento delle piste del comprensorio sciistico di Madonna di Campiglio, area di studio del progetto.

Un nuovo approccio per la gestione dell'acqua: il Nesso Acqua-Energia-Cibo-Ecosistemi

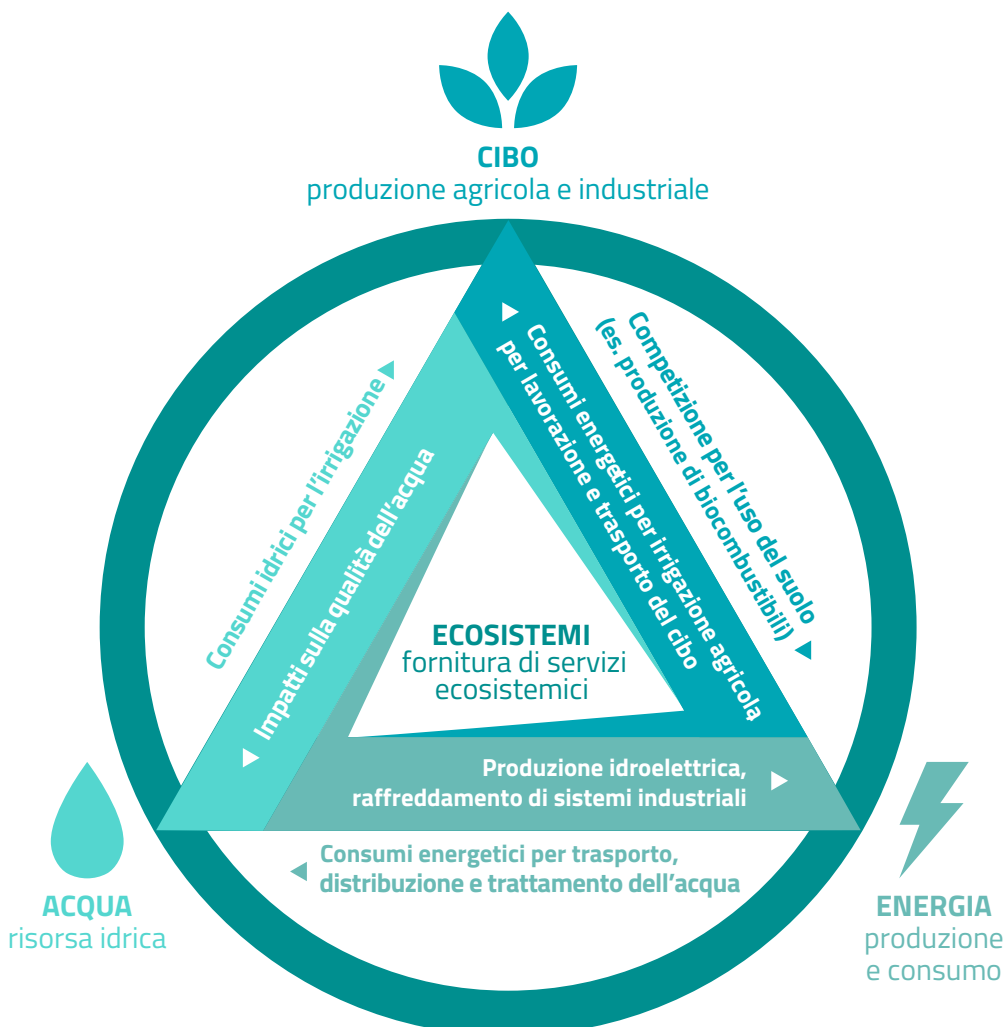
La sfida della gestione delle situazioni future di competizione e conflitto tra gli usi della risorsa idrica dovrà essere affrontata garantendo una gestione maggiormente integrata e sostenibile dei settori d'uso interessati, quali quello civile, energetico, agricolo e industriale, garantendo al tempo stesso la tutela dello stato di salute e la buona funzionalità degli ecosistemi, acquatici e non.

Il paradigma del Nesso Acqua-Energia-Cibo-Ecosistemi (in inglese "Water-Energy-Food-Ecosystems Nexus", abbreviato in WEFE Nexus), ampiamente riconosciuto e di recente adozione in Europa, evidenzia le interconnessioni multiple tra i vari usi e fabbisogni in termini di risorsa idrica, la cui disponibilità è limitata in termini di quantità e qualità, e le altre componenti del nesso, per le quali l'acqua è imprescindibile al fine di garantire la produzione di beni e servizi di diversa natura. In questo modello concettuale la rigenerazione della risorsa idri-

ca è assicurata dai servizi ecosistemici, la cui fornitura dipende a sua volta dalla disponibilità d'acqua che supporta gli ecosistemi stessi e che può essere intaccata dalle necessità e dagli impatti delle attività produttive coinvolte.

L'approccio che si basa sul concetto di WEFE Nexus è utile per promuovere soluzioni che prevedono una maggior integrazione delle politiche settoriali, in modo da trovare un equilibrio pienamente sostenibile tra le diverse necessità in termini di consumo di risorse e produzione di beni e servizi. In futuro sarà fondamentale riuscire ad identificare soluzioni di adattamento ai cambiamenti climatici per la gestione della risorsa idrica che siano in grado di ottimizzare le sinergie tra le politiche idriche, energetiche, agricole e ambientali, preservando al contempo la fornitura di servizi ecosistemici a lungo termine e l'uso sostenibile delle risorse.

Rappresentazione grafica del paradigma del Nesso Acqua-Energia-Cibo-Ecosistemi e di alcune delle interazioni che legano le sue differenti componenti.



La pianificazione e la gestione della risorsa idrica in Trentino

La gestione della risorsa idrica in Trentino è affidata ad una serie di strumenti di pianificazione e programmazione. Le misure di adattamento individuate dalla futura Strategia provinciale di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici per il settore della gestione delle risorse idriche saranno integrate e declinate per l'implementazione negli aggiornamenti dei documenti citati di seguito. In alcuni dei piani presentati sono già state introdotte, almeno parzialmente, misure di adattamento.

Il Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche - PGUAP

Il PGUAP, adottato con D.P.R. del 15 febbraio 2006, è lo strumento principale di governo delle risorse idriche della Provincia ed equivale ad un vero e proprio Piano di Bacino di rilievo nazionale. Il piano generale è diretto a programmare l'utilizzazione delle acque per i diversi usi e contiene le linee fondamentali per una sistematica regolazione dei corsi d'acqua, con particolare riguardo alle esigenze di difesa del suolo, e per la tutela delle risorse idriche. Promuove la valorizzazione dei corsi d'acqua e l'uso sostenibile delle risorse idriche e definisce i principi in base ai quali sono rilasciate le concessioni.

Bilancio idrico provinciale

Il bilancio idrico del territorio provinciale (parte integrante del PGUAP) rappresenta uno strumento conoscitivo di sintesi degli aspetti quantitativi e qualitativi della risorsa idrica. Esso restituisce infatti una fotografia della disponibilità idrica attuale che caratterizza i bacini e i corsi d'acqua provinciali, in relazione agli utilizzi in essere ed alla disciplina dei rilasci effettuati come deflusso minimo vitale (DMV) previsto dal PGUAP, riportando inoltre considerazioni specifiche sulla qualità dei corpi idrici in funzione del loro stato quantitativo. Il secondo aggiornamento del bilancio idrico provinciale è attualmente in fase di approvazione.

Piani di gestione delle acque dei Distretti idrografici

Con le disposizioni del Testo Unico in materia ambientale (Decreto legislativo n. 152/2006) il territorio italiano è stato ripartito in sette distretti idrografici. In ciascun distretto idrografico è istituita l'Autorità di bacino distrettuale (Autorità di Distretto) che svolge le attività di pianificazione necessarie per la difesa idrogeologica, per la realizzazione delle mappe della pericolosità e del rischio e per la tutela delle risorse idriche e degli ambienti acquatici. Il territorio trentino è interessato da due Distretti idrografici, corrispondenti all'Autorità di Distretto idrografico delle Alpi Orientali, che comprende i bacini dei fiumi Adige e Brenta, e all'Autorità di Distretto del fiume Po, comprendente i bacini dei fiumi Sarca e Chiese. Per attuare in particolare le disposizioni comunitarie discendenti dalla Direttiva Acque (2000/60/CE) le Autorità di Distretto provvedono all'elaborazione dei rispettivi Piani di gestione delle acque.

Il Piano di Tutela delle Acque - PTA 2022-2027

Il PTA, ad oggi aggiornato al periodo 2022-2027, è il documento di pianificazione che contiene le azioni e le misure volte a garantire il raggiungimento e/o il mantenimento degli obiettivi di qualità ambientale dei corpi idrici superficiali e sotterranei, impedire il deterioramento della qualità della risorsa idrica e garantirne la tutela. L'allegato M del PTA, "Il ruolo dei cambiamenti climatici", contiene un primo catalogo di possibili misure di adattamento per la tutela della risorsa idrica in termini sia di qualità che di quantità.



Impianti irrigui a goccia (foto: Roberto Barbiero).

Piano Energetico Ambientale Provinciale - PEAP 2021-2030

Il PEAP è il documento di programmazione provinciale degli interventi in materia di energia, contiene le misure da implementarsi per raggiungere gli obiettivi di mitigazione dei cambiamenti climatici al 2030, tra le quali è compreso anche l'utilizzo energetico (idroelettrico) della risorsa idrica.

Il Piano di gestione del rischio alluvioni - PGRA

Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni prende in considerazione tutti gli aspetti della gestione del rischio di alluvioni, e in particolare le fasi di prevenzione, protezione e preparazione, comprese le previsioni di alluvioni e i sistemi di allertamento. Il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni redatto dalla Provincia autonoma di Trento integra i Piani di Gestione delle due Autorità distrettuali di bacino competenti per il territorio provinciale.

La Giunta Provinciale ha approvato nel 2021 il primo aggiornamento e revisione del Piano di gestione del rischio alluvione della Provincia di Trento per il secondo ciclo di gestione (2022-2027).

Il Piano Irriguo Provinciale

Si tratta di uno strumento in fase di predisposizione, finalizzato all'individuazione dei percorsi futuri, delle iniziative e degli interventi da intraprendere, anche con l'intento di far fronte agli effetti del cambiamento climatico sul settore agricolo, così da sviluppare un agrosistema irriguo resiliente, basato sull'utilizzo efficiente e razionale della risorsa idrica, nonché sull'uso della tecnologia. Il Piano irriguo provinciale, partendo dall'analisi della situazione esistente, definirà le esigenze in termini di fabbisogni irrigui del comparto agricolo nonché i prioritari interventi (come ad esempio nuovi bacini di accumulo, connessioni tra reti irrigue esistenti e sviluppo tecnologico).



Pericoli naturali

Il probabile aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi renderà necessario adeguare la gestione del rischio da pericoli naturali, al fine di limitare le conseguenze su ecosistemi, comunità umane e attività economiche

Gli effetti dei cambiamenti climatici sui rischi originati da pericoli naturali costituiscono una tra le principali sfide per le regioni alpine, caratterizzate da un territorio intrinsecamente soggetto ai fenomeni di dissesto idrogeologico provocati dagli eventi meteorologici estremi. Tali conseguenze potrebbero comportare un complessivo aumento del rischio di danni a beni, infrastrutture e servizi, oltre che per la sicurezza delle persone, con conseguenze negative per il benessere e lo sviluppo economico delle comunità alpine.

Con il termine “pericolo naturale” ci si riferisce a un processo naturale che possa potenzialmente causare conseguenze negative per l'uomo, gli insediamenti, le infrastrutture o l'ambiente stesso. Gli eventi me-

teorologici estremi, quali piogge intense o assenza prolungata di pioggia, e l'aumento progressivo delle temperature sono spesso le cause di innesco di pericoli naturali quali: alluvioni, allagamenti, frane, colate detritiche, valanghe, ondate di calore, siccità, incendi, tempeste di vento, grandinate. Pericoli naturali diversi possono verificarsi contemporaneamente (pericoli naturali *composti*) con impatti complessivamente più gravi, o possono causare impatti *a catena* o *a cascata* (ad esempio, schianti di alberi provocati da tempeste di vento o da nevicate pesanti possono danneggiare strade ed elettrodotti, interrompendo i trasporti e la fornitura di energia elettrica, con ulteriori conseguenze dannose).



Piena di ottobre 2023 del fiume Adige a Borgo Sacco di Rovereto (foto: Roberto Barbiero).

Eventi estremi e tempi di ritorno

Gli eventi estremi sono definiti come eventi meteorologici caratterizzati da bassa probabilità/frequenza di accadimento e da un tempo di ritorno associato relativamente elevato. Il tempo di ritorno è indicativo della frequenza media con la quale è lecito aspettarsi che un evento dello stesso tipo e della stessa entità si ripeta o venga superato. In una situazione di cambiamento climatico, e quindi di non stazionarietà delle statistiche climatiche, tale concetto può rivelarsi non più adeguato.

Eventi estremi e cambiamenti climatici: la scienza dell'attribuzione

Gli scienziati sono ormai concordi nell'affermare che, in generale, i cambiamenti climatici hanno reso e renderanno in futuro più frequenti e intensi gli eventi meteorologici estremi, a causa dell'alterazione dei fattori che contribuiscono a determinarli: i regimi di circolazione atmosferica, ma anche la temperatura dei mari e il contenuto di vapore in atmosfera, entrambi in aumento.

A tal proposito, è fondamentale chiedersi se e quanto il cambiamento climatico abbia influenzato o meno le caratteristiche di uno specifico evento estremo: esso si sarebbe verificato con intensità e frequenza comparabili anche in assenza di cambiamenti climatici? Qui entra in gioco l'*attribution science*, o scienza dell'attribuzione, che consente di verificare a posteriori se un dato evento meteo-climatico estremo e la sua intensità rientrano nella normale variabilità statistica oppure sono da attribuire, e in che misura, al riscaldamento globale e all'attuale crisi climatica.

I pericoli naturali in Trentino

Il comportamento osservato per gli indicatori associati ai valori estremi di temperatura e precipitazione e alcuni cenni in merito alle possibili tendenze future sono descritti rispettivamente nei capitoli TEMPERATURE E PRECIPITAZIONI e SCENARI FUTURI. In sintesi, mentre i segnali osservati di aumento degli estremi di temperatura in particolare negli ultimi decenni sono evidenti, quelli relativi agli estremi di precipitazione

non sono sufficientemente robusti per poter identificare una tendenza univoca per il territorio provinciale. Gli scenari climatici futuri indicano, tuttavia, significativi ulteriori aumenti degli estremi di temperatura e un possibile incremento degli estremi di precipitazione in intensità e frequenza, più pronunciato per gli eventi di durata sub-giornaliera (dell'ordine di poche ore).

Siccità

Nelle Alpi si rilevano chiari cambiamenti nella stagionalità della siccità, che potrebbero rivelarsi maggiormente persistenti in futuro a causa dell'alterazione dei regimi stagionali di precipitazione, della diminuzione della copertura nevosa e dell'aumento dell'evapotraspirazione per le maggiori temperature, con significativi effetti sui sistemi naturali e sui settori socio-economici. Il contestuale incremento della domanda d'acqua potrà acuire i conflitti tra i suoi diversi usi, soprattutto nella stagione estiva (vedi capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE).

In tutta l'area alpina italiana dagli anni '90 si osserva infatti una forte siccità nivale, in particolare nell'ultimo decennio (2013-2023). In Trentino, inoltre, la durata massima dei periodi caratterizzati da assenza di pioggia è aumentata in maniera piuttosto chiara, di circa 2,5-3,5 giorni nel trentennio 1991-2020 rispetto al 1961-1990 (circa il 10% in più). La combinazione di minori

contributi di fusione nivale, scarse precipitazioni liquide, temperature elevate e aumento della domanda idrica hanno recentemente fatto sperimentare a tutto il Nord Italia e anche al bacino del fiume Adige una situazione di grave siccità e scarsità d'acqua all'inizio della primavera e alla fine dell'estate 2022, con conflitti tra i diversi utilizzi della risorsa, ad esempio tra le società idroelettriche che gestiscono i bacini di accumulo a monte e gli agricoltori delle aree a valle e in pianura.

Eventi siccitosi più intensi e frequenti in futuro potrebbero generare maggiori conflitti tra gli usi idrici sia all'interno del territorio provinciale che con le regioni confinanti, oltre ad amplificare potenzialmente il rischio di incendi boschivi e di proliferazione di parassiti come il bostrico (vedi capitolo FORESTE), con effetti a cascata a causa della riduzione della capacità di fornire servizi ecosistemici di protezione dal rischio idrogeologico da parte degli ecosistemi forestali.

Osservatorio alpino sulla siccità (ADO)

L'ADO monitora la situazione di siccità nella regione alpina integrando dati provenienti da modelli climatici, osservazioni satellitari e stazioni terrestri di tutti i paesi alpini (<https://ado.eurac.edu>).



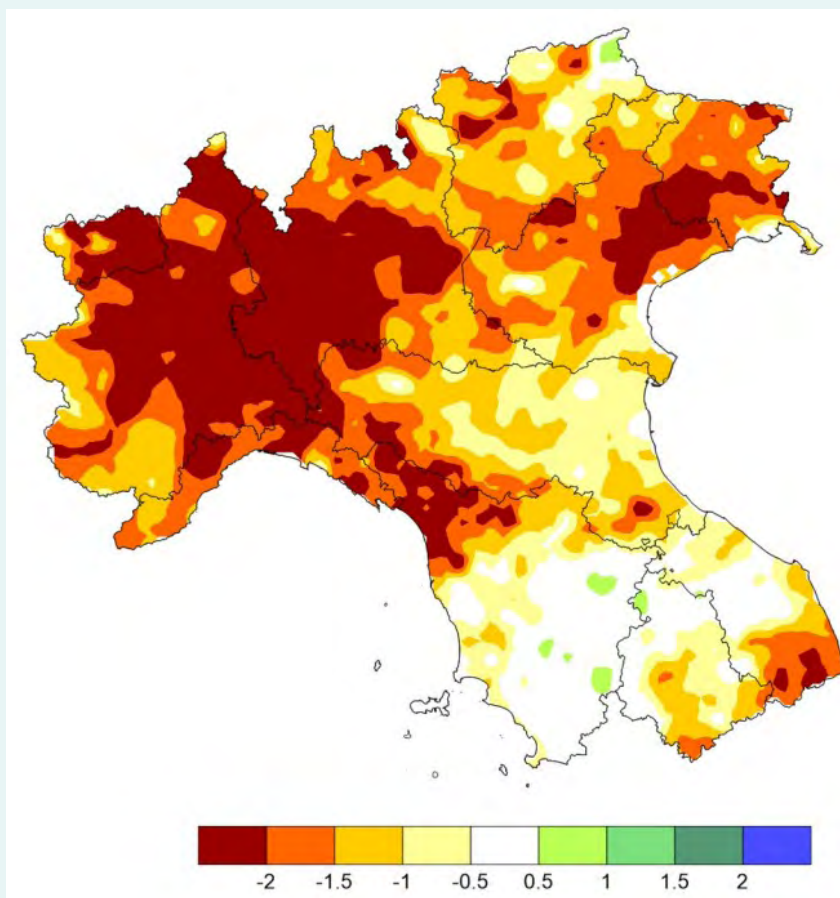
Lago di Tenno con livello idrometrico ridotto nel luglio 2022 (foto: Roberto Barbiero).

Il monitoraggio della siccità in Italia

Nell'ambito del progetto AR-CIS - Archivio Climatologico per l'Italia Centro Settentrionale, a partire da agosto 2020 viene aggiornato con cadenza mensile l'indice SPI (Standardised Precipitation Index) a 3, 6, 12 mesi per il Nord e Centro Italia (dal 2023 anche l'SPI a 24 mesi). L'indice è calcolato rispetto alla media storica delle precipitazioni per il periodo 1961-2020, a partire dai dati misurati dalle stazioni delle reti di monitoraggio meteorologico dei servizi meteorologici regionali e/o dei centri funzionali regionali.

La siccità meteorologica del 2022

È nota la siccità che ha colpito in maniera particolarmente severa le regioni settentrionali durante il 2022, l'anno più siccitoso in Italia dal 1800 ad oggi: il deficit annuale di precipitazione è stato pari a circa il 30% rispetto alla media del trentennio 1991-2020, toccando quasi il 40% in Nord Italia (fonte: CNR ISAC).



Mappa dell'indice SPI a 12 mesi riferito al mese di dicembre 2022 (anomalia annuale standardizzata calcolata rispetto alla media 1961-2020) per il Nord e Centro Italia. I valori negativi indicano siccità meteorologica, con le condizioni più critiche corrispondenti ai valori inferiori a -2.

Ondate di calore

Le ondate di calore sono tra i rischi climatici con il maggiore impatto in termini di mortalità e perdite economiche, con effetti amplificati nelle maggiori aree urbane.

In Trentino la durata delle ondate sta aumentando rapidamente e in maniera evidente: circa 20 giorni in più nel 1991-2020 rispetto al 1961-1990, con punte fino a 35 giorni in più. In Trentino-Alto Adige, nel periodo 1981-2018, le ondate di calore hanno mostrato tendenze diffuse all'aumento, causando una crescente

esposizione della popolazione al caldo estremo. Per l'intera regione si è riscontrato un aumento del rischio di ondate di calore (~12% in più), con un aumento molto più pronunciato (~45%) nelle città più grandi, anche a causa della variazione di alcuni fattori di vulnerabilità di carattere demografico e sociale, quali la popolazione urbana in aumento, il progressivo invecchiamento e l'aumento del numero di nuclei familiari composti da una sola persona (vedi capitolo SALUTE).

Tempeste di vento

Non sono disponibili per il Trentino studi specifici che riguardano l'evoluzione nel tempo di eventi caratterizzati da venti estremi, anche a causa della difficoltà di disporre di serie di dati sufficientemente lunghe. Tuttavia, è possibile che, a causa dei cambiamenti climatici, tali eventi possano in futuro aumentare in frequenza e/o intensità, con impatti primari (ad esempio, schianti forestali) e secondari (ad esempio, diffusione del bostrico) di conseguenza in aumento.

L'attenzione nella gestione dei rischi da pericoli naturali si concentra in particolare sugli estremi di vento che interessano scale spaziali e temporali ampie, come la tempesta Vaia di fine ottobre 2018, ma si rivolge anche ad eventi di minor entità potenzialmente associati a fenomeni convettivi temporaleschi, come quelli che hanno colpito la Val di Fassa il 5 agosto 2022 e l'area di Torbole il 5 maggio del 2023.



Effetti di Vaia sui boschi della Val di Fiemme, novembre 2018 (foto: Roberto Barbiero).

La tempesta Vaia: un evento estremo con impatti a cascata

Nella serata del 29 ottobre 2018 i venti eccezionalmente intensi (fino a 200 km/h circa) della tempesta Vaia hanno colpito duramente i territori dell'Alto Adige, del Trentino e del Veneto, causando enormi danni materiali ed economici e trasformando pesantemente il paesaggio. L'evento, caratterizzato anche dal verificarsi in contemporanea di abbondanti precipitazioni cumulate, ha causato impatti gravi e diffusi sul territorio: alluvioni, frane, estesi danni a foreste (schianti), colture, abitazioni, infrastrutture e beni materiali, oltre a mettere in crisi per alcuni giorni servizi fondamentali come la fornitura d'acqua potabile e energia elettrica, nonché la rete telefonica e Internet, il trasporto pubblico e la mobilità privata, l'approvvigionamento di cibo. La tempesta Vaia rappresenta quindi un esempio di un evento estremo di tipo composto con diffusi e molteplici impatti a cascata, che si stanno avvertendo fino ad oggi (vedi capitolo FORESTE).

STAZIONE	VELOCITÀ MASSIMA DELLE RAFFICHE - 29/10/2018	RECORD STORICO PRECEDENTE
Passo Manghen 2.035 m s.l.m.	191,5 km/h	153,7 km/h (09/02/2015)
Monte Bondone 1.490 m s.l.m.	141 km/h	109,4 km/h (16/11/2002)
Passo Rolle 2.012 m s.l.m.	138,2 km/h	127,4 km/h (06/01/2012)
Tremalzo 1.560 m s.l.m.	133,9 km/h	97,9 km/h (12/01/2015)
Passo Pian delle Fugazze 1.170 m s.l.m.	120,2 km/h	93,2 km/h (03/11/2013)

I valori record raggiunti dalle raffiche di vento registrate durante la tempesta Vaia in Trentino (fonte dei dati: Meteotrentino PAT).

Grandinate

Le grandinate sono eventi estremi che causano importanti impatti su beni materiali (ad esempio automobili e abitazioni) e attività umane (tra tutte l'agricoltura), con danni economici spesso elevati. Uno studio sulla frequenza della grandine nel bacino del Mediterraneo nel periodo 1999-2021, basato su dati satellitari, ha mostrato come nell'area che comprende le Alpi e la Pianura Padana nei mesi da giugno ad agosto (quando solitamente si osservano le grandinate) il numero medio di eventi sia aumentato sostanzialmente passando dal periodo 1999-2010 al più recente 2010-2021. Un ulteriore studio statistico sulla frequenza della grandine grossa e molto grossa (rispettivamente > 2 cm e > 5 cm di diametro) in Europa nel periodo 1950-2022 ha evidenziato un aumento delle grandinate su gran parte della penisola italiana. In particolare, il Nord Italia è l'area caratterizzata dal maggior incremento di questi fenomeni: rispetto agli anni '50, infatti, il numero di grandinate con chicchi di diametro maggiore di 5 cm risulta triplicato.

I rilievi di grandine effettuati in Trentino dalla Fondazione E. Mach per il periodo 1974-2009 hanno rivelato una tendenza di crescita per alcuni parametri caratteristici delle precipitazioni grandinogene di interesse per la pronunciata correlazione con i danni causati alle colture agricole, quali, ad esempio, il numero di eventi più intensi, nonostante il numero complessivo delle grandinate rilevate in media e la superficie colpita non abbiano mostrato tendenze analoghe per il periodo di analisi (vedi capitolo AGRICOLTURA).



Grandinata (foto: commons.wikimedia.org/wiki/File:Hail_RichmondHill.jpg).

Il record europeo di dimensione dei chicchi di grandine (15 cm) è stato recentemente superato due volte in Italia nel corso della serie di forti temporali che, nel mese di luglio 2023, hanno interessato il nord-est del Paese.

Il 19 luglio a Carmignano di Brenta (PD) è stato rinvenuto un chicco delle dimensioni di 16 cm. Solo 5 giorni dopo, il 24 luglio, ad Azzano Decimo (PN) è stato documentato un chicco di 19 cm di diametro, il nuovo record europeo confermato dagli esperti dello European Severe Storm Laboratory.

Alluvioni

Gli eventi alluvionali sono i pericoli naturali responsabili dei maggiori costi umani ed economici in Europa e sulle Alpi. L'aumento delle temperature e la variazione del regime delle precipitazioni, con eventi di precipitazione estrema su brevi periodi in probabile aumento, potrà in futuro aggravare i rischi associati agli eventi alluvionali, specialmente nei contesti più esposti e vulnerabili e in funzione della gestione del territorio.

Gli studi effettuati per l'arco alpino sottolineano il maggior ruolo che potranno assumere in futuro gli eventi di pioggia su neve associati all'aumento delle temperature e all'innalzamento del limite delle neviccate, che potranno concorrere a generare alluvioni di grande entità nei bacini alpini, ma anche le cosiddette alluvioni lampo (flash flood in inglese) innescate da fenomeni convettivi che, pur interessando aree più piccole e tempi più brevi, potrebbero causare danni significativi dovuti a fenomeni collaterali come le colate detriche.

La tempesta Vaia: precipitazioni eccezionali e fenomeni alluvionali

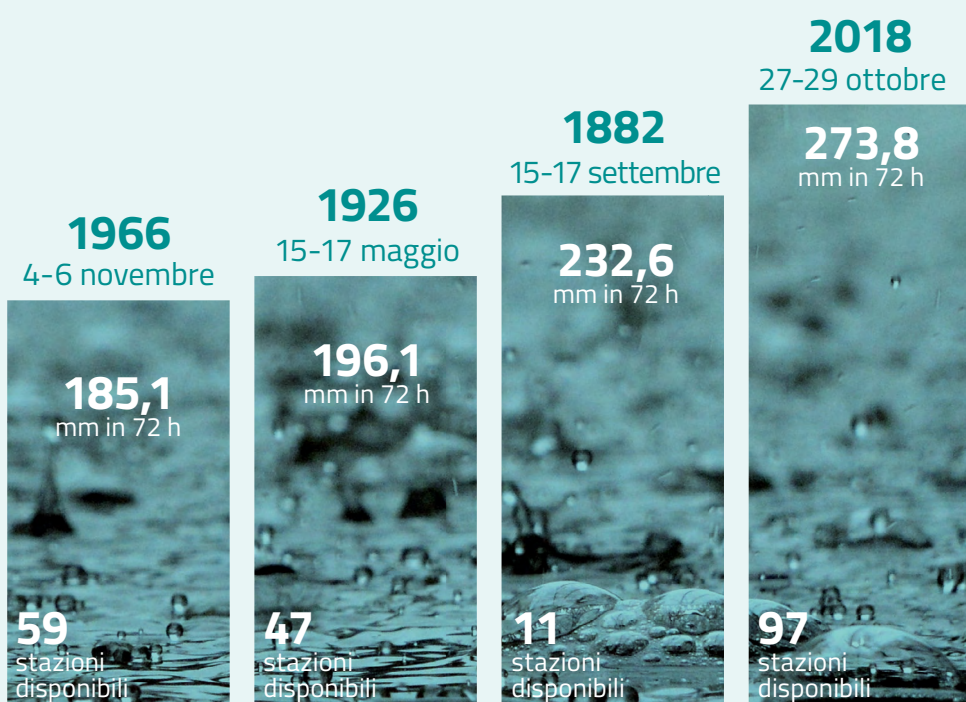
La perturbazione del 27-29 ottobre 2018 è stata caratterizzata, oltre che da venti estremamente forti, anche da precipitazioni di intensità eccezionale e, di conseguenza, da fenomeni alluvionali diffusi. In 72 ore in media su tutto il Trentino sono caduti circa 275 mm di pioggia, con punte massime superiori ai 600 mm presso le stazioni di Passo Cereda e Pian delle Fugazze. In trenta località del territorio sono stati misurati tra 300 e 500 mm di pioggia e altre cinquanta stazioni hanno registrato tra 200 e 300 mm. Questo ha originato un significativo incremento delle portate lungo l'intero reticolo idrografico del territorio provinciale, che ha interessato sia i tratti torrentizi che fluviali, con diffusi fenomeni di erosione e di trasporto e deposito di detriti e legname, soprattutto nelle aree di versante e in corrispondenza di alcuni conoidi di fondovalle. La quantità di pioggia misurata ha superato nettamente quella associata alle due più significative alluvioni storiche che hanno colpito il Trentino nel 1882 (circa il 20% in più) e nel 1966 (circa il 50% in più), al netto della differente disponibilità di dati e della specificità del singolo evento. Infatti, per entrambe le alluvioni storiche le abbondanti precipitazioni liquide sono state accompagnate da importanti fenomeni di fusione della neve depositata in quota nei giorni precedenti (indotta da un marcato rialzo termico), determinando un ulteriore rapido aumento delle portate di fiumi e torrenti.

Nel caso di Vaia gli effetti sono stati limitati dalle opere di sistemazione idraulica e forestali presenti. Nelle zone di versante, le opere di presidio esistenti sul territorio, attraverso l'attivazione delle briglie filtranti e il riempimento di piazze di deposito hanno intercettato materiale solido e vegetale veicolato verso valle delle onde di piena. Nelle zone di fondovalle, invece, gli effetti dell'evento sono stati ridotti dallo svasso preventivo di alcuni bacini artificiali strategici (come quello di Santa Giustina) operando una gestione controllata dei deflussi e, di conseguenza, un'efficiente laminazione del picco di piena. Nei territori della bassa Vallagarina e della pianura veronese la piena del fiume Adige è stata contenuta grazie all'apertura della galleria scolmatrice Adige-Garda, deviando parte della portata in transito a Mori verso il lago di Garda.

I risultati preliminari di un recente studio di attribuzione suggeriscono che il cambiamento climatico abbia aumentato di circa 3,4 volte (con un intervallo di confidenza compreso tra 0,8 e 12,0 volte) la frequenza di accadimento di eventi di precipitazione intensi quanto Vaia, se si mettono a confronto il periodo di riferimento 1960-1985 con il periodo di analisi più recente 1995-2021.

Valori massimi di precipitazione cumulata su 72 ore osservati negli ultimi 150 anni in Trentino.

Si noti che il valore medio di precipitazione indicato per l'intero territorio provinciale è calcolato su un numero diverso di stazioni disponibili a seconda dell'anno dell'evento; lo stesso funzionamento delle stazioni era in passato manuale, con registrazione del dato ogni 24 ore a fronte dell'attuale frequenza di acquisizione di 5 minuti delle stazioni automatiche oggi in funzione (fonte: Meteotrentino PAT).



L'alluvione lampo dell'agosto 2022 in Val di Fassa

Un esempio significativo di flash flood (evento alluvionale lampo) è stato l'intenso nubifragio che ha interessato una ristretta zona della Val di Fassa nel tardo pomeriggio e sera del 5 agosto 2022. Una stazione amatoriale situata a Monzon ha misurato 123 mm di pioggia caduti tra le 17.15 e le 19.45. Le precipitazioni hanno determinato un repentino ingrossamento dei torrenti, locali allagamenti e frane con numerosi danni osservati nel territorio dei comuni di San Giovanni di Fassa - Sèn Jan, Mazzin e Campitello di Fassa. Anche in questo caso gli effetti sul territorio sono stati mitigati dalle opere di presidio che hanno operato un efficace intercettamento del materiale solido.



Effetti post-evento presso rio Toal de Marisana (foto: Servizio Bacini Montani PAT).



Briglia filtrante e piazza di deposito rio Udai (foto: Servizio Bacini Montani PAT).

Inondazioni da laghi proglaciali

Il ritiro e la fusione dei ghiacciai possono portare alla formazione di cosiddetti laghi proglaciali, che raccolgono le acque di fusione. In caso di rottura dello sbarramento naturale o di tracimazione, essi possono potenzialmente determinare il rischio di improvviso deflusso a valle e inondazione. Non c'è oggi evidenza di tale tipologia di rischio in Trentino; resta da valutare se, con l'accelerazione della fusione dei corpi glaciali trentini, il rischio possa potenzialmente assumere maggiore concretezza in futuro.

Colate detritiche

Le colate detritiche, misture di acqua e sedimenti in elevata concentrazione, si originano principalmente grazie a fattori meteorologici scatenanti come le precipitazioni intense, in condizioni di disponibilità di sedimenti in loco. Pur non essendo presenti studi specifici per il Trentino sulla variazione delle colate

detritiche nel tempo, analisi effettuate in altri contesti alpini indicano come eventi di precipitazione intensa più frequenti in futuro, associati ad una maggiore disponibilità di detriti sciolti e facilmente mobilizzabili nelle aree di recente deglaciazione, lascino supporre un possibile aumento del rischio di colate detritiche.

Crolli glaciali

I crolli glaciali sono tra i movimenti di massa meno conosciuti e meno studiati, sia perché grandi crolli sono piuttosto rari, sia perché tali fenomeni si sviluppano spesso in aree remote e poco frequentate, anche in ambito alpino. Tuttavia, la rapidità senza precedenti delle alterazioni dei ghiacciai dovute ai cambiamenti climatici e la crescente pressione antropica sugli ambienti di alta quota richiedono oggi una considerazione più attenta e approfondita di questi fenomeni naturali, che possono innescare a cascata pericolose valanghe di ghiaccio e roccia, come tragicamente evidenziato dal crollo che ha interessato il ghiacciaio della Marmolada il 3 luglio 2022.

I crolli glaciali caratterizzati da volumi superiori a 10.000 m³ avvenuti nelle Alpi italiane tra il 1930 e il 2022 sono stati catalogati da un recente studio, che ha documentato in totale 68 crolli glaciali con volumi per lo più compresi tra 10.000 e 50.000 m³. Gli eventi si sono verificati principalmente in estate, con un picco di frequenza in agosto, ed è stato riscontrato un forte aumento del numero dei crolli documentati a partire

dagli anni Novanta. Ad oggi non sono presenti studi analoghi per il Trentino che confermino o smentiscano la tendenza riportata per l'arco alpino, né l'impatto del cambiamento climatico sulla stessa.



Crollo dovuto al degrado del permafrost, avvenuto in Trentino nell'estate 2023 (foto: Servizio Geologico, PAT).

Frane e crolli

L'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi piovosi intensi, che rappresentano un fattore primario di innesco di fenomeni franosi, favorirà potenzialmente un aumento del rischio di frane e del numero di fattori esposti quali persone, beni e servizi. Il ritiro dei ghiacciai e il degrado del permafrost espongono inoltre anche il territorio d'alta quota a maggiori rischi di crolli rocciosi e frane. Da ultimo, le alterazioni degli ecosistemi forestali in termini di distribuzione e composizione della vegetazione a causa dei cambiamenti climatici potrebbero comportare effetti a cascata influenzando negativamente la stabilità dei pendii, l'erosione dei suoli e la probabilità di frane.

Valanghe

La valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici sul rischio valanghivo è condizionata dalla complessità del monitoraggio sia del manto nevoso che dell'attività valanghiva. L'evoluzione dei fenomeni valanghivi in un clima più caldo rimane pertanto ancora poco conosciuta e studiata.

A livello di processi fisici, l'attività valanghiva è condizionata dalle temperature, in aumento, e dagli apporti di neve, che hanno subito importanti alterazioni negli ultimi decenni nelle Alpi. Come riportato nel capitolo NEVE, GHIACCIAI E PERMAFROST, il regime delle precipitazioni nevose nelle Alpi e in Trentino ha



Pendio con paravalanghe a protezione della strada presso Passo Manghen (foto: Efisio Siddi).

mostrato nel periodo 1971-2019 un'elevata variabilità interannuale e una generale tendenza alla riduzione dell'entità della copertura nevosa e della durata della neve al suolo soprattutto sotto i 2000 m s.l.m., mentre alle quote superiori non è stato osservato un cambiamento significativo. Studi svolti in ambito alpino evidenziano come per l'attività valanghiva sia prevista in media una diminuzione, pur caratterizzata da forte variabilità interannuale. La diminuzione appare amplificata in primavera e a bassa quota (principalmente grazie agli apporti nevosi ridotti), mentre si prevede un aumento delle valanghe in inverno ad alta quota a causa delle temperature più elevate. In generale, è atteso in futuro un maggior incremento di valanghe di neve umida e bagnata, a discapito delle valanghe di neve asciutta.

Incendi

Gli incendi boschivi sono fenomeni distruttivi che spesso danneggiano irreparabilmente gli ecosistemi forestali, ponendo a repentaglio la sicurezza umana. Vanno quindi presi in considerazione con attenzione anche in un territorio, come quello trentino, nel quale sono relativamente poco frequenti, con una tendenza complessivamente decrescente nel tempo sia per numero di eventi che per estensione. Considerando l'ultimo ventennio, i dati del Servizio foreste PAT evidenziano un andamento annuale altalenante per il numero di incendi boschivi, in buona parte spiegabile dall'andamento delle precipitazioni: nel 2002 si è osservato il picco massimo con 100 incendi, mentre nel 2014 il numero minimo di 5 incendi.

La frequenza degli incendi boschivi in Trentino e nelle Alpi è maggiore nei mesi caratterizzati da scarse precipitazioni e in presenza di accumulo di sostanza secca nei soprassuoli, ossia nella stagione invernale-primaverile. In annate caratterizzate da estati particolarmente calde e secche, però, le condizioni climatiche favoriscono il verificarsi di incendi anche nella stagione estiva. Nel 2013, ad esempio, l'82% degli incendi in Trentino sono avvenuti tra i mesi di giugno ed agosto,

innescati sia da fattori antropici che da eventi naturali (come i fulmini).

Occorre infatti sottolineare che, seppur i fattori naturali, come la siccità, condizionino la possibilità di sviluppo di incendi, il loro innesco è spesso provocato direttamente o indirettamente dall'uomo, per lo più involontariamente, a causa di comportamenti imprudenti e superficiali o di insufficienti misure precauzionali nello

Piano per la Difesa dei Boschi dagli Incendi

Sin dal 1977 la Provincia autonoma di Trento si è dotata di un proprio piano per la Difesa dei Boschi dagli Incendi, giunto ormai al quarto aggiornamento e da ultimo prorogato fino al 31 dicembre 2030 con la Delibera della G.p. n. 1166 del 9 luglio 2021. Il piano individua le zone a diverso grado di pericolo e di rischio da incendi boschivi, le strategie per la prevenzione di questi fenomeni e le opere da realizzare a supporto dell'azione di spegnimento, quali strade e sentieri antincendio, serbatoi e condotte per l'approvvigionamento idrico, piazzole per elicotteri di appoggio allo spegnimento dall'alto.

svolgimento di operazioni agricole o altre attività. Negli anni 2001-2021 gli incendi causati dall'uomo, sia volontariamente che involontariamente, ammontano a circa il 62% dei casi in Trentino. Nello stesso periodo gli incendi causati da eventi naturali costituiscono il 18% del totale, mentre per il rimanente 20% non è possibile risalire con certezza alle cause.

Nonostante le attuali tendenze alla diminuzione, non si può escludere che l'aumento previsto in futuro per le temperature, le ondate di calore e gli episodi di siccità prolungata possa potenzialmente incrementare il rischio di incendi anche in Trentino.

La gestione del rischio e i cambiamenti climatici in EUSALP

“Migliorare la gestione del rischio e gestire meglio il cambiamento climatico, compresa la prevenzione dei principali rischi naturali” è l'obiettivo generale del Gruppo di azione 8 “Risk governance” di EUSALP.

La Provincia autonoma di Trento partecipa al Gruppo di azione tramite il Servizio Prevenzione Rischi e CUE e l'Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente.

Gli strumenti di gestione del rischio da pericoli naturali

Come evidenziato in questo capitolo, gli effetti dei cambiamenti climatici potrebbero comportare un aumento del rischio da pericoli naturali in Trentino, con danni potenzialmente significativi allo sviluppo economico e alla sicurezza della popolazione. Si rende pertanto necessario l'aggiornamento degli strumenti e dei processi di governance del rischio alla luce dei cambiamenti climatici in atto, un obiettivo che figura anche tra quelli condivisi a livello di Strategia Europea per la Macroregione Alpina (EUSALP).

La previsione di eventi meteorologici estremi più intensi e frequenti in futuro nella regione alpina rende necessario adeguare gli strumenti di previsione, prevenzione e protezione dai pericoli naturali, nonché le pratiche di gestione del rischio e di pianificazione territoriale, in un'ottica di adattamento ai cambiamenti climatici.

La gestione del rischio da pericoli naturali in Trentino

Le attività di gestione del rischio da pericoli naturali sono disciplinate in Trentino dalla L.P. n.9 del 1/7/2011 “Disciplina delle attività di protezione civile in Provincia di Trento”. Gli strumenti di gestione del rischio più importanti sono:

■ Sistema di Allertamento Provinciale (SAP)

Introdotta nel 2005, il SAP costituisce parte essenziale delle attività di protezione civile e disciplina l'insieme dei processi organizzativi, procedurali e comunicativi relativi alla gestione dei rischi di natura idrogeologica e idraulica.

■ Carta di sintesi di pericolosità

L'art. 10 della legge 9/2011 introduce le Carte della Pericolosità quale strumento di rilevazione dei pericoli localizzati sul territorio. Queste costituiscono la base di riferimento per la redazione della Carta Generale dei Rischi e per la redazione della Carta di sintesi della pericolosità prevista dall'articolo 14 della legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1 (legge urbanistica provinciale), che determina prescrizioni e vincoli relativi all'uso del territorio. La Carta di sintesi della pericolosità rappresenta lo strumento di armonizzazione della classificazione del pericolo idrogeologico, allo scopo di fornire un quadro unitario per la trasformazione urbanistica ed edilizia del territorio. La Carta (il cui primo aggiornamento è stato approvato dalla Giunta provinciale nel 2023) prende in considerazione i pericoli associati a fenomeni idrogeologici, valanghivi, alluvionali e incendi boschivi. Essa è lo strumento pianificatorio che identifica, perimetra e classifica i pericoli sul territorio, ponendo vincoli urbanistici e consentendo di eseguire interventi strutturali di prevenzione e protezione.

A photograph of a forest scene featuring a large, neat stack of cut logs in the foreground. The logs are stacked horizontally, showing their circular cross-sections. In the background, a dirt road leads into a forest of tall, thin trees under a cloudy sky. A semi-transparent teal rectangle is overlaid on the upper right portion of the image, containing white text.

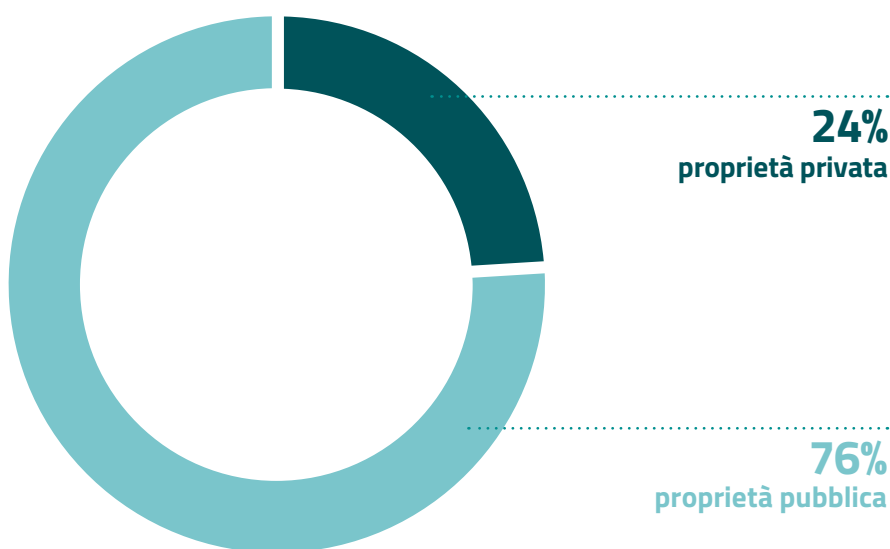
Produttività forestale e filiera

Se si escludono gli schianti diffusi causati dalla tempesta Vaia, la produttività forestale per ora non mostra variazioni significative dovute ai cambiamenti climatici. Tuttavia, in futuro la maggior diffusione di patologie e condizioni di stress causate da eventi estremi potrebbero incidere sulla filiera.

La filiera foresta-legno rappresenta una componente importante dell'economia trentina con significativi risvolti di carattere sociale e culturale e profonde radici storiche.

Rispetto al contesto nazionale il Trentino è caratterizzato da una più elevata percentuale di boschi pubblici rispetto a quelli privati sul totale; inoltre la filiera foresta-legno provinciale presenta peculiari caratteristiche: elevata percentuale di foreste gestite attivamente; prelievi complessivamente inferiori all'incremento corrente; esistenza di un vitale sistema di filiera tra domanda e offerta locale; buon numero di imprese di utilizzazione e di prima lavorazione del legno; produzione soprattutto di legname da opera, capace di generare un maggiore valore aggiunto a livello locale rispetto alla legna da ardere.

La ripartizione della proprietà forestale in Trentino (fonte: La filiera Trentina del legno, 2022).



Il Piano di Gestione Forestale Aziendale

Tutte le proprietà forestali pubbliche e le più consistenti proprietà private, nel complesso l'80% delle foreste trentine, sono gestite tramite un Piano di Gestione Forestale Aziendale che viene periodicamente revisionato. Ogni Piano, oltre ad individuare tutti gli interventi da effettuare a carico del bosco e dei pascoli nel corso del periodo di validità del piano stesso, rappresenta uno strumento fondamentale di monitoraggio delle foreste ed in generale del territorio montano trentino.



Le pratiche di gestione del bosco in Trentino si sono evolute negli anni fino ad adottare un'impostazione naturalistica ed ecologica, orientata a favorire la rinnovazione naturale, la strutturazione dei boschi e la mescolanza delle specie. In particolare, la delicata fase della riproduzione della foresta, che una volta veniva gestita con la piantagione artificiale posticipata, oggi viene assicurata dalla rigenerazione naturale attraverso la produzione naturale del seme. La selvicoltura trentina segue, quindi, un approccio alla gestione che si avvantaggia dei meccanismi naturali e si adatta, di volta in volta, alle caratteristiche del bosco. Queste ultime stanno subendo e probabilmente subiranno in futuro importanti variazioni a causa del cambiamento climatico (vedi capitolo FORESTE).

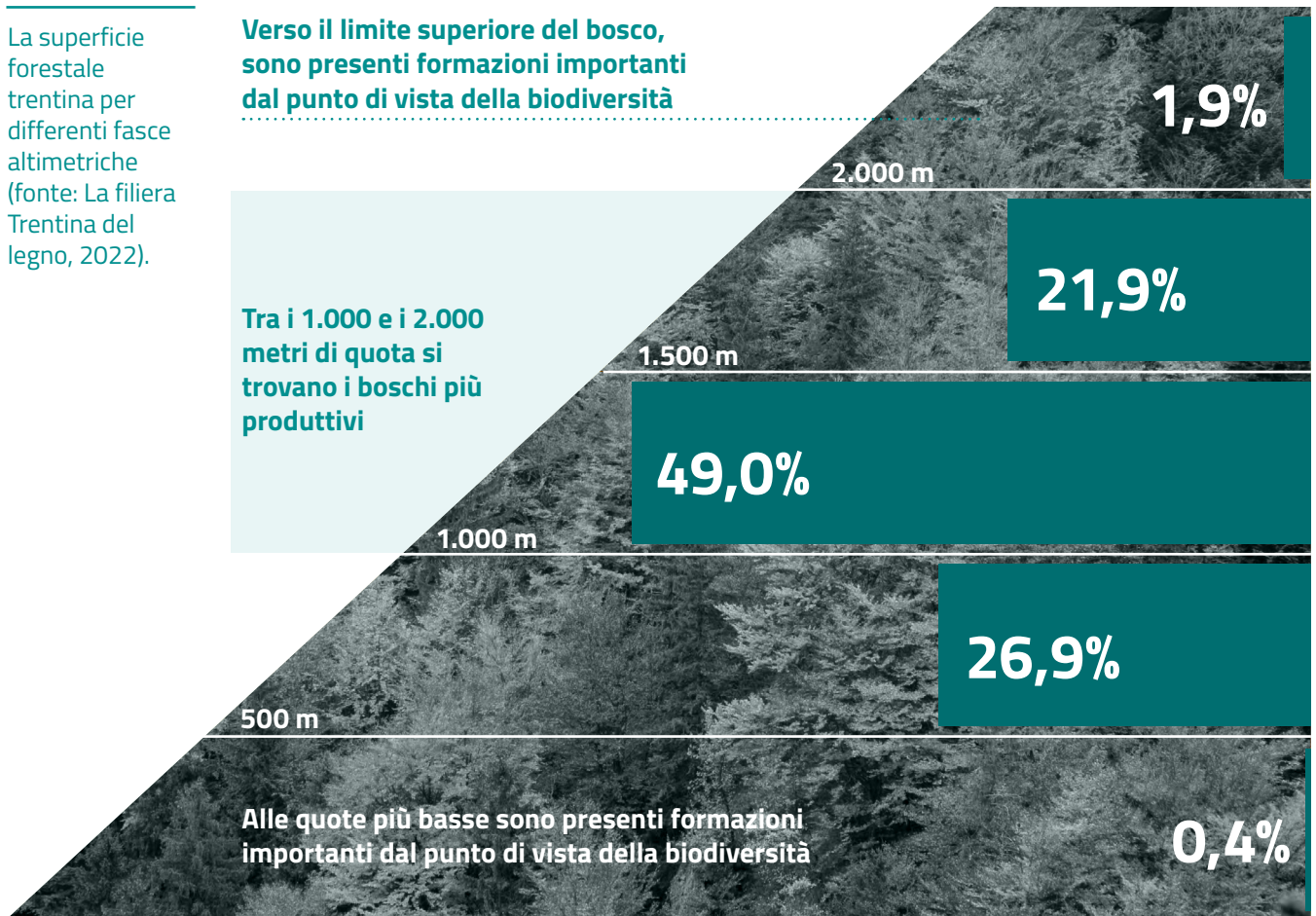
Foto: Pexels.

La superficie forestale trentina per differenti fasce altimetriche (fonte: La filiera Trentina del legno, 2022).

Verso il limite superiore del bosco, sono presenti formazioni importanti dal punto di vista della biodiversità

Tra i 1.000 e i 2.000 metri di quota si trovano i boschi più produttivi

Alle quote più basse sono presenti formazioni importanti dal punto di vista della biodiversità



L'impatto dei cambiamenti climatici sulla produttività

Se si escludono gli schianti da vento diffusi, come quelli causati dalla tempesta Vaia, la produttività forestale, per ora non sembra aver subito effetti del cambiamento climatico significativi. A causa dei forti disturbi già verificatisi, però, la variazione della disponibilità di legname si farà sentire già in questo stesso decennio, non appena cesserà la sovrautilizzazione legata alle conseguenze di Vaia e del bostrico, con una

riduzione stimata pari a circa un quarto della capacità produttiva provinciale. La causa principale risiede nella riduzione delle superfici in grado di produrre legname associata agli schianti e alla conseguente epidemia di bostrico.

Gli impatti degli incendi

Il cambiamento climatico influisce, inoltre, sugli incendi boschivi: le condizioni di caldo e di siccità più frequenti in futuro potrebbero favorire l'attecchimento e la diffusione degli incendi (vedi capitolo PERICOLI NATURALI). Se gli incendi boschivi aumenteranno in

futuro nel territorio provinciale, ciò potrebbe avere un effetto marginale sulla produttività forestale, pur incidendo anche sulle spese di gestione e controllo degli incendi boschivi.

Gli impatti sulla salute delle foreste

L'impatto dei cambiamenti climatici si riflette anche sullo stato di salute delle foreste, in quanto questi cambiamenti predispongono la vegetazione ad un'alta suscettibilità nei confronti di molti patogeni forestali, che approfittano dello stato di debolezza delle

piante per produrre gravi stati fitopatologici sia alla chioma che al fusto legnoso e all'apparato radicale, danneggiando di conseguenza la produttività futura delle foreste.

Gli impatti degli eventi estremi: il caso della tempesta Vaia

Per il Trentino, ma più in generale per l'intero nord-est italiano, la tempesta Vaia del 2018 ha rappresentato un evento senza precedenti a memoria d'uomo, e un segnale importante dei possibili danni che eventi meteorologici estremi di questo tipo possono causare al patrimonio forestale. Enorme è stata infatti la quantità di legname danneggiato, alla quale si stanno sommando gli effetti degli attacchi degli insetti che danneggiano alberi e legno, come ad esempio il bostrico (*Ips typographus*). Il materiale legnoso schiantato durante Vaia, infatti, ha costituito un'importante disponibilità di risorse per il bostrico, che si sta ripro-

ducendo molto velocemente, aumentando il proprio potenziale di attacco e di danno agli abeti rossi (vedi capitolo FORESTE).

Tra gli effetti diretti della tempesta Vaia si stimano per il Trentino circa 4.1 milioni metri cubi tariffari di schianti e 20.000 ettari di superficie danneggiata. Ad oggi i danni successivi attribuibili al bostrico ammontano, per il periodo 2019-2022, a circa 2 milioni di metri cubi di legname, pari a circa la metà del danno diretto di Vaia. In termini di superficie, sono stati interessati dall'epidemia di bostrico oltre 10.000 ettari di boschi trentini, prevalentemente nel settore orien-



EFFETTO DIRETTO DELLA TEMPESTA VAIA



DANNI DA BOSTRICO

Conseguenze della tempesta Vaia e del bostrico tipografo in Trentino (fonte: La filiera Trentina del legno, 2022).



EFFETTO DIRETTO DELLA TEMPESTA VAIA



DANNI DA BOSTRICO

tale della Provincia, dove la perdita di copertura della superficie boscata raggiunge valori significativi in alcuni bacini idrografici. Nel corso dei 5-7 anni di durata complessiva della pullulazione di bostrico che si ipotizzano, la diffusione del parassita nelle foreste di abete rosso potrebbe addirittura arrivare a eguagliare il danno diretto causato da Vaia in termini di volumi e superfici attaccate.

Gli effetti di Vaia hanno dato origine a una situazione favorevole in termini di quantità di legname disponibile per il mercato, caratterizzata però da grandi quantitativi di legname bostricato, che significa minor disponibilità di legname idoneo per le produzioni di maggior qualità e aumento degli scarti. Questo effetto a breve termine lascerà spazio nei prossimi anni ad una tendenza di riduzione delle future produzioni forestali locali; sarà quindi necessario affrontare in maniera sistematica la problematica con opportune politiche di gestione.

Il Piano per l'organizzazione degli interventi di utilizzazione per la lotta fitosanitaria e di ricostituzione dei boschi danneggiati (Piano bostrico)

In coerenza con la Legge Provinciale n.11 del 23 maggio 2007 (Legge provinciale sulle foreste e la protezione della natura), il “Piano per l'organizzazione degli interventi di utilizzazione per la lotta fitosanitaria e di ricostituzione dei boschi danneggiati” definisce le modalità per la ricostituzione dei boschi danneggiati dalla tempesta Vaia dell'ottobre 2018 e le linee tecniche per affrontare la successiva epidemia di bostrico. La prima revisione del Piano bostrico, approvata nell'agosto 2023, aggiorna i dati del monitoraggio degli impatti del bostrico all'estate 2023, nonché il grado di rischio nelle diverse aree provinciali. Un particolare approfondimento è dedicato alle ricadute sul rischio idrogeologico per i bacini idrografici principali, evidenziando la perdita di efficacia nello svolgimento del servizio ecosistemico di funzione protettiva della copertura boscata, dovuta sia a Vaia che al bostrico, rispetto alla situazione del 2018.

Agricoltura

Tra gli impatti più evidenti dei cambiamenti climatici, con conseguenze su agroecosistemi, produttività e qualità di alcune produzioni e implicazioni per i modelli organizzativi di settore figurano: l'anticipo delle fasi fenologiche, l'innalzamento degli areali di coltivazione, la più frequente carenza d'acqua per i fabbisogni irrigui, i maggiori danni da grandinate e gelate tardive, la maggior diffusione di fitopatie.

In Trentino è presente una grande diversità di agroecosistemi dovuta alle differenze climatiche fra i diversi contesti orografici e all'azione progressiva dell'uomo, che ha contribuito nei secoli alla formazione di ambienti antropizzati trasformando le variazioni altitudinali in opportunità produttive.

L'agricoltura trentina, nonostante il territorio provinciale prevalentemente montano, nel corso degli anni ha saputo raggiungere punte di eccellenza, riconosciute sia in Italia che all'estero. La coltivazione dei prati e dei pascoli ha consentito lo sviluppo di produzioni lattiero-casearie di qualità e a denominazione di origine protetta. La frutticoltura (in particolare mele e piccoli frutti) e la viticoltura sono le coltivazioni più

rappresentative in Trentino, assieme all'orticoltura e all'olivicoltura, che caratterizzano zone più circoscritte (Alto Garda per l'olivo e valle di Gresta per gli ortaggi). I cereali sono coltivati in prevalenza nelle Valli Giudicarie e in Valsugana, recuperando e valorizzando i terreni agricoli marginali di montagna, anche privi di irrigazione.

Il cambiamento climatico sta già mostrando impatti sull'agricoltura, uno dei settori socio-economici più rilevanti per il territorio, impatti che in futuro potranno avere maggiori ricadute sul reddito e sulle scelte di produzione agricola, oltre che sul capitale naturale e i servizi ecosistemici.



Le produzioni agricole in Trentino

Superfici coltivate per i principali prodotti agricoli, anno 2022 (dati stimati espressi in ettari). Fonte: ISPAT - PAT.

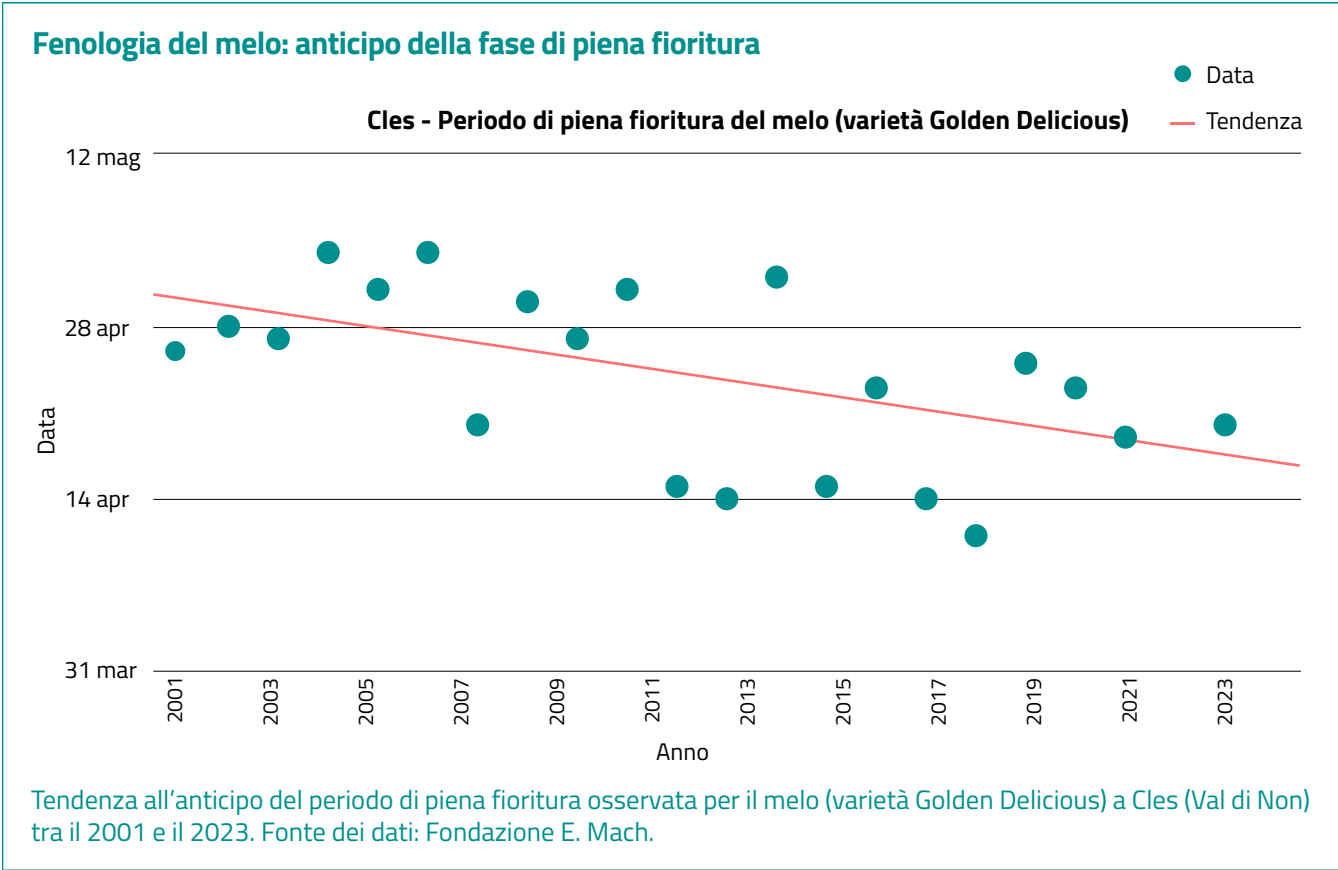
Impatti sulle fasi fenologiche delle colture

La vegetazione, sia spontanea che coltivata, si sta progressivamente adattando alle condizioni climatiche in mutamento (vedi capitolo ECOSISTEMI TERRESTRI), in primis alle temperature più elevate e in continua crescita, con impatti come l'anticipo delle fasi fenologiche, ossia la variazione dei tempi di germogliamento,

fioritura e maturazione, e l'aumento della durata della stagione vegetativa. Questi effetti, per alcune colture e produzioni, possono potenzialmente comportare significative modifiche di tipo qualitativo. L'anticipo delle fasi fenologiche comporterà un adeguamento delle tempistiche delle operazioni colturali (semina, tratta-

mento, potatura, raccolta - ad esempio l'anticipo della vendemmia) oltre che un allungamento della stagione vegetativa e un maggior impegno e attenzione da parte degli agricoltori.

L'allungamento e l'anticipo della stagione vegetativa aumentano il rischio delle gelate tardive con possibili ripercussioni negative verso talune produzioni, determinando così una diversa vocazionalità dei territori.



Allungamento della durata della stagione vegetativa

1961-1990	275.6 giorni	270.5 giorni	229.5 giorni
1971-2000	282.4 giorni	273.6 giorni	236.9 giorni
1981-2010	281.3 giorni	273.6 giorni	240.8 giorni
1991-2020	293.7 giorni	286.2 giorni	248.3 giorni
Rovereto 203 m s.l.m.	+18 giorni	Trento Laste 312 m s.l.m.	+16 giorni
		Cavalese 958 m s.l.m.	+19 giorni

Valori medi trentennali dell'indice GSL - Growing Season Length (definito come la durata in giorni del periodo compreso tra il primo intervallo, di almeno 6 giorni consecutivi, con temperatura media giornaliera superiore a 5°C dopo l'1 gennaio di ogni anno e il primo intervallo, di almeno 6 giorni consecutivi, con temperatura media giornaliera inferiore a 5 °C dopo il 1° luglio) per i trentenni di riferimento del periodo 1961-2020 per tre stazioni del territorio trentino (fonte dei dati: analisi svolte da APPA PAT su dati di Meteotrentino PAT).

Innalzamento e modifica degli areali di coltivazione

Le temperature più elevate stanno modificando la distribuzione degli areali ottimali in termini climatici per alcune delle colture chiave del territorio trentino, spostandoli a quote più elevate rispetto al passato, una tendenza che continuerà nei decenni a venire. Lo spostamento degli areali di coltivazione ottimali a quote maggiori potrà comportare in futuro la modi-

fica delle aree destinate ad alcune colture, con conseguenze quali il possibile abbandono di alcune aree limite e/o una possibile espansione delle aree coltivate verso l'alto e verso aree prima non coltivate, con conseguente fabbisogno di nuove infrastrutture di supporto, quali, ad esempio, quelle di viabilità e per l'approvvigionamento irriguo.

Modifiche della qualità delle produzioni

Vigneti

Le condizioni di stress termico e idrico, associate ai cambiamenti climatici, stanno già influenzando la composizione chimica dell'uva, con variazioni delle concentrazioni di zucchero e acidità osservate in maniera diffusa. La variazione della qualità dei mosti (sia in termini di acidità che di composti precursori degli aromi) comporterà anche negli anni a venire sia la modifica della qualità del prodotto vinicolo che, di conseguenza, la modifica delle tecniche di vinificazione. In termini quantitativi è difficile associare l'effetto dei cambiamenti climatici alle variazioni di sostanze quali i polifenoli o i composti aromatici; in generale, in base alla varietà di uve, si hanno risposte diverse, anche a seconda delle alterate condizioni climatiche previste per il periodo di maturazione dell'uva. Determinante, per la qualità del vino e lo svolgimento regolare della vendemmia, è l'assenza di precipitazioni intense persistenti nel periodo della raccolta. Un fattore positivo per la qualità della composizione degli acini sono notti fresche ed escursioni termiche giornaliere, che però sono in diminuzione (vedi capitolo TEMPERATURE E PRECIPITAZIONI). Mentre per le varietà tardive di uva rossa l'aumento di temperatura in assenza di piogge porta in generale ad una

maturazione ottimale delle uve, per le basi spumante e varietà come Müller-Thurgau vendemmiare a temperature elevate può rappresentare un problema. Alcuni studi illustrano i potenziali effetti del cambiamento climatico in Trentino sia sulla fenologia della vite che sulla vocazione dei territori alla viticoltura. Come conseguenza del riscaldamento e delle variazioni di precipitazione previsti dagli scenari climatici futuri, alcuni siti montani potrebbero rientrare in aree bio-climaticamente adatte alla viticoltura nel corso dei prossimi decenni. L'analisi della relazione tra cambiamenti climatici ed evoluzione delle fasi fenologiche per cinque varietà di vite ha evidenziato come nel periodo 2021-2050 la vendemmia potrebbe essere anticipata di circa due settimane in media rispetto al periodo storico 1961-1990, anticipo che potrebbe aumentare ulteriormente a lungo termine nel trentennio 2071-2099. Questi studi indicano che le variazioni climatiche non avverranno in maniera omogenea nel territorio provinciale: si osserverà, infatti, un accorciamento dello scarto temporale tra i tempi di raccolta nei siti di montagna e di valle, poiché l'anticipo fenologico sarà più accentuato alle quote più elevate.

Meleti

La tendenza generale all'anticipo delle date di fioritura di molte specie arboree fruttifere potrebbe comportare un aumento del rischio di danni da esposizione al gelo, dovuto a un regime termico più irregolare e a gelate tardive più frequenti. Per verificare questa

ipotesi, un modello fenologico della fioritura del melo è stato applicato a temperature storiche osservate (dalla fine degli anni '60 all'inizio degli anni 2000) e a temperature future previste per la Provincia di Trento. In passato è stata rilevata in maniera chiara una ten-

denza significativa all'anticipo della fioritura, evidente sia nelle osservazioni che nelle simulazioni modellistiche. Tuttavia, lo studio ha rilevato che le date di fioritura non possono essere collegate direttamente agli aumenti di temperatura, perché il meccanismo fisiologico dello sviluppo delle gemme fiorali non mostra una correlazione lineare con la temperatura. Inoltre,

l'acclimatazione fisiologica delle piante a un clima più caldo diminuisce leggermente gli effetti di quest'ultimo. Nei decenni più recenti in Trentino è stato rilevato un generale aumento del rischio di gelate primaverili per il melo e, in generale, si ipotizza per i decenni a venire un livello di rischio che non si discosta molto da quello attuale.

Piccoli frutti

La qualità delle produzioni di fragola, lampone e mirtillo diminuisce in concomitanza con i periodi più caldi e siccitosi che si verificano durante il ciclo produttivo, comportando di conseguenza alterazioni qualitative del prodotto, soprattutto con riferimento ad alcune varietà di vecchia introduzione.

Lo spostamento delle colture in quota, finalizzato alla ricerca di climi più freschi e adatti a queste coltivazioni, determina una maggiore pressione dei danni da *Drosophila suzukii*, poiché anche questo insetto predilige climi freschi.

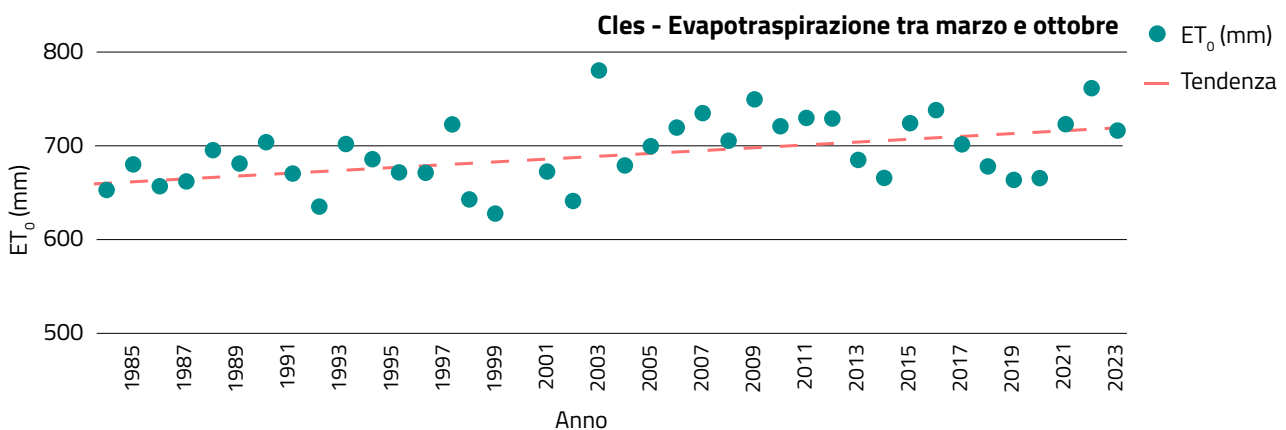
Impatti sul fabbisogno irriguo

La crescita delle temperature ha anche l'effetto di aumentare il fabbisogno irriguo, a causa della maggior evapotraspirazione da parte di piante e suoli. Inoltre, la modifica degli apporti stagionali di precipitazione può creare grave sofferenza idrica nelle colture in alcuni periodi cruciali per il loro sviluppo, in particolare nei mesi primaverili ed estivi, dalla fioritura alla fase post-raccolta quando le necessità idriche delle colture sono maggiori, e su suoli con scarsa capacità di trattenere l'umidità. La combinazione della possibile espansione verso l'alto degli areali ottimali di coltivazione e dell'aumento del fabbisogno irriguo potrà verosimilmente comportare quindi un aumento della

richiesta idrica totale per il settore agricolo, nonché la necessità di pianificare i volumi d'acqua necessari per l'irrigazione.

Queste circostanze in concomitanza con la rimodulazione stagionale dei deflussi idrici fluviali e la probabile insorgenza di condizioni di siccità più frequenti e prolungate soprattutto in estate (vedi capitoli ACQUA e GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE) concorreranno, anche in Trentino, ad accrescere il rischio di potenziali conflitti per l'acqua nella stagione calda, inasprendo, in particolare, la competizione tra uso potabile, irriguo e idroelettrico.

Aumento dell'evapotraspirazione



Tendenza all'aumento dell'evapotraspirazione di riferimento (indice ET₀ in mm d'acqua) cumulata per il periodo dal 1 marzo al 31 ottobre osservata presso Cles tra il 1984 e il 2023 (fonte dei dati: Fondazione E. Mach).

Impatti da eventi estremi

Le grandinate

L'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi, come la grandine (vedere capitolo PERICOLI NATURALI), ha comportato e comporterà potenzialmente maggiori danni alla produzione agricola e la conseguente necessità di adottare in maniera diffusa azioni di difesa attiva (come le reti anti-grandine) e passiva (come le assicurazioni).

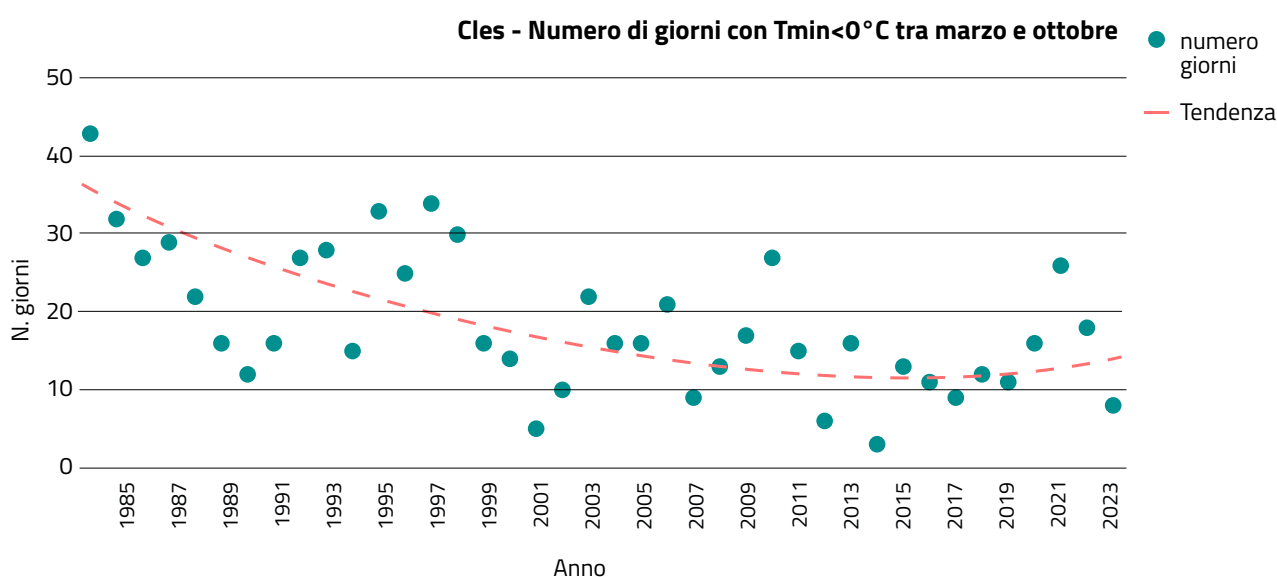
Le gelate tardive

La tendenza all'anticipo della data di fioritura aumenta il rischio di danni ai fiori e, quindi, alla produzione di frutti, a causa del possibile verificarsi di gelate notturne. Nonostante le temperature in generale aumentino conducendo nella direzione di una diminuzione del numero di giornate caratterizzate da temperature sotto la soglia di 0°C, i fenomeni di "gelata tardiva" si verificano ancora nei mesi primaverili, quando le coltivazioni sono in fase di fioritura. Di conseguenza, il rischio di gelate tardive persiste e può ancora causare perdite significative.

Il monitoraggio della grandine e dei danni in agricoltura in Trentino

Per il Trentino è disponibile uno studio che analizza osservazioni sperimentali di grandine, prendendo in considerazione i dati della rete agro-meteorologica di monitoraggio della grandine gestita dalla Fondazione Mach in funzione per 35 anni dal 1974 al 2009, composta da 271 stazioni che coprivano le principali aree agricole provinciali e un intervallo di quote comprese tra 70 e 1260 m s.l.m. I risultati mostrano che, nonostante una leggera tendenza alla diminuzione del numero di eventi e delle superfici colpite non significativa dal punto di vista statistico, la maggior parte degli indici energetici, direttamente correlati all'entità dei danni alle colture poiché indicativi della violenza degli impatti, sono aumentati nel periodo di analisi, alcuni anche in maniera considerevole. In particolare, sono gli indici relativi ai valori estremi a mostrare le tendenze di aumento più chiare.

Diminuzione del numero di giornate fredde



Variazione del numero di giornate caratterizzate da temperature minime inferiori a 0°C registrate a Cles (Val di Non), per il periodo compreso tra i mesi di marzo e ottobre tra il 1984 e il 2023 (fonte dei dati: Fondazione E. Mach).

L'aumento della temperatura e quindi la diminuzione delle "giornate fredde", per alcune specie-varietà, può tradursi in una minore differenziazione a frutto delle gemme, con conseguente variabilità e riduzione delle rese produttive.

Le gelate tardive del 2017 e 2021

Tra gli episodi recenti di gelate tardive associate a danni particolarmente significativi in Trentino si ricordano quelli del 7 e 8 aprile 2021 e del 20 e 21 aprile 2017. Danni ingenti si sono osservati in particolare per la produzione di mele. Gli eventi sono stati caratterizzati da temperature sotto 0°C che si sono mantenute a lungo (fino a 13 ore nell'episodio del 2021) e da un pronunciato anticipo fenologico, specialmente nel 2017 quando un lungo periodo di caldo anormale ha caratterizzato i mesi precedenti la gelata.

Piogge intense

L'effetto del cambiamento climatico sugli eventi di precipitazione intensa, previsti in aumento in termini di frequenza e intensità, potrà aumentare il rischio di instabilità dei pendii coltivati, nonché una maggior erosione del suolo con rischio di danni ai terrazzamenti agricoli, il cui ripristino è estremamente oneroso per le aziende agricole.

Ciò renderà necessario il monitoraggio costante delle zone coltivate caratterizzate da forte pendenza o da sistemi terrazzati e soggette a fenomeni di instabilità

di versante, anche grazie al supporto offerto in tempo reale dalle nuove tecnologie digitali.

L'aumento dei fenomeni di precipitazione intensa, alternato a periodi di siccità sempre più lunghi, determinano condizioni di criticità e stress idrico per le colture con conseguente perdita delle produzioni e nuove necessità di captazione ed accumulo d'acqua sul territorio, funzionali a garantire la disponibilità idrica a fini irrigui.

Impatti sulla diffusione di fitopatie

Il cambiamento climatico, oltre ad avere un impatto diretto sulle colture, può determinare profonde modificazioni della numerosità e della fenologia di insetti e microrganismi patogeni, alterando sia i cicli vitali dei parassiti dei vegetali (ad esempio il numero di generazioni all'anno) che la distribuzione geografica nel breve-medio termine e il tasso di sopravvivenza, con impatti significativi sulla gestione della difesa delle colture. Si prevede che i cambiamenti climatici modifichino l'epidemiologia delle fitopatie, la rapidità di sviluppo di queste malattie e la durata delle fitopatie stesse. Inoltre, potrebbero modificare la fisiologia e la resistenza dell'organismo vegetale ospite, interferendo con l'interazione ospite-patogeno.

Per quanto concerne le patologie fungine è ipotizzabile che la *peronospora* e l'*oidio della vite* rimarranno la principale minaccia fitosanitaria, dato che il loro sviluppo è in gran parte determinato dalla temperatura. Osservazioni sul campo raccolte in Trentino rilevano, ad esempio, un costante anticipo delle infezioni primarie (ossia che si manifestano per la prima volta) precoci di *peronospora* e, di conseguenza, in fase vendemmiale, maggiori danni al grappolo.

Per quanto riguarda i fito-patogeni trasmessi da insetti vettore, va tenuto in considerazione l'effetto dei cambiamenti climatici sul loro ciclo di sviluppo e la possibilità che si creino le condizioni perché nuovi organismi vettori, precedentemente sconosciuti, si insedino e contribuiscano alla diffusione di nuovi microrganismi (virus, fitoplasmi, batteri) in aree precedentemente non interessate. A questo proposito, appare necessario operare sulla base di piani mirati di prevenzione e di intervento, come già realizzato dalla Provincia autonoma di Trento attraverso i Piani per contrastare la diffusione della Flavescenza dorata, della *Drosophila suzukii*, della Cimice asiatica e degli scopazzi.

Le crescenti difficoltà nel controllare le fitopatie, che potranno aumentare a causa delle mutate condizioni climatiche future, richiedono un considerevole sforzo di ricerca e trasferimento tecnologico per mettere a punto sistemi di diagnosi rapida in grado di intercettare precocemente l'insorgenza di nuove minacce.

Flavescenza dorata



Ripiegamento dei margini fogliari causato da flavescenza dorata (foto: Ufficio stampa FEM).

La flavescenza dorata è una malattia epidemica dei vigneti, verso la quale attualmente non esiste cura se non l'estirpo, causata da microorganismi con effetti che possono essere gravi, dal calo della qualità e quantità della produzione in uva fino al deperimento della pianta. Il principale insetto vettore è una cicalina, *Scaphoideus titanus*, che può acquisire la malattia durante l'attività trofica per poi trasmetterla alle piante sane. Anche se il cambiamento climatico non è l'unica causa del ritorno di questa malattia, le variazioni di temperatura e di precipitazione influiranno sulla relazione pianta-patogeno-vettore favorendo un anticipo della schiusura delle uova della cicalina e a cascata un accorciamento del tempo di sviluppo e un anticipo della comparsa della forma adulta già nel mese di giugno anziché in luglio. Questo aumenterebbe di molto i rischi di infezione delle piante e comporterebbe la necessità di rivedere in toto la strategia difensiva nei confronti di questa fitopatologia. L'areale di diffusione della specie, attualmente concentrato soprattutto nelle zone centro meridionali della Provincia (Valle dei Laghi, Sarche, Vallagarina) potrebbe spostarsi più a nord, interessando maggiormente la Piana Rotaliana e il confinante Alto Adige, mentre le zone adiacenti al Garda potrebbero beneficiarne visto che *S. titanus* non è specie termofila.

*Un supporto decisivo per il controllo della flavescenza dorata potrebbe derivare dall'agricoltura tecnologica o 4.0. Ad esempio nell'ambito di un progetto che coinvolge Università degli Studi di Trento, Fondazione Mach e aziende private (bando MIUR PON DM 1062/2021), è stata sviluppata per la prima volta al mondo dalla Fondazione Mach, ed è in fase di sperimentazione in campo, un tecnica diretta sul vettore che consiste nella trasmissione alle piante di microvibrazioni specie-specifiche di disturbo che riducono gli accoppiamenti di *S. titanus*.*

Drosophila suzukii

Drosophila suzukii è un parassita originario del sud-est asiatico con una grande capacità di adattamento, in grado di disperdersi, sopravvivere e prosperare in un'ampia gamma di condizioni ambientali. Il fattore di maggiore influenza sullo sviluppo del parassita sembra associato in particolare agli inverni più miti che riducono la mortalità degli adulti svernanti favorendo quindi l'insediamento anche in aree a clima più

rigido finora non colonizzate. Il parassita è particolarmente dannoso poiché le femmine hanno un ovopositore seghettato che permette loro di infestare i frutti in maturazione prima della raccolta. Nel settembre 2009, in Trentino, per la prima volta in Europa, sono stati segnalati sia l'ovodeposizione su ospiti selvatici sia danni economicamente rilevanti sui frutti di bosco, sul ciliegio e sulla vite.

La Fondazione E. Mach sta approfondendo l'introduzione di insetti antagonisti, sia autoctoni che alloctoni, per contrastare l'insorgenza di questa fitopatia. In attesa delle necessarie autorizzazioni ministeriali, per l'utilizzo di insetti antagonisti alloctoni, le attività di cattura di massa e la protezione fisica delle colture mediante reti anti-insetto sembrano essere le strategie di controllo alternative a breve termine più promettenti.



Lanci di *Ganaspis brasiliensis* contro *Drosophila suzukii* (foto: S. Natali, Ufficio stampa FEM).

Cimice asiatica

La cimice asiatica, *Halyomorpha halys*, è una specie aliena invasiva originaria dell'Asia orientale che si è propagata anche per effetto dei cambiamenti climatici.

Le temperature invernali più miti riducono la mortalità degli adulti svernanti aumentando ed anticipando la pullulazione della specie già dalla primavera e favorendo un anticipo della fase attiva del ciclo e, potenzialmente, un aumento del numero di generazioni annuali.

I danni a carico delle colture in seguito alle punture di suzione di adulti, neanidi e ninfe sono riconducibili al mancato sviluppo (che causa deformazione dei tessuti) o necrosi delle cellule danneggiate dallo stiletto e raggiunte dagli enzimi salivari. Tali danni causano un deprezzamento importante della qualità dei frutti con perdite di redditività per gli agricoltori. La cimice asiatica si è introdotta in Trentino inizialmente nella Valle dell'Adige, nella zona di Trento sud, per poi diffondersi sul resto del territorio provinciale.

In Trentino-Alto Adige già da un triennio sono in corso rilasci programmati di antagonisti esotici di cimice asiatica e *Drosophila suzukii*. Variazioni di temperatura potrebbero tuttavia compromettere gli esiti di queste campagne andando a ridurre la diffusione del parassitoide (specie antagonista). Infatti, i requisiti termici di parassitoide e ospite non sono perfettamente sovrapponibili e vari studi hanno dimostrato che, in un regime di temperature più alte, tale incongruenza andrebbe a diminuire l'efficacia dell'azione dei parassitoidi.

Scopazzi del melo

Gli scopazzi del melo sono causati da un fitoplasma (*Candidatus Phytoplasma mali*) che si insedia nei vasi floematici delle piante, rallentando o bloccando la linfa, con conseguente perdita di produzione, sia in termini quantitativi che qualitativi. Il fitoplasma è un microrganismo di dimensioni simili ai virus, privo di parete cellulare, la cui sopravvivenza è possibile solo all'interno della pianta ospite o in insetti vettori.

Gli scopazzi in Trentino sono una malattia epidemica e come dimostrato nel recente passato hanno una notevole capacità di diffondersi e di provocare gravi danni. Il contenimento degli scopazzi si ottiene attraverso l'estirpo delle piante sintomatiche e il controllo degli insetti vettori (psille).

L'aumento delle temperature e l'anticipo della stagione vegetativa favoriscono la pullulazione delle specie vettore già dalla primavera, con il conseguente allungamento del ciclo vitale e l'aumento del numero delle generazioni annuali, che portano a maggiori potenzialità di inoculo e diffusione del fitoplasma.



Cimice asiatica (foto: C. Salvadori, Ufficio stampa FEM).

Altre fitopatie

L'aumento delle temperature e lo sviluppo di periodi siccitosi stanno determinando la recrudescenza e il ritorno di diversi parassiti delle piante da frutto e della vite, con conseguenti nuovi danni per perdita di quantità e qualità delle produzioni.

Tra tutti meritano attenzione la carpocapsa del melo (*Cydia pomonella*), il balanino del castagno (*Curculio elephas*), che migra nei frutteti intensivi, e la mosca mediterranea (*Ceratitis capitata*).

Impatti sui modelli organizzativi e sugli operatori di settore

I cambiamenti climatici indurranno delle modifiche ai modelli organizzativi, ad esempio per le operazioni agricole pre e post raccolta, e la necessità di un adeguamento delle strutture e delle infrastrutture di approvvigionamento e stoccaggio idrico, nonché delle tecniche di difesa delle colture.

Inoltre, il maggior rischio legato alle temperature più elevate e alle ondate di calore estive più intense e frequenti causerà maggiori rischi per la salute dei lavoratori agricoli soprattutto in estate, evidenziando la necessità di adeguare le tempistiche e le modalità di alcune operazioni e lavorazioni (vedi capitolo SALLUTE).

Particolarmente rilevante per il Trentino potrebbe essere il caso della vite: l'introduzione e la diffusione di nuove varietà viticole in grado di sopportare meglio le condizioni climatiche attese in futuro, in particolare i più frequenti episodi di siccità e le temperature estive più elevate, potrebbero richiedere la modifica dei disciplinari di produzione allo scopo di includere anche queste nuove varietà tra le uve destinate alle produzioni DOC.

Gli agricoltori e il rischio climatico

Una parte significativa degli agricoltori trentini è preoccupata per i rischi legati al cambiamento climatico, soprattutto per la possibilità di maggior probabilità di danni alle colture per il futuro. La sfida è quella di fornire adeguata assistenza al settore agricolo per individuare politiche e soluzioni di adattamento efficaci, anche dal punto di vista economico, come ad esempio strumenti assicurativi e di finanziamento, per affrontare e limitare i rischi climatici futuri.

Negli ultimi anni la gestione del rischio, anche climatico, in agricoltura è divenuta un tema molto dibattuto, sia a livello nazionale che locale. Ad esempio, il festival Agri Risk Management, arrivato nel 2023 alla quinta edizione e organizzato annualmente da Co.Di.Pr.A. (Consorzio Difesa Produttori Agricoli) Trento in collaborazione con Asnacodi (Associazione Nazionale Condifesa) Italia e Condifesa (Consorzio Difesa) Bolzano, promuove momenti di confronto riguardanti i temi della gestione del rischio, della politica agricola, dell'Intelligenza Artificiale, dell'agricoltura digitale e degli strumenti di difesa passiva e attiva.

Servizi meteo-climatici a supporto dell'agricoltura

L'Unità Agrometeorologia e Sistemi Informatici del Centro Trasferimento Tecnologico della Fondazione E. Mach collabora con Meteotrentino (PAT) per fornire alcuni servizi climatici di ambito agrometeorologico, come bollettini meteorologici dedicati per l'agricoltura, avvisi della possibilità di gelate e modelli previsionali per varie infezioni da patogeni (es. peronospora della vite, ticchiolatura del melo),

per il ciclo di sviluppo di fitofagi (es. carpocapsa del melo) e per gli indici di maturazione per le colture frutticole e viticole. Oltre alla pubblicazione dei dati meteorologici raccolti presso le stazioni agrometeorologiche, la Fondazione elabora e fornisce indicazioni tecniche relative alle principali coltivazioni agricole del Trentino e mappe di indici climatici di siccità per il territorio provinciale.

Progetti sul tema dei rischi climatici per l'agricoltura e dell'adattamento, attivi o recentemente conclusi in Trentino

Numerose sono le iniziative di ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico intraprese dagli enti scientifici provinciali e dai portatori di interesse di settore. Di seguito alcune tra le esperienze più significative e recenti.

- **MEDCLIV (MEDiterranean CLimate Vine and Wine Ecosystem):** il progetto, coordinato dalla Fondazione Edmund Mach e concluso nel 2022, ha coinvolto sei Paesi dell'Europa Mediterranea in un'analisi delle problematiche comuni legate agli effetti dei cambiamenti climatici e delle possibili soluzioni per la viticoltura.
- **PICA (Piattaforma Integrata Cartografica Agri-vitivinicola):** una piattaforma integrata e altamente innovativa sviluppata da CAVIT (CAntina VIticoltori Trentini) in collaborazione con la Fondazione Edmund Mach, la Fondazione Bruno Kessler e MPA Solutions, che mette a disposizione di tecnici e agricoltori informazioni su suolo e microclima in maniera pratica e immediata (ad esempio via email o SMS), supportando la gestione e la lavorazione dei vigneti con l'obiettivo di assicurare una migliore qualità delle produzioni viticole sul territorio provinciale.
- **HIGHLANDER (HIGH performance computing to support smart LAND sERVICES):** il progetto si è articolato tra il 2019 e il 2023, con il coordinamento del Consorzio CINECA e la partecipazione per il Trentino della Fondazione Edmund Mach. Attraverso l'utilizzo dell'High Performance Computing e l'integrazione di dati climatici, osservazioni satellitari e tecnologia dell'Internet of Things, il progetto ha sviluppato una serie di nuove applicazioni e servizi all'avanguardia per ridurre i rischi legati al cambiamento climatico, in particolare quelli che interessano salute umana, ecosistemi, agricoltura e allevamento, con l'obiettivo di una gestione più intelligente e sostenibile delle risorse naturali e del territorio.
- **C&A 4.0 Clima e Agricoltura in area montana (2018-2020):** il progetto, coordinato da Co.Di.Pr.A. in collaborazione con Fondazione E. Mach, Fondazione B. Kessler, APOT (Associazione Produttori Ortofrutticoli Trentini), CIF (Consorzio Innovazione Frutta), ComiFO (Federazione dei Consorzi Irrigui e di Miglioramento Fondiario) e l'Università di Trento, ha creato una filiera di misure e modellistica per la previsione del rischio di danno alla frutta, in particolare da eventi di gelata tardiva, per salvaguardare le coltivazioni.
- **IRRITRE - Sistema informativo territoriale per un'irrigazione di precisione in Trentino:** il progetto, in collaborazione con Fondazione B. Kessler, Fondazione E. Mach e Trentino Digitale, ha come obiettivo l'incremento del risparmio irriguo, attraverso la definizione, a supporto degli operatori agricoli, di un modello di gestione dell'irrigazione basata sull'esigenza della coltura anziché su turnazioni e apporti standard di risorsa. In particolare il progetto andrà a sviluppare un sistema informativo territoriale, che, basandosi anche sull'utilizzo di tecnologie dell'agricoltura 4.0 ed intelligenza artificiale, promuove e favorisce la gestione efficiente dell'irrigazione.

La tecnologia 4.0 in aiuto all'agricoltura

L'Agricoltura 4.0 è l'insieme di strumenti e strategie che consentono alle aziende agricole di impiegare in maniera sinergica e interconnessa, tecnologie avanzate di informazione e telecomunicazione

(ICT) nell'agricoltura, con lo scopo di rendere più efficiente e sostenibile la produzione. Ad esempio attraverso i dati satellitari, l'Internet of Things (IoT), la robotica, i droni, la biotecnologia e l'agricoltura di precisione.

Allevamento e acquacoltura

Le temperature in aumento e la minor disponibilità di risorse idriche e foraggere tenderanno ad aumentare in futuro gli impatti sul benessere e la salute animale, e di conseguenza sulla qualità e quantità dei prodotti alimentari di origine animale da allevamento e acquacoltura.

I cambiamenti climatici, in particolare più frequenti ondate di calore e episodi di siccità, possono influire direttamente sulla salute e sul benessere degli animali così come sui processi riproduttivi, causando in futuro inoltre effetti indiretti come ad esempio una riduzione della disponibilità e della qualità dei mangimi,

dei foraggi e dei pascoli, della disponibilità di acqua per abbeverare gli animali, ed un aumento del rischio di patologie e zoonosi. Tali impatti potranno avere anche nelle aree alpine delle implicazioni sulla produzione di carne, latte e derivati, e quindi sulla quantità e qualità delle produzioni casearie.

Effetti sull'allevamento

In futuro dobbiamo aspettarci che i sistemi zootecnici (basati sul pascolo, su sistemi di allevamento misti o su sistemi industrializzati) saranno sempre più influenzati dai cambiamenti climatici seppur con effetti attesi diversi in relazione ai differenti sistemi di

produzione. Il riscaldamento in atto ha effetti considerevoli sulla diversità delle specie animali allevate con una preoccupazione crescente anche nelle aree alpine per il benessere degli animali da allevamento e per le conseguenze economiche sui prodotti derivati.

Lo stress da calore

Tra gli impatti più significativi si riscontrano quelli causati dalle ondate di calore sulla salute e il benessere degli animali da allevamento con effetti diretti e indiretti. Gli effetti diretti sono dovuti principalmente all'aumento delle temperature nonché alla frequenza e all'intensità delle ondate di calore. Queste condizioni ambientali possono influire immediatamente sulla salute del bestiame causando alterazioni del metabolismo, stress ossidativo, cali di ingestione e soppressione immunitaria con conseguente maggiore esposizione alle diverse patologie. Le ripercussioni legate allo stress termico non si hanno solo nell'immediato, ma anche nel lungo termine come ad esempio il calo della fertilità e l'aumento delle patologie podali (in particolare laminiti e dermatiti). Alcuni studi evidenziano come le calde condizioni estive alterino diversi processi riproduttivi, e possano determinare un calo del tasso di concepimento nelle vacche da latte. Gli effetti indiretti sono quelli legati all'alterazione della disponibilità e della qualità dei mangimi e dell'acqua potabile, nonché alla sopravvivenza e alla ridistribuzione di agenti patogeni e/o dei loro vettori (patologie considerate esotiche ri-

sultano più probabili anche in aree alpine a causa dell'espansione areale degli insetti vettori).

Lo sviluppo e l'applicazione di nuovi metodi, strumenti e tecnologie per collegare i dati climatici con i sistemi di sorveglianza delle malattie saranno fondamentali per migliorare la prevenzione delle malattie e le risposte di adattamento degli animali allo stress da calore e da improvvisi sbalzi termici. Inoltre per gli allevamenti che hanno animali in azienda anche nel periodo estivo (aziende che non alpeggiano tutti i capi), risulterà importante avere un sistema di ventilazione e raffrescamento efficiente ed adeguato.



Vacche al pascolo (foto: Provincia autonoma di Trento).

Lo stress da calore può influenzare negativamente la produzione di latte e carne, da un punto di vista qualitativo, ma anche quantitativo.

Per quanto riguarda la produzione di latte ad esempio, lo stress da caldo ha un effetto più importante sui prodotti di alta qualità come i formaggi con conseguenti impatti economici significativi e negativi per i produttori e i consumatori. Lo stress indotto dal calore si può tradurre infatti in modifiche della qualità dei pascoli (ove presenti) o nella quantità di foraggio, persistenza di insetti vettori di malattie e ridotta alimentazione degli animali per sopperire all'aumento di calore corporeo. Ne consegue una potenziale modifica nel contenuto di grassi e proteine totali del latte, fattori principali nel processo di caseificazione per l'ottenimento dei prodotti tipici della filiera trentina.

Per quanto riguarda la carne, i bovini da carne sono solitamente considerati meno sensibili allo stress da calore rispetto ai bovini da latte grazie al loro tasso

metabolico più basso e alla minore produzione di calore corporeo. Tuttavia, anche i bovini da carne compensano l'aumento della temperatura corporea con meccanismi omeostatici e alterazioni comportamentali, effetti che sono responsabili di un tasso di crescita più basso e della riduzione della fertilità di maschi e femmine.

Per quanto riguarda i suini invece le principali perdite economiche associate allo stress da caldo sono la crescita ridotta, la riduzione dell'efficienza alimentare, la diminuzione della qualità della carcassa (aumento del deposito di lipidi e diminuzione dell'accumulo di proteine), lo scarso rendimento delle scrofe, la diminuzione della fertilità (maschi e femmine), l'aumento della mortalità (soprattutto nelle scrofe e nei maiali da mercato).



Gregge al pascolo nei prati in Val Sella. (foto: Daniele Lira , Trentino Sviluppo S.p.A.).

La produzione zootecnica in Trentino

In provincia di Trento la zootecnia ha avuto in passato un ruolo economicamente molto rilevante, tanto che l'allevamento dei bovini per la produzione di latte, e in minor misura di carne, ha rappresentato talvolta l'unico mezzo di sostentamento per le popolazioni residenti nelle zone marginali e disagiate. Oggi l'attività zootecnica ha un minor peso economico

rispetto al passato; rimane però fondamentale il suo ruolo nella manutenzione dell'ambiente naturale, soprattutto per ciò che riguarda la gestione dei prati naturali e dei pascoli. Per quanto concerne la situazione recente, dal 1995 al 2021 si è osservato un trend in aumento dei capi allevati (+45,2%) in gran parte dovuto agli ovini (+190%) e caprini (+184%) con una contrazione dei bovini (-12%).

ANNO	BOVINI	di cui da latte	OVINI	CAPRINI	EQUINI	SUINI	TOTALE
1995	49.750	26.100	16.100	5.890	2.070	6.490	80.300
2021	43.568	20.510	46.688	15.524	4.819	6.000	116.599

Tabella che riporta la consistenza del bestiame (1995-2021) (fonte: Servizio Agricoltura PAT).

Impatti sulla fienagione

L'aumento delle temperature anche in zone di montagna modifica i tempi di maturazione del foraggio e la qualità dello stesso. Gli eventi meteorologici concentrati e di alta intensità provocano problemi di allettamento (il ripiegamento fino a terra di piante erbacee, per l'azione del vento o della pioggia) più frequente nella praticoltura, rendono difficoltose le operazioni di fienagione, la conservazione della qualità delle specie vegetali da foraggio; per contro periodi siccitosi prolungati si traducono in carenza di foraggio con conseguente necessità di approvvigionamento fuori provincia.

L'aumento delle temperature nella stagione invernale sta influenzando il calendario delle operazioni colturali legate alla gestione dei prati e dei seminativi con conseguente modifica dei periodi di concimazione, preparazione dei letti di semina e lavorazione del terreno in genere. Ciò potrebbe in futuro richiedere una revisione delle regole della gestione agronomica degli effluenti zootecnici al fine di rendere compatibili tali processi con le nuove condizioni climatiche.



Il cambiamento dell'inizio e della fine del periodo vegetativo e l'aumento della frequenza delle siccità estive hanno fatto emergere la necessità di affrontare il problema di un adeguamento dei disciplinari e del carico sostenibile in tema di alpeggi.

Prati da fieno sull'Altopiano della Paganella, Dolomiti di Brenta, Andalo (foto: Marco Simonini, Trentino Sviluppo S.p.A.).

Effetti sull'apicoltura

In base ai dati dell'Associazione apicoltori del Trentino il settore è in costante crescita, anche se le produzioni di miele sono legate alle condizioni meteo sempre più instabili e ai cambiamenti climatici alternandosi annate positive e negative dal punto di vista produttivo. Ad esempio se nel 2019 e nel 2021 la produzione di miele è stata molto scarsa, nel 2022 si è osservato un surplus di prodotto.

Gli impatti dei cambiamenti climatici dipendono poi dalla tipologia di piante dalle quali le api prelevano il polline. Ad esempio l'acacia è una pianta molto sensibile: basta un inverno secco o una primavera fresca, come è accaduto ad aprile 2023, per ottenere una produzione molto ridimensionata di miele di questa specie.

Il cambiamento climatico può avere un impatto significativo sull'apicoltura influenzando sia direttamente le colonie di api che la disponibilità di risorse floreali. L'alterazione dei tempi di fioritura delle piante alpine potrebbe portare a una riduzione delle opportunità di foraggiamento e della produzione di miele se il periodo di fioritura delle principali fonti di nettare non

fosse più in linea con il picco di attività delle api. La distribuzione delle specie vegetali potrebbe spostarsi ad altitudini più elevate influenzando pertanto sulla disponibilità di fiori e piante mellifere con un impatto sulla salute e sulla produttività delle api. Temperature più elevate possono creare condizioni più favorevoli per la proliferazione di parassiti e malattie che colpiscono le colonie di api. Gli acari Varroa, in particolare, prosperano nei climi più caldi e la loro presenza può indebolire le colonie di api. Ondate di calore e eventi di siccità possono influire sul benessere delle api impedendo la regolazione della temperatura all'interno dell'alveare e contribuendo allo stress per la mancanza di acqua. Infine eventi meteorologici estremi, come tempeste, ondate di caldo e forti precipitazioni possono causare danni diretti e indiretti sulle attività dell'apicoltura.

I fattori climatici tendono poi ad esasperare delle situazioni di stress per le api legate anche ad altri fattori antropici come il cambiamento dell'habitat e l'inquinamento ambientale, in particolare collegato all'uso di antiparassitari di sintesi.



Un apicoltore effettua il controllo delle arnie (foto: Pexels).

Effetti sull'acquacoltura

La produzione ittica d'acqua dolce è caratterizzata da infrastrutture e tecnologie che permettono di migliorare la qualità dell'acqua usata per l'allevamento e di regimentare il flusso di acqua in ingresso attraverso opere idrauliche, rendendo pertanto l'acquacoltura in acqua dolce più resiliente alle variazioni indotte dai cambiamenti climatici sugli ambienti naturali.

Tuttavia, eventi quali lunghi periodi siccitosi comportano una minore quantità di acqua disponibile per l'allevamento, riducendo così la produttività degli impianti, a causa dell'innalzamento delle temperature superficiali dell'acqua e del minor tasso di ricambio in vasca, ed aumentando i costi di produzione a causa della minor efficienza zootecnica degli animali, della maggiore incidenza delle patologie e del maggior utilizzo dell'ossigenazione artificiale.

Gli animali stessi sono sensibili al cambio delle condizioni chimico-fisiche dell'ambiente acquatico, soprattutto se repentine, reagendo con alterazioni fisiologiche e stress, con ripercussioni in primis sulla crescita e sullo sviluppo, ma anche aumentando la loro suscettibilità a malattie e infezioni. Quindi l'alternanza di condizioni idro-climatiche come regimi di piena e regimi di secca, le variazioni repentine di temperatura e qualità dell'acqua e l'innalzamento delle temperature massime estive dei corsi d'acqua devono essere tenuti in considerazione come condizioni avverse per gli animali acquatici. Anche in questo caso l'impatto può variare in base alla specie o all'habitat. I pesci selvatici hanno la possibilità di migrare per trovare condizioni ambientali diverse e più favorevoli, mentre per i pesci allevati dovranno essere adottate specifiche misure di adattamento.

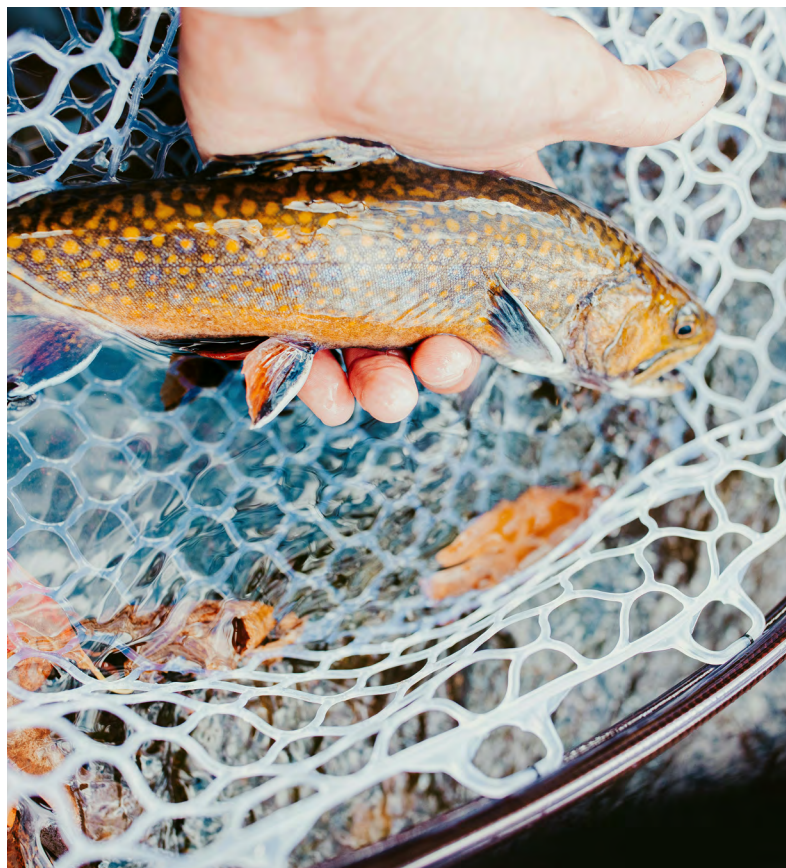


Vasche di piscicoltura (foto: Provincia autonoma di Trento).

Acquacoltura in Trentino

L'acquacoltura è un'attività radicata sul territorio provinciale da oltre un secolo, e ad oggi il settore è rappresentato da circa 70 impianti di produzione gestiti da 50 imprese prevalentemente a gestione familiare. Molti allevamenti sono concentrati nelle Valli Giudicarie e sfruttano prevalentemente le acque superficiali del bacino del Sarca e del Chiese, ma troviamo anche realtà produttive lungo le aste fluviali del Brenta, dell'Avisio e del Noce. La conformazione del territorio e la tipologia delle acque ben si adatta all'allevamento di specie d'acqua fredda, principalmente salmonidi; la principale è la trota iridea, ma si allevano anche il salmerino di fonte ed il salmerino alpino (soprattutto nelle acque più fredde), mentre la trota fario e la trota marmorata vengono soprattutto destinate a scopi alieutici (trote da semina o ripopolamento).

La maggior parte delle imprese trentine operanti nel settore ha costituito, a partire dal 1989, una cooperativa di trasformazione e commercializzazione denominata "ASTRO" (Associazione Troticoltori Trentini). Dal 2015 la trota del Trentino ha ottenuto la certificazione IGP (indicazione geografica protetta) e molti allevamenti provinciali sono certificati "Friend of the sea" per prodotti ittici sostenibili. Nel 2023 ASTRO è stata riconosciuta come Associazione di Produttori dal Ministero dell'Agricoltura Sovranità Alimentare e Foreste.



Salmerino (foto: Pexels).



Trota iridea (foto: Pixabay).

L'acquacoltura d'acqua dolce anche in Trentino è esposta agli effetti causati dall'innalzamento delle temperature dell'acqua. Entro la fine del secolo viene stimato un innalzamento medio della temperatura di circa due gradi per i corsi d'acqua situati nella zona temperata dell'Europa. Queste variazioni di temperatura, se non gravate da altri fattori, non dovrebbero mettere a rischio la produzione locale della trota iridea, che possiede un range di crescita ottimale compreso tra i 13 e 16°C. Tuttavia l'innalzamento delle temperature minime invernali o massime estive potrebbe determinare un incremento della mortalità stress-correlata in alcuni stadi del ciclo vitale degli animali. La variazione delle temperature potrebbe inoltre influenzare l'incidenza stagionale delle principali patologie correlate con la salmonicoltura (ossia l'allevamento dei salmonidi, tra i quali le trote) e portare alla manifestazione di nuovi patogeni tipici di acque più calde.

Inoltre la solubilità dell'ossigeno in acqua è inversamente proporzionale alla temperatura, quindi acque più calde sono meno ricche di ossigeno. I salmonidi soffrono particolarmente la scarsità di ossigeno rispetto ad altre specie, quindi acque meno ossigenate

costringono l'allevatore a diminuire le densità di pesci in allevamento e a razionare l'alimento, oppure a fornire ossigeno supplementare attraverso appositi impianti.

La riduzione delle portate dei corsi d'acqua, specie in estate, potrebbero condurre in futuro ad una drastica riduzione dei ricambi d'acqua negli impianti con carenze di ossigeno ed aumento dei cataboliti, con ripercussioni sulla produzione per mancato accrescimento e aumento della mortalità.

Il problema di periodi siccitosi potrebbe essere inoltre acuito dalla competizione per l'utilizzo dell'acqua (vedi capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE), nonostante, rispetto ad altri usi, l'acquacoltura rilasci la quasi totalità dell'acqua che preleva. Rispetto a tale eventualità si evidenziano alcune progettualità del settore agricolo in collaborazione con attori dell'energia per il pompaggio in quota di acqua a fini di riutilizzo plurimo e lo sviluppo di processi di allevamento ittico in ambiente confinato all'interno di laghi o bacini artificiali.

L'estate 2022 è stata un esempio di una estate particolarmente scarsa di precipitazioni, e l'acquacoltura locale ne ha risentito. L'Associazione dei Troticoltori Trentini ha quantificato l'impatto di questo evento climatico in termini di mancata produzione in circa il 10% della produzione degli anni precedenti, ossia circa 400 ton/anno di pesce. L'impatto sulla redditività è stato inoltre determinato da maggiori costi di energia (pompaggio da pozzi), ricorso all'uso di ossigeno di supplemento, ridotta resa del mangime, e quindi maggiori costi di produzione. Il quadro generale ha comportato inoltre la chiusura di alcuni allevamenti con contestuale perdita di occupazione. In totale l'estate eccezionale del 2022 ha impattato economicamente sul settore per circa 3,5/4 milioni di euro tra mancata produzione e maggiori costi.

Effetti sulla pesca in acque libere

Come già introdotto in ulteriori capitoli (vedi capitoli ACQUA e ECOSISTEMI ACQUATICI) fiumi e laghi risentono direttamente dei cambiamenti ambientali con conseguenze sulle comunità di invertebrati. A seguito di questi cambiamenti si prevede che cambi la distribuzione spaziale delle specie ittiche. La risposta più probabile è uno spostamento della distribuzione dei pesci verso altitudini o latitudini più elevate (cioè verso nord), soprattutto per le specie di acque fredde.

Al momento non abbiamo elementi che ci permettano di capire se in futuro l'innalzamento di alcuni gradi della temperatura dei corsi d'acqua e la rimodulazione stagionale delle portate possano effettivamente dare luogo a estinzione, migrazione o semplicemente contrazione delle popolazioni ittiche naturali ed in particolar modo di quelle interessate dalla pesca sportiva. Studi condotti in fiumi e laghi alpini hanno evidenziato il prevalere di una correlazione tra le variazioni



Pesca a mosca sul Torrente Avisio in Valle di Cembra (foto: Trentino Sviluppo S.p.A. Marco Simonini).

termiche riscontrate nell'habitat di salmonidi con la diminuzione della loro popolazione. Tuttavia, studi su areali ridotti o singoli bacini d'acqua hanno evidenziato un aumento degli habitat idonei per singole specie e gruppi di specie. In generale l'aumento delle popolazioni ittiche selvatiche è ascrivibile alla comparsa di nuove specie esotiche o all'espansione degli areali di specie autoctone di acque più calde.

Gli effetti sulla pesca sportiva

Sul territorio Trentino non si hanno ancora elementi oggettivi che diano informazioni su quali impatti potrebbero avere i cambiamenti climatici su questa attività. La pesca sportiva in Trentino conta circa diecimila tesserati alle 11 associazioni di pescatori sul territorio provinciale. Il valore economico dell'attività alieutica supera i 5 milioni di euro (indotto escluso) secondo la stima delle associazioni stesse (dati Federazione Pescatori Trentini e Unione Pescatori Trentini riferiti all'anno 2021). Le varie associazioni gestiscono inoltre 18 impianti ittiogenici sparsi sul territorio provinciale, con la funzione di produrre salmonidi destinati alla semina nelle acque libere a sostegno delle popolazioni naturali e dell'attività di pesca sportiva.

Gli effetti sulla pesca nel Lago di Garda

Il progetto europeo ClimeFish (2019) si è occupato di studiare gli effetti del cambiamento climatico sulla pesca e l'acquacoltura a scala europea e locale; uno dei casi studio era rappresentato dal lago di Garda. Secondo i risultati del progetto, l'aumento della temperatura nel lago di Garda, superando i livelli ottimali per diverse specie selvatiche, potrebbe condurre ad una diminuzione del tasso di crescita degli animali e ad una contestuale riduzione della biomassa complessiva. Si prevede che l'aumento della temperatura dell'aria provocherà un ulteriore aumento della temperatura dell'acqua del lago, influenzando così la sopravvivenza degli stadi

larvali di alcune specie. I principali rischi identificati nel progetto ClimeFish sono legati allo stato degli stock selvatici, rischi che includono la diminuzione del reclutamento naturale per il coregone (lavarello), la diminuzione della biomassa per le diverse specie, la diminuzione della produttività in diverse aree del lago e la comparsa di specie invasive più adatte al mutato ambiente. I rischi direttamente legati all'attività di pesca includono la possibile estensione del fermo invernale, la riduzione del numero di licenze rilasciate e la diminuzione dell'efficienza delle catture, in quanto anche la gestione può influenzare gli effetti dei cambiamenti indotti dal clima, attenuandoli o esacerbando.



Sul territorio Trentino la Fondazione Edmund Mach gestisce un centro ittico sperimentale con più di 60 vasche disponibili per prove sperimentali su pesci d'acqua dolce (principalmente salmonidi) nel quale è possibile realizzare studi indirizzati a valutare performance zootecniche, benessere animale e qualità del prodotto. Inoltre vanta un network di portatori di interesse che comprendono numerosi produttori locali, associazioni di categoria locali e nazionali e l'industria della filiera nazionale (mangimifici, produttori ingredienti, trasformatori ecc.), che potrebbero rappresentare un ottimo contesto per possibili studi di valutazione climatica.

Centro ittico sperimentale della Fondazione E. Mach (foto: FEM).

Effetti sulla sicurezza alimentare

I cambiamenti climatici possono avere degli effetti in varie fasi della catena di approvvigionamento alimentare, dalla produzione primaria al consumo da parte degli utenti, contribuendo ad incrementare il rischio per la sicurezza alimentare anche nelle regioni alpine. L'aumento delle temperature e della frequenza e dell'intensità di eventi meteorologici estremi possono infatti influire sulla produzione alimentare, come in agricoltura e zootecnia, ma anche sulla sicurezza degli alimenti per i consumatori. Per quanto non siano disponibili dati specifici per il Trentino, alcuni studi mostrano come anche nelle regioni alpine il cambiamento del clima potrebbe indurre maggiori problemi, tra i quali: micotossine che si formano sui prodotti vegetali in campo o durante lo stoccaggio; eventuale presenza di residui di fitofarmaci nei prodotti vegetali influenzati da cambiamenti nella pressione dei parassiti; presenza di batteri patogeni negli alimenti a seguito di condizioni meteorologiche estreme più frequenti, come inondazioni e ondate di calore.

Sicurezza alimentare: cos'è?

Secondo la Food and Agriculture Organization (FAO), sicurezza alimentare o “food security” vuol dire *“assicurare a tutte le persone e in ogni momento una quantità di cibo sufficiente, sicuro e nutriente per soddisfare le loro esigenze dietetiche e le preferenze alimentari per una vita attiva e sana”*.



Mercato contadino (foto: Pexels).



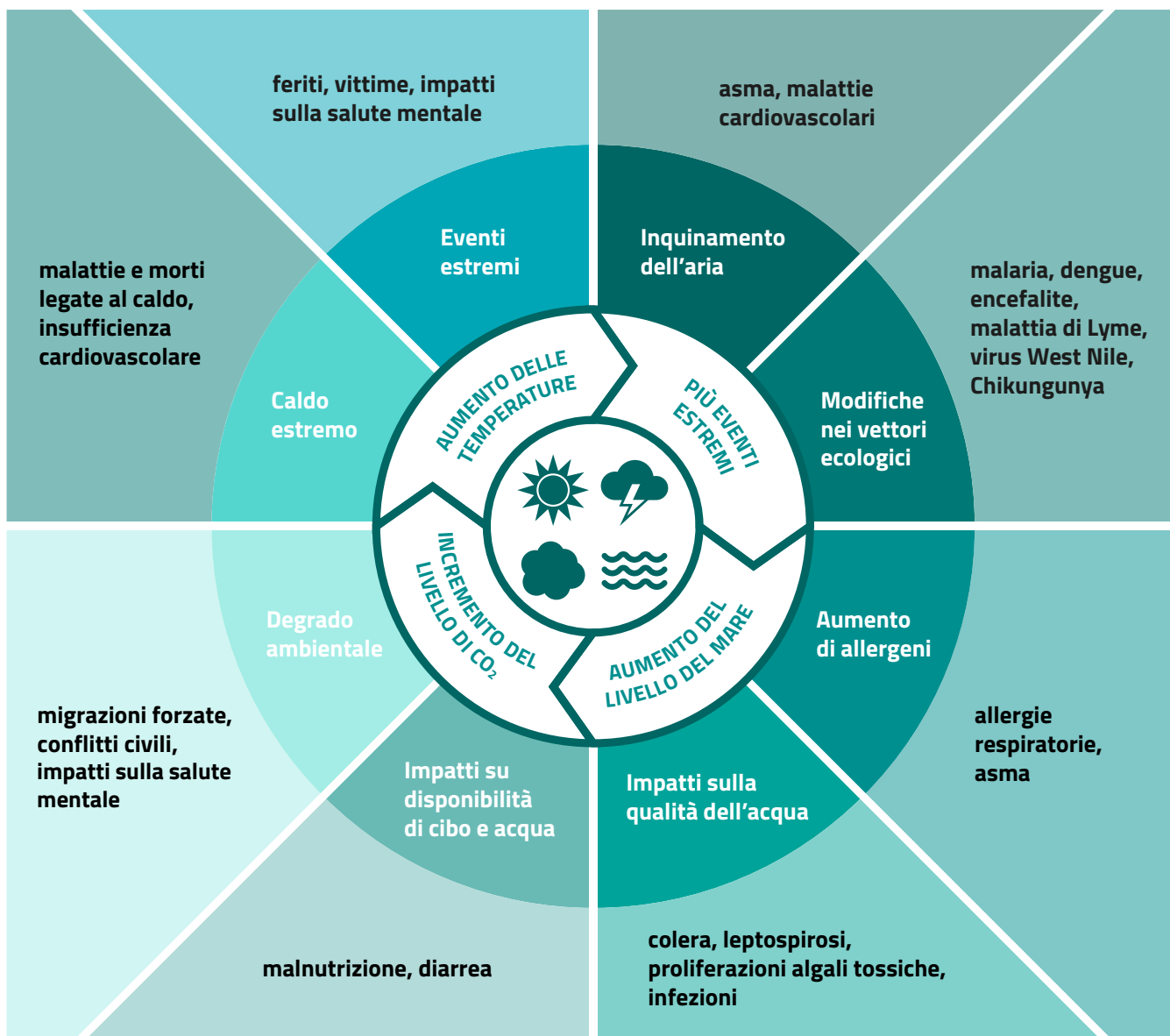
Salute

Gli effetti dei cambiamenti climatici dovuti ad impatti diretti, come ondate di calore e alluvioni, e indiretti, come la maggior diffusione di malattie allergiche e patologie infettive trasmesse da vettori, hanno conseguenze negative sulla salute umana e incidono sulla capacità di risposta e gestione del sistema sanitario, socio-sanitario e sociale.

Il riscaldamento in atto, la maggior frequenza e intensità degli eventi meteorologici estremi e le conseguenze sui sistemi naturali e umani rappresentano una minaccia crescente per la salute umana.

I principali effetti dei cambiamenti climatici sulla salute si possono classificare in:

- **effetti diretti:** impatti perlopiù dovuti ad eventi estremi, come ondate di calore e di gelo, alluvioni, siccità e incendi, che possono provocare lesioni, malattie e decessi;
- **effetti indiretti:** impatti mediati dai sistemi naturali, come malattie portate da vettori (ad esempio artropodi), zoonosi a trasmissione diretta, allergie da pollini, malattie trasmesse attraverso acqua, aria e cibo;
- **effetti sui sistemi umani,** con ulteriori ripercussioni sullo stato di salute fisica e mentale: ad esempio aumento dei fattori di stress mentale e del numero di richiedenti protezione internazionale per l'aggiunta e l'aggravamento di un ulteriore fattore che favorisce l'emigrazione dai paesi del Sud globale.



Le tipologie di impatti principali osservati a causa del cambiamento climatico a livello globale (fonte: Center for Disease Control and Prevention).

La Carta internazionale di Roma sulla Salute e i Cambiamenti Climatici

Gli effetti dei cambiamenti climatici sono tra i problemi di salute pubblica più urgenti da affrontare, anche a livello italiano. Per promuovere un approccio inter-settoriale e multidisciplinare nella stima e nella prevenzione degli effetti sulla salute, l'Istituto Superiore di Sanità nel 2018 ha pubblicato la "Carta internazionale di Roma sulla Salute e i Cambiamenti Climatici", un documento di raccomandazioni politiche. La Carta ha il fine di informare i decisori politici e tutte le parti interessate sulle azioni chiave da perseguire per tutelare la salute umana dagli impatti negativi dei cambiamenti climatici.

L'Osservatorio europeo sul clima e la salute

L'Osservatorio europeo sul clima e la salute è un'iniziativa congiunta della Commissione europea, dell'Agenzia europea dell'ambiente e altre organizzazioni. L'Osservatorio sostiene l'Europa nella preparazione e nell'adattamento agli impatti dei cambiamenti climatici sulla salute umana fornendo l'accesso a informazioni e strumenti utili, nonché promuovendo lo scambio di informazioni e la cooperazione internazionale tra gli attori coinvolti, anche a livello sub-nazionale.

Gli impatti diretti

Tra gli effetti diretti sulla salute derivanti dai cambiamenti climatici deve essere considerato in primis l'aumento di mortalità da ondate di calore e temperature elevate, che in Italia rappresentano un elemento di particolare criticità a causa dell'elevata percentuale di popolazione con età superiore ai 65 anni (23,8% in Italia e 22,9% in Trentino - dati 2021

ISPAT). Si aggiungono gli impatti derivanti da altre tipologie di eventi estremi e pericoli naturali associati, come alluvioni e frane (vedi capitolo PERICOLI NATURALI), ai quali contesti ambientali diversi (ad esempio aree caratterizzate da elevato rischio idrogeologico) o categorie fragili di popolazione possono essere esposti in maniera diversa.

Ondate di calore

Le ondate di calore e di freddo possono avere un impatto considerevole sulle persone anche in Trentino. Uno studio ha recentemente quantificato i rischi per la popolazione della regione Trentino-Alto Adige nel periodo 1980-2018, ricostruendo mappe ad alta risoluzione di pericolosità, definita tramite indici giornalieri di intensità delle ondate di calore e di freddo, e combinandole con mappe della densità di popolazione esposta e di vulnerabilità, quantificata a livello di comunità e città utilizzando una serie di indicatori socioeconomici. La ricerca ha riscontrato per le ondate di calore un aumento statisticamente significativo della pericolosità e dell'esposizione, con un numero di persone esposte al caldo estremo sei volte superiore dopo l'anno 2000 rispetto ai due decenni precedenti. Nelle città più grandi della regione, anche la vulnerabilità aumenta a causa dell'invecchiamento della popolazione e della crescita del numero di persone che vivono da sole.

I livelli di rischio delle ondate di freddo, invece, sono in diminuzione nelle comunità più piccole grazie alla diminuzione della vulnerabilità, mentre nelle città essi sono cresciuti del 20% nel periodo di studio (per l'aumento della vulnerabilità).



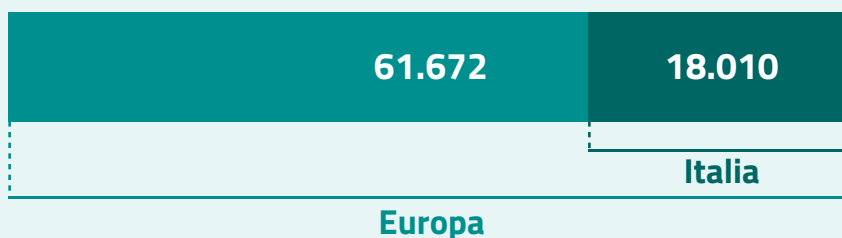
Aumento dei livelli di rischio di ondate di calore nei maggiori centri urbani del Trentino negli anni 2010-2018 rispetto al decennio 1980-1990 (fonte dei dati: Morlot et al. 2023).

Ondate di calore e mortalità in Europa

In Europa ogni anno i record di temperatura registrati nei mesi estivi sono aggiornati al rialzo. Nell'estate del 2022 gran parte del continente è stato colpito da ondate di caldo eccezionali, con anomalie positive di circa 10°C per le temperature massime nelle regioni occidentali. Nel mese di luglio, nel Regno Unito le temperature hanno toccato i 40°C per la prima volta in assoluto.

Le proiezioni climatiche indicano che, in uno scenario caratterizzato da un aumento medio globale di temperatura di 3°C rispetto al periodo pre-industriale entro il 2100, il numero di cittadini dell'UE e del Regno Unito esposti alle ondate di calore potrebbe aumentare da 10 milioni all'anno (media stimata per il periodo 1981-2010) a quasi 300 milioni all'anno (oltre metà della popolazione) in futuro.

Stima delle morti in Europa causate dalle temperature estreme dell'estate 2022, con l'Italia al primo posto per numero di decessi (fonte dei dati Ballester et al. 2023).



Caldo estremo e infortuni sul lavoro

Le professioni che implicano lo svolgimento di mansioni fisicamente impegnative all'aperto, in particolare durante la stagione estiva e le ore più calde della giornata, ad esempio nel settore agricolo o dell'edilizia, appaiono particolarmente esposte al rischio di un aumento futuro del numero di infortuni sul lavoro collegati alle alte temperature, con potenziali conseguenze anche sulla produttività aziendale complessiva.

Uno studio relativo alla Provincia autonoma di Trento ha indagato la relazione tra le alte temperature dell'aria e il numero di infortuni sul lavoro verificatisi tra i lavoratori agricoli durante le stagioni estive degli anni 2000-2013. L'incidenza media di infortuni stimata nell'intero periodo di studio è di 3,4±2,3 eventi/giorno, con picchi identificati in maniera inequivocabile nei giorni caratterizzati da condizioni termiche maggiormente severe.

Siccità e disponibilità di acqua

Per quanto in Trentino gli eventi siccitosi non generino ancora seri problemi per la popolazione provinciale ma solo situazioni critiche temporanee e localizzate, l'aumento della loro probabilità in futuro tenderà ad esacerbare e rendere più frequenti alcune condizioni di scarsità idrica, che potranno incidere negati-

vamente sulla disponibilità e sulla qualità dell'acqua per uso potabile. Questo rappresenta un potenziale rischio per la popolazione più esposta, specialmente nella stagione estiva in concomitanza con il contestuale aumento del fabbisogno e della domanda d'acqua per i diversi usi.

Altri eventi estremi e pericoli naturali associati

Pericoli generati da forti precipitazioni, come alluvioni, colate detritiche e frane, o da tempeste di vento, grandine o valanghe possono provocare lesioni e, occasionalmente, decessi. Particolarmente degno di nota è il fatto che eventi di grande scala caratterizzati da effetti

a catena sulle infrastrutture, i mezzi di comunicazione e i trasporti, come nel caso di grandi eventi alluvionali, possono condurre a conseguenze negative sulla capacità di rapido soccorso e sulla possibilità di accesso a strutture ospedaliere e servizi socio sanitari.

La capacità di prevenzione e gestione di tali eventi ha limitato finora le conseguenze dirette ai danni della popolazione provinciale, tuttavia, in previsione di eventi potenzialmente più frequenti e intensi, si pone la que-

stione della preparazione e dell'adeguamento della gestione del rischio in vista della nuova situazione climatica.

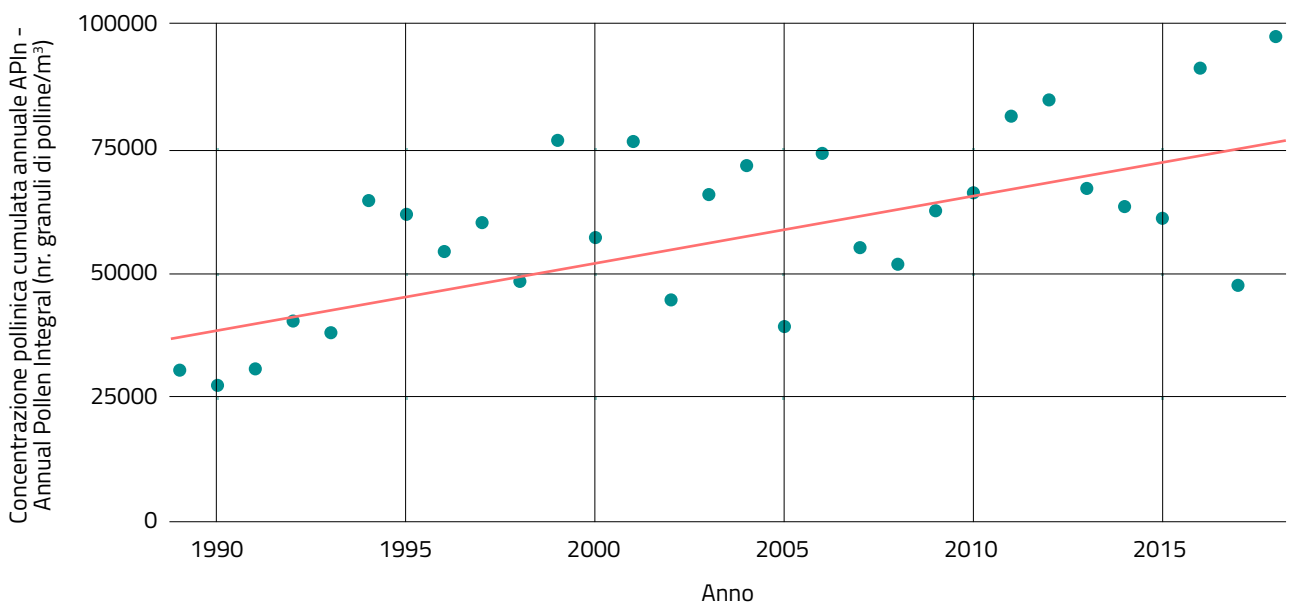
Gli impatti indiretti

Pollini e allergie

I cambiamenti climatici alterano la fenologia delle piante, la fase della fioritura e la dispersione dei pollini. Modifiche nella stagionalità, che consistono nell'anticipo della data di inizio e/o nel posticipo della data di fine fioritura, e aumento dei quantitativi di pollini aerodispersi possono determinare un peggioramento significativo delle patologie allergiche, causato dalla maggiore concentrazione e presenza prolungata di pollini e allergeni. In Trentino sono stati studiati la concentrazione e la composizione dello spettro pollinico aerodisperso e i suoi parametri stagionali, per identificare eventuali tendenze temporali in un arco di tempo di vent'anni (1989-2008). I campionamenti pollinici effettuati presso San Michele all'Adige hanno mostrato la presenza di 63 taxa pollinici, dei quali 40 sono appartenenti a specie arboree/arbustive e 23 a specie erbacee. Lo spettro

pollinico locale appare caratterizzato dalla presenza di taxa altamente allergenici, appartenenti alle famiglie delle *Urticaceae*, *Poaceae*, *Betulaceae* e *Cupressaceae*, che risultano prevalenti sia in termini percentuali, che di valori giornalieri medi e di picco negli anni analizzati. Un ulteriore studio, più recente, conferma come l'aumento nel tempo della concentrazione di pollini sia il cambiamento più significativo emerso dal monitoraggio aerobiologico condotto in Trentino negli ultimi tre decenni (1989-2018). Tale aumento (dell'ordine del +58%), imputabile principalmente ai pollini da specie legnose, appare solo marginalmente attribuibile ai cambiamenti di uso del suolo e, al contrario, molto influenzato dalle temperature minime e medie in aumento, le quali mostrano una chiara tendenza di riscaldamento nel periodo.

Concentrazioni polliniche osservate



La significativa tendenza di aumento (determinata tramite analisi non parametrica di tipo Mann-Kendall) dei quantitativi pollinici cumulati registrati durante l'anno (Annual Pollen Integral - APIn) rilevati a San Michele all'Adige (1989- 2018) (fonte: Fondazione E.Mach).



Il cambiamento climatico può inoltre determinare modificazioni dell'ecosistema e della distribuzione spaziale delle specie botaniche che producono pollini allergenici, con ulteriori possibili impatti sulla salute umana e la possibile insorgenza di nuove sensibilizzazioni. Ad esempio, è già stato riscontrato che la diffusione di alcune specie invasive come l'*Ambrosia* e l'*Artemisia* influisce sulla salute umana aumentando il rischio potenziale di esposizione a pollini allergenici.

Artemisia verlotiorum (Lamotte) (foto: Archivio MUSE).

Il monitoraggio dei pollini negli ecosistemi di montagna

Nel territorio trentino sono attualmente in corso due progetti dedicati al monitoraggio del particolato aerodisperso.

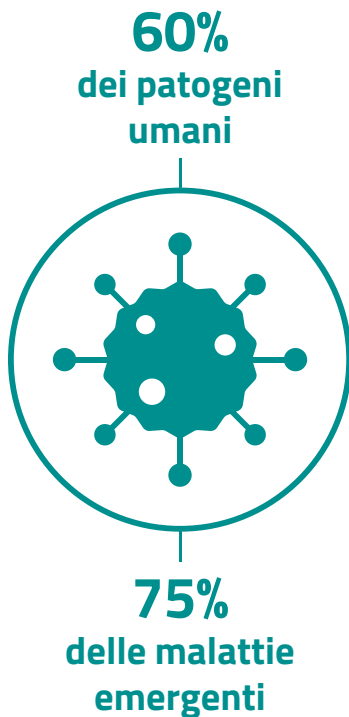
- **AiRabbi:** grazie ad una collaborazione tra Parco Nazionale dello Stelvio (settore trentino), Fondazione Edmund Mach e Agenzia Provinciale per la Protezione dell'Ambiente di Trento, nel 2020 è stato avviato il progetto AiRabbi per il monitoraggio della qualità dell'aria in Val di Rabbi, che prevede l'analisi di inquinanti atmosferici e pollini aerodispersi che possono fornire informazioni sulla biodiversità vegetale.
- **ALPoll:** condotto dalla Fondazione Mach in collaborazione con la Società Alpinistica Tridentina, sezione di Trento, lo studio si prefigge di approfondire le conoscenze sul particolato biologico aerodisperso in alta quota e sulle possibili ripercussioni sulla salute di chi frequenta tali ambienti, solitamente poco o per nulla indagati, attraverso il monitoraggio dei pollini presso alcuni rifugi alpini.

Malattie infettive

Le zoonosi consistono nella trasmissione diretta o indiretta di malattie o infezioni dalle specie animali all'uomo. In particolare le malattie trasmesse da vettori, come zecche e le zanzare, sono quelle che hanno visto il maggior incremento negli ultimi anni. I fattori climatici possono favorire la diffusione dei vettori, e quindi delle malattie associate, modificando le condi-

zioni che ne regolano sopravvivenza e sviluppo o, indirettamente, alterando le interazioni tra condizioni ambientali, animali e uomo. In questo senso le alterazioni della funzionalità degli ecosistemi, della numerosità e della distribuzione delle popolazioni animali e la perdita di biodiversità possono comportare conseguenze rilevanti per la salute umana.

Percentuale dei patogeni umani e delle malattie emergenti nell'uomo di origine animale



Sistemi di monitoraggio delle malattie da vettori

Per monitorare la situazione sono stati attivati differenti sistemi di sorveglianza attiva e passiva e di ricerca scientifica, sia a livello locale che internazionale.

La Fondazione Mach partecipa ad alcuni progetti a livello europeo e internazionale, tra i quali:

- **EYWA** ("Early Warning System of Mosquito Diseases"): un sistema indirizzato alla necessità di prevenire, monitorare e proteggere la salute pubblica contro le malattie trasmesse dalle zanzare, combinando parametri ambientali, climatici e meteorologici con parametri socio economici, di popolazione ed ecosistemici, nonché dati epidemiologici ed entomologici
- **MOOD** ("MONitoring Outbreaks for Disease surveillance in a data science context"): una piattaforma sviluppata nell'ambito di un progetto europeo con lo scopo di monitorare e individuare tempestivamente nuove emergenze sanitarie in Europa, all'interno del contesto attuale caratterizzato da cambiamenti ambientali, climatici e sociali a livello globale.

A livello nazionale è in vigore un sistema di sorveglianza delle arbovirus (le zoonosi causate da virus trasmessi da vettori artropodi, incluse zecche e zanzare) declinato dal Piano Nazionale di prevenzione, sorveglianza e risposta alle arbovirus 2020-2025, che comprende i virus: West Nile, Usutu, Chikungunya, Dengue, Zika (inclusa la sindrome congenita), dell'encefalite virale da zecche (TBE) e virus Toscana. Il Piano individua attività che devono essere attuate immediatamente ed attività da implementare più gradualmente, oltre ad alcuni indicatori da utilizzarsi per la valutazione dell'applicazione del Piano stesso. Inoltre esso estende la sorveglianza a livello nazionale alle specie di zanzare invasive e al monitoraggio delle resistenze agli insetticidi.

A livello provinciale è stato attivato un tavolo di coordinamento provinciale per il monitoraggio delle malattie trasmesse da vettori coordinato dalla Fondazione Edmund Mach, che ha visto la partecipazione di diversi Enti del territorio deputati alla ricerca, al monitoraggio e al controllo (MUSE, Fondazione Museo Civico Rovereto, Azienda Provinciale per i Servizi Sanitari, Consiglio delle Autonomie Locali, Fondazione Bruno Kessler, Istituto Zooprofilattico delle Venezie). Il sito web Vettori Trentino (<https://vettoritrentino.it/>) raccoglie i dati relativi alle attività di monitoraggio di zanzare e altri vettori sul territorio come strumento di attuazione del Piano di monitoraggio della Provincia autonoma di Trento delle zanzare e di altri vettori.

Le zecche

Per la Provincia autonoma di Trento si segnala l'aumento di casi di malattie zoonotiche, in particolare di quelle trasmesse da vettori, come la borreliosi di Lyme e l'encefalite da zecche (TBE). Tra il 2012 e il 2019 è stato infatti registrato un aumento del tasso di incidenza medio della TBE di quasi 4 volte rispetto a quello del decennio precedente (2000-2011). Ciò può essere in parte dovuto ad un miglioramento delle capacità diagnostiche e ad una maggiore attenzione sul fronte sanitario, ma anche alle variazioni climatiche che hanno favorito l'espansione dell'areale di distribuzione della zecca, il prolungamento della sua attività di ricerca dell'ospite, la maggior frequentazione degli ambienti naturali da parte dell'uomo e l'introduzione di nuovi ceppi del virus (un arbovirus appartenente al genere *Flavivirus*) attraverso i movimenti di ospiti, come ad esempio gli uccelli migratori.



Esemplare di zecca (foto: Marco Parisi, Provincia autonoma di Trento)

Studi condotti sia a livello europeo che trentino hanno inoltre mostrato come l'infestazione da zecche su animali ospiti (roditori selvatici e caprioli), assieme a variabili climatiche e ambientali quali il tasso di raffreddamento autunnale, la variazione diurna di temperatura, la temperatura media invernale, la precipitazione cumulata dei mesi più aridi e la copertura forestale, siano utilizzabili quali indicatori nella valutazione delle aree a più alto rischio di circolazione virale della TBE. Il capriolo risulta avere un ruolo importante nella crescita della popolazione di zecche nell'ambiente, mentre sono le fluttuazioni della densità di popolazione dei roditori ad influenzare maggiormente la circolazione e la persistenza del virus della TBE.

A tal riguardo, è stata riscontrata una correlazione tra l'aumento del rischio di contrarre patologie tra-

smesse dalle zecche e la quantità di polline prodotto dalle piante: quest'ultimo, infatti, per alcune specie vegetali forestali indica l'abbondanza della produzione di semi, che, se elevata, favorisce la crescita delle popolazioni di alcuni animali selvatici, in particolare dei roditori, e, di conseguenza, l'aumento del numero di zecche infette. L'aumento della quantità di pollini riscontrato negli ultimi anni sul territorio provinciale può quindi essere considerato un indice di maggior rischio di contrarre la TBE.

Le zanzare

Anche le zanzare sono importanti vettori di malattie, in particolare la zanzara comune *Culex pipiens*, vettrice del Virus del Nilo occidentale e del virus USUTU e le zanzare aliene del genere *Aedes* (la zanzara tigre, coreana e giapponese) che sono vettori di malattie esotiche emergenti anche nelle aree temperate. In Trentino sono state determinate le condizioni di soglia per la sopravvivenza e lo svernamento delle uova e degli adulti di zanzare tigre, sulla base sia delle temperature medie di gennaio che delle temperature medie annuali, dimostrando che la soglia di 0°C per la temperatura superficiale media del suolo per il mese di gennaio e la soglia di 11°C per le temperature medie annuali sono i migliori predittori per identificare le aree che potrebbero potenzialmente ospitare popolazioni di questa zanzara. Gli scenari climatici futuri suggeriscono che la zanzara tigre si stia diffondendo verso nord nel territorio provinciale, una tendenza che potrebbe facilitare ulteriormente l'infestazione da parte della zanzara tigre e la diffusione delle malattie da essa trasmesse in nuove aree del Trentino.



Zanzara tigre (*Aedes albopictus*) (foto: Fabio Pupin, Archivio MUSE).

Specie aliene: la zanzara coreana e la zanzara tigre

Da ormai un decennio è presente sul territorio trentino una nuova specie aliena invasiva, *Aedes koreicus* (conosciuta come “zanzara coreana”). La Fondazione Mach ha contribuito a monitorare la sua diffusione per quanto riguarda il territorio provinciale e valutare la sua potenziale distribuzione nel nord-est italiano. Ricerche scientifiche sono state svolte sia in campo che in laboratorio per chiarire aspetti poco noti della loro biologia della zanzara coreana e di un'altra specie invasiva, la zanzara tigre (*Aedes albopictus*), come la competizione intraspecifica con la zanzara comune (*Culex pipiens*). L'influenza della temperatura sul tempo di sviluppo larvale, la longevità, la fecondità e la diapausa (una fase di arresto spontaneo dello sviluppo di alcuni animali, nella quale l'organismo è inattivo e l'attività metabolica si riduce) è stata studiata in laboratorio sia per la zanzara coreana sia per la zanzara tigre. Gli esperimenti hanno confermato la maggior capacità della zanzara coreana di resistere alle basse temperature, e quindi di colonizzare



aree al di sopra dei 600 m s.l.m., una quota che è considerata il limite altitudinale di espansione della zanzara tigre. Di contro gli esperimenti indicano come quest'ultima sia però meglio adattata al clima estivo nelle aree di fondovalle della Provincia.

Zanzara coreana (*Aedes koreicus*) (foto: Alf Maule, Archivio MUSE).

Il controllo biologico delle zanzare

Negli ultimi due decenni l'approccio cosiddetto di “Integrated Vector Management” (IVM) ha gradualmente sostituito la pratica di strategie individuali per il controllo dei singoli vettori, promuovendo invece strategie basate sul controllo biologico e sulla collaborazione sinergica tra enti pubblici e privati cittadini.

Un esperimento svolto in collaborazione con il comune di San Michele all'Adige ha dimostrato come, in questo campo, il coinvolgimento dei cittadini nella corretta gestione delle proprietà private sia statisticamente più efficace del solo intervento pubblico. Nell'ambito della lotta biologica, la Fondazione Mach ha valutato l'uso di copepodi (crostacei molto piccoli, raramente più lunghi di 1-2 mm, presenti in quasi tutti gli habitat acquatici) autoctoni per il contrasto alle larve di zanzara, ottenendo buoni risultati soprattutto sul primo stadio di sviluppo larvale.

I cianobatteri

L'aumento delle temperature sembra essere in relazione anche con l'aumento della presenza nelle acque del territorio di cianoficee, dette anche cianobatteri o alghe azzurre. In particolare, il riscaldamento del clima agisce come catalizzatore delle fioriture dei cianobatteri, che producono come metaboliti secondari una grande varietà di cianotossine (in particolare neurotossine ed epatotossine). Il fenomeno rappresenta una possibile minaccia per la salute umana in relazione al consumo idropotabile e alla balneazione nei laghi, in particolare se le temperature più elevate in futuro favoriranno la proliferazione dei cianobatteri e la presenza di concentrazioni elevate di cianotossine, in particolare nella fase finale delle fasi di fioritura algale (vedi capitolo ACQUA).

Filiera del cibo e sicurezza alimentare

Un potenziale impatto futuro potrebbe essere l'aumento di malattie infettive diffuse attraverso la filiera alimentare, in particolare per la maggiore diffusione di micotossine e batteri legati al cibo (ad esempio salmonella e listeria) nonché per la più rapida alterazione della qualità nutrizionale degli alimenti. Le temperature in aumento potranno favorire tali fenomeni e quindi l'insorgere di questo “nuovo” rischio.

Il progetto BIOALPEC

In Provincia è attivo un progetto di ambito nazionale finanziato su fondi PNRR che vede il coinvolgimento del National Biodiversity Future Center (NBFC) e della Fondazione Mach. Il progetto BIOALPEC (“Biodiversity of Alpine ecosystems in a changing world”) si concentra sulla comprensione dell’evoluzione, della distribuzione e della funzione

ecologica della biodiversità alpina in termini di flora, fauna e microorganismi, sia terrestri che acquatici, passando dal livello genetico a quello ecosistemico. Studi sul campo e modelli spaziali saranno utilizzati per prevedere possibili cambiamenti futuri con lo scopo di identificare le specie, le comunità e le popolazioni a rischio e stimare l’impatto sull’emergere di malattie zoonotiche nel territorio.

Gli effetti sui sistemi umani

Salute mentale e eco-ansia

Un collegamento meno ovvio, nonostante ci sia sostanziale evidenza della sua esistenza, è quello tra il cambiamento climatico e la salute mentale, che a livello globale è stato osservato nel corso degli anni in termini di aumento dei livelli di ansia, delle forme di depressione, dell’abuso di sostanze e delle sindromi legate a eventi traumatici.

A livello territoriale studi quantitativi relativi agli impatti sulla salute mentale non sono ad oggi presenti, tuttavia si evidenzia un fenomeno in crescita segnalato da psicologi e insegnanti, la cosiddetta “eco-ansia”. Sarà pertanto necessario prendere in considerazione i possibili effetti su tutte le fasce di età, specialmente per quanto riguarda i più giovani, che subiscono il peso della drammatica prospettiva di un’esistenza sempre più influenzata dagli impatti negativi dei cambiamenti climatici e della frustrazione legata al fatto che un’azione incisiva di contrasto non dipende da loro stessi, ma dalle azioni ad oggi ancora insufficienti di attori quali i governi e le istituzioni.

Il progetto Circolo Climatico

Il progetto Circolo Climatico è stato promosso nel 2022 dall’Associazione Viração&Jangada in partenariato con l’Agenzia Provinciale per la Protezione dell’Ambiente (APPA) e il Museo delle Scienze di Trento (MUSE), con il cofinanziamento del Piano Giovani di Zona Trento e Arcimaga. Circolo Climatico prevede un percorso di consapevolezza, confronto e condivisione tra giovani, accompagnati da una psicologa e da formatori esperti, al fine di imparare alcune “tecniche” attive per contrastare la cosiddetta “eco-ansia” o “ansia climatica” e poi individuare azioni concrete e comportamenti individuali e collettivi quotidiani di sostenibilità ambientale e sociale, come forme di risposta proattiva.



Un incontro dei giovani partecipanti al Circolo Climatico con i formatori e la psicologa che hanno seguito il progetto (foto: Associazione Viração&Jangada).

Sovraccarico dei sistemi sanitari

Durante le ondate di calore sussiste il rischio di un sovraccarico dei sistemi sanitari dovuti agli effetti diretti del caldo (colpo di calore, disidratazione, crampi di caldo) oppure ad aggravamento ed acutizzazione di malattie croniche pre-esistenti molto comuni nella popolazione (soprattutto malattie cardiovascolari, respiratorie, renali, mentali e diabete), con conseguenze sulla tenuta del sistema di pronto intervento (per l'aumento di chiamate al 118 e quindi possibile aumento dei tempi di risposta) e sulla capacità ospedaliera di garantire i ricoveri in reparti ordinari e di rianimazione.



Ospedale Santa Chiara, Trento (foto: Wikimedia Commons).

A large dam is visible in the middle ground, surrounded by steep, rocky mountains. The sky is overcast and grey. A teal-colored rectangular area is overlaid on the upper part of the image, containing the title and a paragraph of text. The foreground shows a rocky slope with some sparse vegetation and a small wooden walkway leading down towards the water.

Energia

Il cambiamento climatico influenza considerevolmente il sistema energetico, con effetti sia sui fabbisogni energetici che sulla produzione e il trasporto di energia.

Gli effetti attesi dei cambiamenti climatici modificheranno sia la domanda che la produzione di energia, anche in Trentino. La necessità di implementare le politiche di mitigazione sposterà sempre più il sistema energetico verso le fonti rinnovabili, quali idroelettrico e solare. In futuro sarà quindi indispensabile gestire attentamente il mix di fonti di produzione energetica, anche alla luce dei potenziali impatti dei cambiamenti climatici stessi su tali fonti, nonché sviluppare adeguati sistemi di accumulo energetico.

La produzione di energia rinnovabile potrebbe infatti subire modificazioni in futuro.

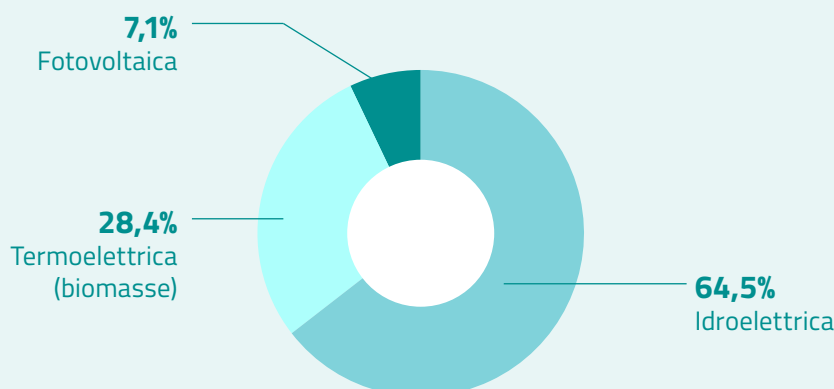
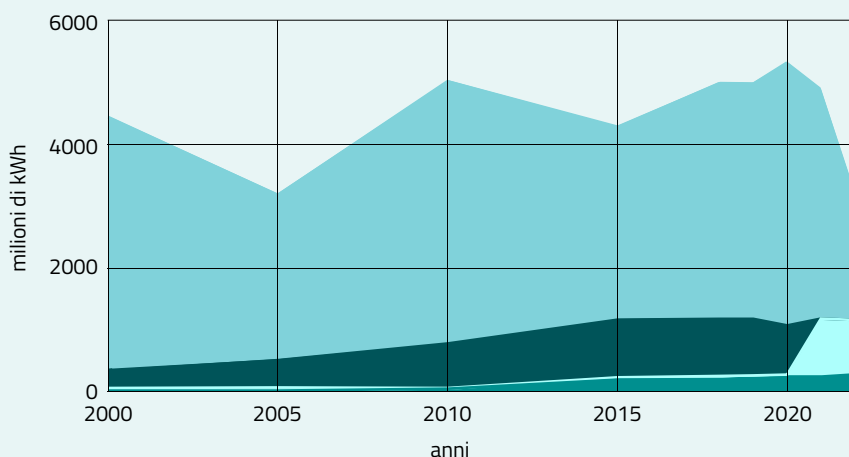
In particolare, la produzione idroelettrica potrebbe essere caratterizzata da minor continuità e affidabilità a causa delle più frequenti situazioni di siccità e dei conflitti conseguenti per l'uso dell'acqua, in particolare in estate per le necessità del settore agricolo. La disponibilità d'acqua per produzione idroelettrica potrebbe invece aumentare in autunno e inverno. In generale, mentre per i bacini più piccoli situati alle quote maggiori sono previsti deflussi potenzialmente

anche in aumento a seconda dello scenario climatico futuro almeno sul medio periodo, grazie al contributo di fusione dei ghiacciai, per i bacini più ampi alle quote minori sono previste minori portate naturali e, quindi, un calo della produzione.

I fabbisogni energetici per il condizionamento invernale degli edifici continueranno a diminuire a causa delle temperature in crescita, mentre il consumo di energia elettrica per il raffrescamento estivo (oggi ancora molto ridotto in Trentino) potrebbe crescere, rimodulando in maniera significativa il profilo stagionale e annuale dei carichi energetici legati al condizionamento degli edifici.

Eventi estremi (ondate di calore, precipitazioni intense e tempeste di vento) più frequenti e intensi e i pericoli naturali associati potrebbero incidere sull'efficienza degli impianti di produzione, sulla sicurezza e la continuità della fornitura di energia elettrica, rendendo più difficile e costosa la gestione operativa e la manutenzione delle infrastrutture di produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia stesse.

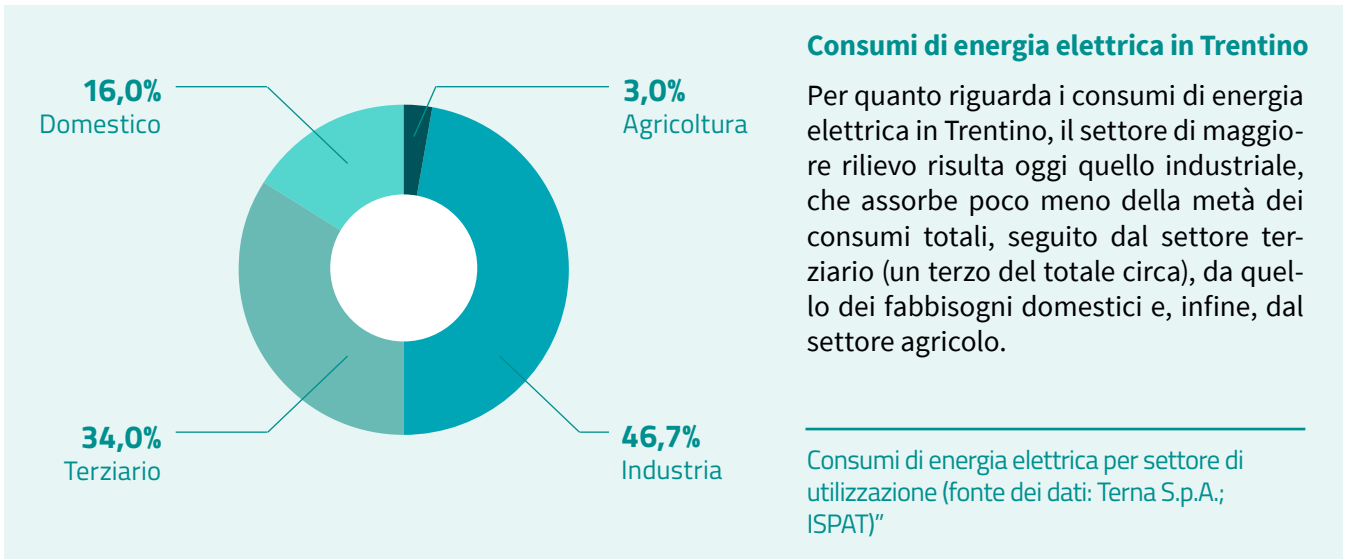
Idroelettrica ■ Termoelettrica (altro)
Termoelettrica (biomasse) ■ Fotovoltaica



Produzione di energia elettrica in Trentino

La fonte principale di produzione di energia elettrica in Trentino è rappresentata dall'idroelettrico, che nel 2022 ha coperto circa il 65% della produzione netta totale. La produzione idroelettrica può variare anche considerevolmente di anno in anno in funzione delle condizioni meteo-idrologiche. Nel 2022 è infatti stata relativamente bassa, principalmente a causa della siccità che ha caratterizzato la stagione estiva e della competizione per la risorsa idrica tra i diversi usi. La seconda fonte di energia elettrica è rappresentata dalla biomassa (28% nel 2022), cresciuta molto velocemente negli anni più recenti, seguita dal fotovoltaico (7% nel 2022).

Produzione netta di energia elettrica per fonte energetica utilizzata in Trentino (fonte dei dati: Terna S.p.A.; ISPAT).



Impatti sulla produzione di energia

Energia idroelettrica

Le variazioni della disponibilità idrica connessa ai fenomeni di deglaciazione e all'alterazione dei regimi delle precipitazioni e dei deflussi (vedi capitolo ACQUA) potrebbe avere importanti conseguenze

sul sistema di produzione di energia idroelettrica (vedi capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE). Gli impatti attesi potrebbero essere più significativi per gli impianti con derivazione ad acqua fluente,



Diga e invaso di Malga Bissina (foto: archivio APRIE).

che sono più strettamente condizionati dalla disponibilità di risorsa idrica naturale in alveo rispetto agli impianti idroelettrici con bacino di accumulo. Gli impianti collegati a grandi serbatoi di accumulo hanno infatti la possibilità di gestire e compensare i volumi in ingresso e in uscita anche su scala annuale, risultando quindi meno soggetti alla variabilità stagionale della disponibilità di risorsa idrica.

Il Piano Energetico Ambientale Provinciale (PEAP) 2021-2030 indica che i cambiamenti climatici lasceranno sostanzialmente inalterata la quantità totale di domanda idrica a scopo idroelettrico nei prossimi dieci anni, mentre sul lungo periodo sono possibili modifiche più significative. Le valutazioni del Piano si basano sui risultati del progetto OrientGate (vedi capitolo ACQUA), che ha indagato come il cambiamento climatico potrà influenzare le derivazioni idroelettriche esaminando due bacini campione, quello del fiume Noce e quello del fiume Brenta, per due differenti scenari climatici (RCP4.5 e RCP8.5; vedi capitolo EMISSIONI CLIMALTERANTI) e due differenti periodi temporali (2021-2050 e 2041-2070).

Per quanto riguarda i piccoli impianti idroelettrici si prevede una diminuzione di produzione più accentuata per il bacino del Brenta e per la Val di Non. Sul lungo periodo (2041-2070) per il bacino del Brenta si attende un calo della potenza teorica totale annua di circa il 20%, rispetto al periodo 1981-2010, mentre per il bacino del Noce si attende un calo più contenuto, di circa il 10%. A livello stagionale si attende un aumento della produzione in inverno e un calo in tutte le altre stagioni, più marcato in estate che per il bacino del Brenta è dell'ordine del 50%.

Uno studio effettuato per la centrale idroelettrica di Taio, in Val di Non, che sfrutta il Lago di Santa Giustina (il principale invaso idroelettrico del Trentino) per produrre circa 282 GWh all'anno, prevede che, a fronte di scenari futuri di produzione di energia con un più alto rapporto di produzione di energia solare ed eolica a scala nazionale, S. Giustina e altri bacini alpini saranno sfruttati principalmente durante le ore notturne di produzione minima delle altre due fonti, con fluttuazioni di produzione più elevate rispetto ad oggi. Per bilanciare l'intermittenza della produzione di energia legata al maggiore sfruttamento delle fonti rinnovabili, risulterà necessario valutare l'installazione di adeguati sistemi di accumulo dell'energia.

Gli effetti della siccità del 2022 sulla produzione idroelettrica in Trentino

La probabilità che eventi di siccità e scarsità idrica si manifestino con maggior frequenza e intensità e in maniera più prolungata, in particolare nella stagione estiva, indurrà potenzialmente più situazioni di conflitto tra gli usi concorrenti della risorsa idrica quali irrigazione agricola e usi civili e potabili, determinando periodi di minor produzione idroelettrica a causa dei minori accumuli d'acqua negli invasi, nonché della maggior priorità normalmente assegnata agli altri usi e, quindi, dei maggiori rilasci imposti. Queste circostanze si sono esplicitate in maniera chiara nel corso dell'anno 2022, caratterizzato da una imponente siccità in tutto il Nord Italia.

3,9 miliardi di kWh



-1,6 miliardi

2,3 miliardi di kWh



Riduzione della produzione idroelettrica in Trentino per effetto della siccità del 2022 (fonte dei dati: Gruppo Dolomiti Energia).

Anche per quanto riguarda le grandi derivazioni idroelettriche si prevede una diminuzione di produzione che risulta più accentuata per il bacino del Brenta rispetto a quello del Noce. Sul lungo periodo è atteso un calo tra il 20% e il 25% della potenza annuale teoricamente producibile nel bacino del Noce e di circa il 15% nel bacino del Brenta. Grazie alla presenza di grandi dighe di accumulo stagionale, i grandi sistemi idroelettrici del bacino del Noce mostrano una maggiore resilienza alle variazioni stagionali indotte dai cambiamenti climatici, riu-

scendo in parte a compensarle. I maggiori afflussi invernali, tuttavia, riescono solo in parte a controbilanciare il calo estivo, che causa una contrazione significativa della produzione idroelettrica tra giugno e settembre. Gli impianti situati nella zona del bacino del Brenta, non disponendo di una capacità di regolazione stagionale, vedono invece un incremento di produzione invernale mentre nel periodo estivo si attende un significativo calo, anche superiore al 50% rispetto alla media del trentennio 1981-2010.

Energia fotovoltaica

Le alterazioni della copertura nuvolosa, ma anche delle condizioni di trasparenza atmosferica e di qualità dell'aria, per effetto dei cambiamenti climatici potranno influenzare i livelli di radiazione solare in futuro anche sulle Alpi e in Trentino. Per il momento la letteratura scientifica non dispone di studi specifici in merito per il territorio provinciale.

Sono però ipotizzabili altre conseguenze dei cambiamenti climatici sulla produzione fotovoltaica. L'aumento generalizzato delle temperature, ad esempio, potrebbe influire sull'efficienza dei pannelli fotovoltaici,

riducendo la produzione in estate. La riduzione della nevosità potrebbe invece portare ad una maggiore produzione di energia nei mesi invernali rispetto al passato, quando la neve copriva i tetti per un periodo di tempo più lungo anche a quote non elevate. Eventi meteorologici estremi più frequenti e intensi, come tempeste, grandinate, forti precipitazioni e forti venti, potranno causare in futuro maggiori danni ai moduli e alle infrastrutture degli impianti fotovoltaici, con maggiori interruzioni della produzione e maggiori costi di manutenzione o ripristino.

Energia da biomassa legnosa

Per quanto non siano disponibili studi specifici per il Trentino, una serie di fattori quali i cambiamenti della composizione delle foreste, dello stato di salute e della produttività delle stesse (vedi capitolo PRODUTTIVITÀ FORESTALE E FILIERA) potrebbero in futuro

influenzare la quantità e la qualità della biomassa legnosa disponibile per l'utilizzo energetico, sia per gli impianti domestici per il riscaldamento delle abitazioni che per gli impianti di taglia maggiore che producono energia termica o termoelettrica.

Impatti sul consumo di energia

Fabbisogno energetico degli edifici

L'aumento delle temperature, atteso in tutte le stagioni e in modo più marcato in estate, provocherà una rimodulazione della domanda di energia nel settore civile, dato che il fabbisogno per il riscaldamento invernale delle abitazioni private e degli spazi commerciali e pubblici tenderà a diminuire, mentre quello per il raffrescamento estivo tenderà a crescere. Le valutazioni a supporto del PEAP 2021-2030 indicano attualmente per il Trentino una riduzione media dei cosiddetti “gradi giorno di riscaldamento” (abbreviati

in HDD; un indicatore che quantifica di quanti gradi e quanto a lungo la temperatura ambiente esterna rimane al di sotto della temperatura di riferimento rappresentativa dell'interno degli edifici riscaldati) pari a circa 10 HDD in meno all'anno e un aumento dei cosiddetti “gradi giorno di raffrescamento” (CDD; indicano di quanti gradi e quanto a lungo la temperatura ambiente esterna rimane più elevata della temperatura interna degli edifici raffrescati) stimabile in massimo 5 CDD in più all'anno.

	2016	2030	2016	2050
HDD  ↓	tra -4% e -11%		tra -10% e -21%	
CDD  ↑	tra +12% e +36%		tra +36% e +87%	

* Gradi Giorno di Riscaldamento - Heating Degree Day (HDD) e Gradi Giorno di Raffrescamento - Cooling Degree Day CDD. Proiezioni future di parametri termometrici legati ai fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici in Trentino (fonte dei dati: PEAP 2021-2030).



Panorama di Trento (foto: Wikimedia Commons).

Impatti sulle infrastrutture energetiche

L'aumento della frequenza e dell'intensità di eventi meteorologici estremi possono favorire in futuro impatti maggiori sulle infrastrutture energetiche, sia di produzione che di trasporto e distribuzione, come la rete elettrica e la rete del gas, generando maggiori difficoltà nella gestione operativa. Tra i potenziali impatti previsti quelli che potrebbero assumere un ruolo significativo anche per il Trentino sono elencati di seguito.

- L'aumento delle temperature può provocare impatti negativi sul funzionamento degli impianti a causa di acqua e/o aria non sufficientemente fresche per l'adeguato raffreddamento dei sistemi. Le temperature estreme particolarmente elevate possono inoltre ridurre l'efficienza delle infrastrutture di generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, come conseguenza di un raffreddamento meno efficace e di una maggior resistenza dei cavi della rete.
- Le ondate di freddo, che possono causare la formazione di ghiaccio sulle linee aeree e il loro cedimento strutturale, saranno meno frequenti e intense in futuro. Potrebbe invece verificarsi un aumento della proporzione di eventi nevosi con neve pesante e bagnata, che risultano particolarmente pericolosi per le linee di trasmissione e distribuzione.
- Prolungati periodi di siccità possono ridurre la disponibilità d'acqua per i sistemi di raffreddamento, nonché alterare le proprietà strutturali del suolo, con possibili fenomeni di subsidenza delle condotte per il trasporto di gas.
- Condizioni ambientali più calde e più secche possono favorire incendi più frequenti, con maggiori danni alle infrastrutture energetiche.
- Raffiche di vento particolarmente intense possono causare con più frequenza danni strutturali, ad esempio inducendo oscillazioni dei cavi aerei o cadute più frequenti di rami e alberi sulle linee di trasmissione.
- Esondazioni fluviali più frequenti e significative possono condurre a maggiori danni a impianti di produzione energetica, così come a aeree di stoccaggio e trasporto dei combustibili.

La tempesta Vaia e i danni alle linee elettriche

Durante l'evento della tempesta Vaia nell'ottobre 2018 le intense raffiche di vento hanno provocato ingenti danni alle reti elettriche, con gravi ripercussioni sulla popolazione. A causa della caduta di numerosi alberi sulle linee elettriche, oltre alla caduta di molti piloni, sono stati registrati gravissimi e prolungati disagi alla distribuzione dell'energia elettrica nelle aree colpite in Trentino, con decine di migliaia di utenze rimaste senza elettricità per diversi giorni a seguire dopo la tempesta.

A wide-angle photograph of a snowy mountain slope. In the foreground and middle ground, several skiers are visible, leaving tracks in the snow. A prominent yellow marker is on the slope. The background features rugged, snow-covered mountain peaks under a clear blue sky. A large teal rectangular overlay covers the upper right portion of the image, containing the title and a paragraph of text.

Turismo

In Trentino il turismo è, forse più strettamente che altrove, legato all'ambiente naturale. Di conseguenza, le variazioni climatiche e gli impatti ad esse collegate avranno, soprattutto in futuro, impatti profondi sul settore, in particolare per il turismo invernale.

Il turismo rappresenta uno tra i settori economici che producono le maggiori ricadute economiche per la Provincia di Trento. Il settore turistico trentino, inoltre, dipende in maniera significativa dalle risorse e dalle attrazioni naturali e ambientali del territorio, ed è quindi particolarmente interessato dall'influen-

za dei cambiamenti climatici su ambiente e natura. Inoltre, l'andamento climatico determina in maniera significativa lunghezza e redditività delle diverse stagioni turistiche, oltre a svolgere un ruolo fondamentale nella scelta della destinazione da parte dei turisti.

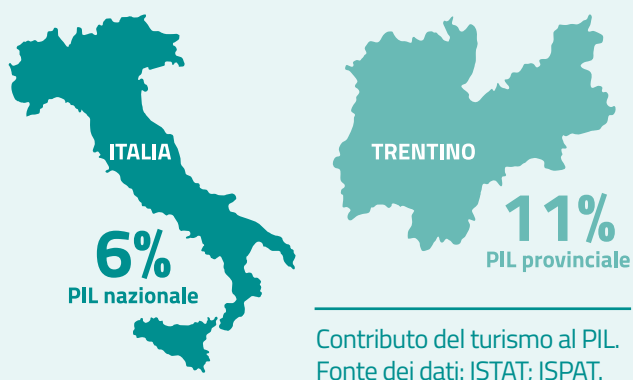


Escursionisti in Val Rendena (foto: Pio Geminani, Trentino Sviluppo S.p.A.).

Il valore economico del settore turistico

In generale, stimare il contributo del turismo al PIL (Prodotto Interno Lordo) di un territorio, valutando adeguatamente la ricchezza direttamente generata che comprende anche l'indotto, è particolarmente complesso ed è possibile solo in termini di ordine di grandezza. Per l'Italia il Conto Satellite del Turismo (CST), lo strumento internazionalmente raccomandato per valutare correttamente la dimensione economica dell'industria turistica altrimenti difficilmente misurabile attraverso statistiche di tipo settoriale, stima che il valore aggiunto turistico (ossia la ricchezza interna direttamente originata dai consumi turistici, cioè dalla domanda di beni e servizi da parte dei visitatori), prodotto sia dalle industrie turistiche che dalle altre industrie connesse (l'indotto), sia pari mediamente a poco meno di 100 miliardi di euro all'anno (dati aggiornati al 2019). In altri termini, la domanda di servizi turistici nel nostro Paese produce un valore aggiunto pari a circa il 6% del PIL nazionale (stima aggiornata al 2019). In Trentino il valore aggiunto prodot-

to dalla sola domanda turistica rappresentata dai visitatori pernottanti (escludendo quindi i turisti che non pernottano nel territorio provinciale) ammonta a circa il 10% del valore aggiunto complessivo generato, quota alla quale si deve aggiungere la ricchezza generata dal turismo di passaggio. A tale stima si deve aggiungere il valore dell'indotto, ossia il valore prodotto dalle industrie non turistiche ma legato ai consumi dei visitatori, per poter ottenere un dato confrontabile con quello fornito dal CST a livello nazionale.



Gli impatti sul turismo invernale



Sciatori in Val di Fassa, Col Rodella, Passo Sella (foto: Federico Modica, Trentino Sviluppo S.p.A.).

Le proiezioni climatiche future prevedono per il Trentino un'ulteriore riduzione del manto nevoso naturale, soprattutto alle quote inferiori, a causa dell'aumento delle temperature (vedi capitolo NEVE, GHIACCIAI E PERMAFROST). Il comparto dell'industria sciistica potrebbe quindi risentire della carenza di un'adeguata copertura nevosa, sia in termini di superficie innevata che di spessore del manto nevoso, e di una durata più breve della stessa al suolo (quindi, potenzialmente, di una stagione sciistica più breve) che avranno ricadute negative sull'intera filiera economica legata allo sci: dagli impianti di risalita ai noleggi e scuole sci, dalle strutture ricettive alla ristorazione, fino agli esercizi commerciali locali.

La scarsità o la mancanza di neve naturale, particolarmente pronunciata nelle aree che si trovano alle quote minori e caratterizzate da un'esposizione o

condizioni microclimatiche sfavorevoli, potrebbe condurre in futuro a maggiori richieste di acqua per l'innevamento artificiale da parte dei comprensori sciistici, allo scopo di assicurare la sciabilità delle piste. Questo potrebbe esporre i territori al rischio di future situazioni di conflitto per l'uso della risorsa in periodi caratterizzati da magra o siccità invernale oppure richiedere la disponibilità di più bacini idrici dedicati ad immagazzinare acqua per l'innevamento.

Appare pertanto evidente la necessità, per i prossimi anni, di sviluppare strategie di diversificazione dell'offerta turistica per la stagione invernale. Ciò sia in termini di ampliamento dell'offerta di prodotti turistici che di investimenti che possano migliorare la gestione delle risorse ad uso concorrente, come l'acqua e l'energia, in maniera ottimale ed efficiente.

Recentemente la Banca d'Italia ha analizzato le relazioni tra le condizioni meteo-climatologiche osservate e i flussi turistici registrati per il periodo 2001-2019 presso località turistiche campione situate in Valle d'Aosta e in Trentino Alto Adige, allo scopo di quantificare il rischio di perdite dovute al cambiamento climatico nel settore turistico. I risultati hanno confermato una correlazione statisticamente significativa tra le condizioni di innevamento ed i flussi turistici invernali, indicativa di possibili impatti negativi dei cambiamenti climatici sul numero di skipass venduti e di pernottamenti effettuati nel periodo invernale presso i siti legati all'attività sciistica, soprattutto in quei luoghi che si trovano alle basse quote e che hanno un'esposizione sfavorevole.

La sfida odierna è anche quella di rendere le stazioni sciistiche esistenti più neutrali dal punto di vista climatico e più resilienti ai cambiamenti climatici, da un lato diversificando l'offerta, dall'altro migliorando la loro efficienza in termini di consumi energetici e idrici per l'operazione degli impianti di risalita, per il riscaldamento degli edifici tecnici, per la produzione di neve artificiale e per le operazioni di preparazione delle piste. Nel frattempo, le tecnologie di innevamento artificiale hanno notevolmente migliorato le proprie performance anche in termini di rapidità di produzione e preparazione delle piste.

I bacini idrici per l'innevamento artificiale

Da alcuni anni, sul territorio trentino, i bacini idrici realizzati in quota hanno assunto il ruolo di un'infrastruttura indispensabile per garantire l'approvvigionamento idrico necessario ad operare gli impianti di innevamento artificiale. Ad oggi tra gli invasi idrici in esercizio sul territorio della Provincia autonoma di Trento, quelli utilizzati anche per l'innevamento artificiale sono 30 per una capacità complessiva di 1.360.000 m³. A questi se ne aggiungeranno in futuro altri 5 che sono attualmente in fase di progetto per una capacità di 276.970 m³ (fonte dei dati: Servizio Impianti a fune, PAT).

Cannone per produzione di neve artificiale (foto: Roland Zumbühl, Wikimedia Commons).



Gli impatti sul turismo estivo



Turisti sulle spiagge del Lago di Molveno (foto: Graziano Panfili, Trentino Sviluppo S.p.A.).

Il trekking e altre attività sportive e ricreative tipicamente praticate in montagna nei mesi più caldi dell'anno potranno subire conseguenze potenzialmente negative causate dall'alterazione dell'estensione, della composizione e dello stato di salute degli ecosistemi forestali in alcune aree (vedi capitolo PRODUTTIVITÀ FORESTALE E FILIERA), ma anche a causa della maggior diffusione di zoonosi e allergie causata dai cambiamenti climatici (vedi capitolo SALUTE), che potrebbero colpire in particolare chi pratica tali attività all'aria aperta.

Inoltre, l'ambiente trentino potrà subire in futuro modifiche significative anche dal punto di vista paesaggistico, in primis a causa della fusione e del ritiro dei ghiacciai alpini ma anche della variazione di estensione e composizione delle foreste, delle alterazioni de-

gli ecosistemi naturali e delle aree coltivate, fino alla modifica del territorio e del suo paesaggio a seguito di eventi estremi rilevanti. Un esempio noto ed esemplificativo è rappresentato da quanto accaduto in seguito alla tempesta Vaia, quando i massicci ed estesi schianti di alberi hanno reso difficilmente riconoscibili alcuni scorci e angoli dei territori colpiti, in particolare quelli della Val di Fassa e Val di Fiemme. Un'altra conseguenza potenzialmente amplificata dalla variazione degli eventi estremi in termini di frequenza, intensità e localizzazione geografica è la possibilità di danneggiamenti e disservizi alle infrastrutture di trasporto e di comunicazione, così come di rischi da pericoli naturali maggiori per l'incolumità e la sicurezza delle persone che visitano il territorio (vedi capitoli TRASPORTI E INFRASTRUTTURE e PERICOLI NATURALI).

La tempesta Vaia e i suoi impatti sul turismo nelle aree colpite

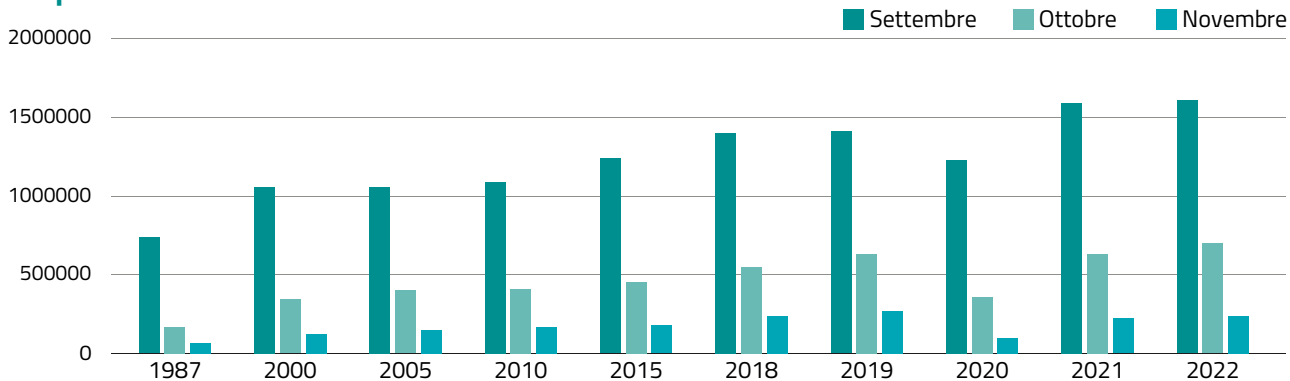
La tempesta Vaia si è verificata a fine ottobre 2018, quando forti raffiche di vento e piogge intense hanno provocato danni ingenti da schianti di alberi, inondazioni e colate di detrito in ampie zone del Trentino, modificandone pesantemente il paesaggio, in molte zone caratterizzate da una forte vocazione turistica, come ad esempio la Val di Fassa.

Nonostante la pesante alterazione di paesaggi iconici e riconoscibili, i flussi turistici si sono mantenuti negli anni seguenti. Purtroppo però le diffuse interruzioni della rete sentieristica locale, causate dagli schianti degli alberi, hanno limitato le possibilità e le modalità stesse di fruizione del territorio da parte dei turisti soprattutto nel periodo immediatamente successivo alla tempesta.

D'altra parte, il cambiamento climatico può anche aprire nuove opportunità per il settore del turismo in Trentino. L'aumento delle temperature estive potrà contribuire ad aumentare i flussi turistici nelle località di montagna caratterizzate da temperature più miti e gradevoli rispetto alle località di pianura e agli ambiti urbani, rendendo per contro meno favorevoli le condizioni per il turismo nei maggiori centri abitati della Provincia, come la città di Trento, per le condizioni di calore estremo più frequenti e più intense (vedi capitolo TEMPERATURE E PRECIPITAZIONI). I dati relativi ai flussi turistici estivi post pandemia hanno evidenziato un trend in aumento per le vacanze in montagna, con una maggior ricerca di spazi aperti e di possibilità di praticare escursionismo e cicloturismo

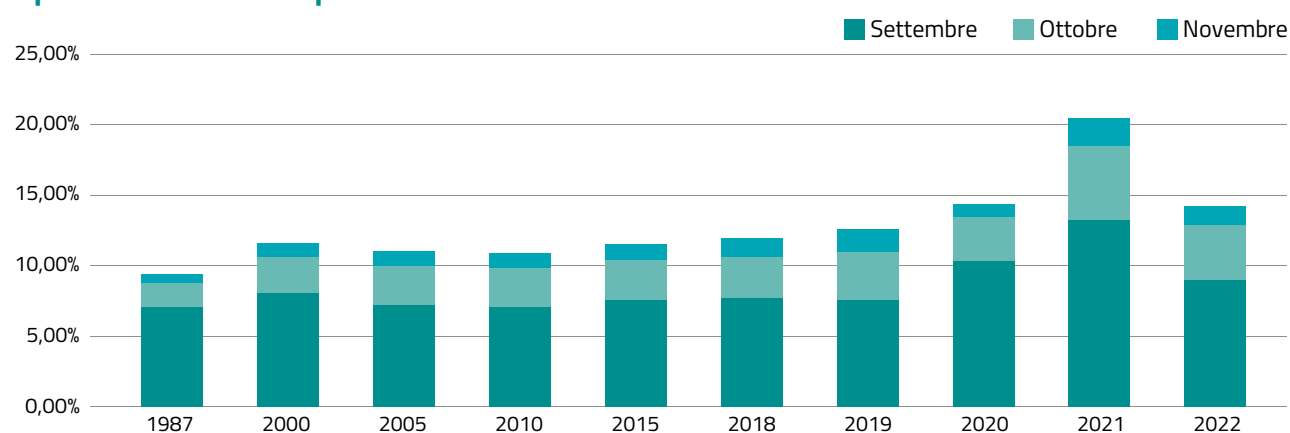
e di scoprire il territorio. L'aumento delle temperature porterà anche ad un probabile allungamento della stagione turistica cosiddetta "estiva", grazie alle condizioni climatiche più favorevoli alle attività all'aria aperta anche nelle località di montagna nei mesi primaverili e autunnali, le cosiddette "belle stagioni". In effetti, anche grazie a politiche di promozione turistica dedicate, a fronte di una crescita importante nei numeri di presenze totali annuali (almeno fino alla battuta d'arresto causata dal COVID nel 2020), le presenze nei mesi autunnali sono aumentate in maniera considerevole e con costanza, arrivando a rappresentare nel 2022 poco meno del 15% delle presenze totali registrate nel corso dell'anno.

N° presenze turistiche mensili



Andamento storico delle presenze turistiche totali negli esercizi alberghieri ed extralberghieri in Trentino nei mesi autunnali. Gli anni 2020 e 2021 non sono rappresentativi a causa delle conseguenze dell'epidemia di COVID19. Si nota una crescita complessiva e graduale delle presenze fino al 2019, con numeri in ripresa nel 2022 (fonte dei dati: ISPAT).

% presenze mensili su presenze totali annue



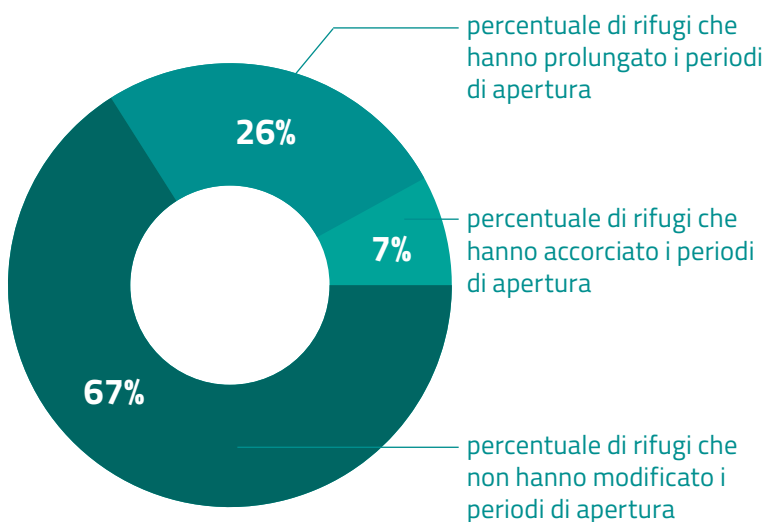
Andamento storico della percentuale rappresentata dalle presenze turistiche negli esercizi alberghieri ed extralberghieri in Trentino nei mesi autunnali rispetto a quelle annuali nell'anno di riferimento. Gli anni 2020 e 2021 non sono rappresentativi a causa delle conseguenze dell'epidemia di COVID19. Si nota una crescita del peso percentuale delle presenze turistiche autunnali sul totale annuale (fonte dei dati: ISPAT).

Gli impatti futuri per il settore del turismo estivo possono quindi risultare sia positivi che negativi, con un effetto complessivo tuttora difficile da prevedere. Dal punto di vista dell'offerta turistica, il cambiamento climatico spinge a differenziare la stessa su pratiche

più sostenibili e innovative, con una gestione più efficiente dei flussi turistici. Ciò deve essere considerato congiuntamente ai rischi climatici sopra esposti, per arrivare ad un equilibrio duraturo del sistema.

Gli effetti sulla gestione dei rifugi alpini

Effetti sulle date di apertura e chiusura dei rifugi a causa dell'anticipo dell'inizio della fusione della neve o del ghiaccio e della minor permanenza della neve al suolo

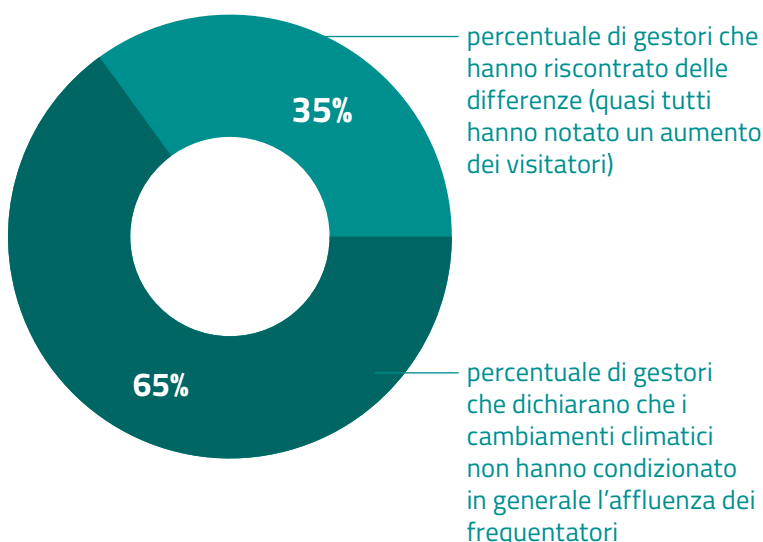


Negli ultimi anni gli eventi estremi quali vento forte, tempeste, fulmini, precipitazioni intense e torrenti in piena hanno colpito più della metà dei rifugi del Trentino senza significative differenze tra i rifugi al di sotto dei 2000 metri di quota e quelli al di sopra (la maggior parte). Gli impatti maggiori sono stati riscontrati però nelle aree del Cevedale, del massiccio del Brenta, dell'Adamello e della Presanella, delle Dolomiti e del Lagorai settentrionale.

Dal punto di vista dell'approvvigionamento idrico nei rifugi alpini, un'indagine condotta dal Servizio Turismo e Sport della PAT nel 2022 ha evidenziato che, anche a seguito dei cambiamenti climatici, la crescente scarsità d'acqua alle alte quote nei mesi più caldi ha causato negli ultimi 20 anni problemi al 76% dei rifugi. Per arginare il problema sono stati messi in atto rimedi quali la posa di vasche di accumulo e l'adeguamento delle opere di captazione.

Gli itinerari alpinistici o i punti di attacco delle vie alpinistiche, per i quali i rifugi costituiscono la base di partenza o un punto di appoggio, sono cambiati a causa degli effetti dei cambiamenti climatici per il 27,5% dei rifugi alpini del Trentino.

Effetti sull'affluenza



Fonte: Servizio Turismo e Sport, PAT (2022).

La crisi idrica nei rifugi alpini nell'estate 2022

L'Associazione Gestori dei Rifugi del Trentino già nel mese di luglio 2022 ha espresso la propria preoccupazione per la situazione critica dell'approvvigionamento idrico nelle strutture in alta quota, a causa dell'eccezionale condizione di scarsità di precipitazione e temperature elevate. Tale circostanza ha reso difficoltoso garantire nei mesi estivi del 2022 ad escursionisti e alpinisti il libero utilizzo di alcuni servizi, quali la possibilità di farsi una doccia calda.

Rifugio Mandron (foto: Archivio SAT).



Progetti di ricerca sul tema del turismo e dei cambiamenti climatici

Il progetto NEVERMORE

Dal giugno 2022 è attivo il progetto europeo finanziato dal programma Horizon Europe NEVERMORE “New Enabling Visions and tools for End-users and stakeholders thanks to a common MOdeling appRoach towards a climatE neutral and resilient society” (Nuove prospettive e strumenti a supporto di una valutazione dell'impatto e dei rischi del cambiamento climatico per una società climaticamente neutrale e resiliente). Il progetto è coordinato dalla Fondazione B. Kessler e vede la partecipazione come partner del Servizio per il Turismo e lo Sport, quale leader del caso studio rappresentato dalla Provincia autonoma di Trento.

Il progetto intende analizzare compiutamente impatti e rischi del cambiamento climatico sul settore del turismo, per sviluppare un quadro integrato e valutare congiuntamente misure di adattamento e mitigazione. Tramite la creazione di strumenti digitali interattivi destinati a cittadini e decisori politici sono resi accessibili gli scenari futuri e le più efficaci politiche di mitigazione e adattamento.

NEVERMORE ha attivato un Gruppo di Lavoro locale (il *Local Council of Stakeholders*), che sta coinvolgendo diversi portatori d'interesse trentini e favorirà riflessione e discussione sulle sfide poste dai cambiamenti climatici nei settori del turismo e dell'energia, con un approccio basato su partecipazione e co-progettazione.

Il progetto SMART ALTITUDE

Nell'ambito della mitigazione e dell'adattamento dei comprensori sciistici il progetto ormai concluso SMART ALTITUDE (finanziato dal programma INTERREG Alpine Space e svoltosi negli anni 2018-2021) si è posto l'obiettivo di agevolare ed accelerare l'attuazione di politiche a basse emissioni di carbonio nelle regioni dove il turismo è prevalentemente invernale.

Il progetto, che ha visto tra i partner la Fondazione B. Kessler e Trentino Sviluppo, ha sviluppato uno strumento di supporto decisionale dedicato alla transizione energetica, lo Smart Altitude Toolkit, che raccoglie azioni di adattamento e mitigazione che possono essere implementate dalle stazioni sciistiche. L'approccio è stato testato in stazioni sciistiche pilota, ossia “Living Lab” alpini. Il caso studio della Ski Area di Madonna di Campiglio in Trentino ha portato alla creazione di un Sistema Integrato di Gestione dell'Energia dedicato all'innevamento artificiale, per il miglioramento dell'efficienza energetica, l'ottimizzazione dell'uso dell'acqua, l'integrazione delle fonti di energia rinnovabili e la riduzione delle emissioni climateranti. Sono stati inoltre analizzati il sistema di innevamento e il numero di generatori di neve, sviluppando un sistema di monitoraggio per il rilievo dello spessore di neve battuta sulle piste da sci.

Per il territorio trentino ad oggi non sono disponibili studi che indaghino in dettaglio e in maniera quantitativa il legame tra i dati statistici sulle presenze, gli arrivi e i pernottamenti e le tendenze di lungo periodo associate invece agli impatti dei cambiamenti climatici e ai potenziali rischi ad essi collegati, oppure le potenziali implicazioni socio-economiche future dei cambiamenti in atto, ad esempio per quanto concerne i modelli di sviluppo economico e i livelli di benessere e occupazione delle comunità locali nei diversi territori provinciali. Mentre sul primo di questi aspetti si sta lavorando per colmare tale lacuna, anche attraverso il progetto NE-VERMORE, per quanto riguarda lo sviluppo locale numerosi sono gli studi relativi alla capacità di carico delle destinazioni turistiche, un concetto importante da considerare sia per la conservazione dell'ambiente che per una buona qualità dell'esperienza turistica.

In sintesi, per quanto riguarda il settore del turismo i cambiamenti climatici possono essere considerati uno dei principali fattori che stanno spingendo il territorio trentino a ricercare un equilibrio tra sviluppo turistico, benessere delle comunità locali, rispetto per l'ambiente e soddisfazione degli ospiti.

Capacità di carico: cos'è?

La “capacità di carico” (in inglese “carrying capacity”) di una determinata destinazione turistica è definita dall’Organizzazione Mondiale del Turismo delle Nazioni Unite (UNWTO) come:

“Il numero massimo di persone che possono visitare una destinazione turistica nello stesso momento, senza causare la distruzione dell’ambiente fisico, economico e socio-culturale e una diminuzione inaccettabile della qualità della soddisfazione dei visitatori”.



Insedimenti e aree urbane

Gli ambienti urbani sono particolarmente sensibili agli impatti dei cambiamenti climatici su edifici e infrastrutture, oltre che sulla popolazione residente, ponendo inevitabilmente nuove sfide per la pianificazione territoriale e urbana in futuro.

Veduta della città di Trento (foto: Carlo Baroni, Trentino Sviluppo S.p.A.)

Gli ambiti urbani sono particolarmente esposti ai rischi legati alle mutate condizioni climatiche poiché tipicamente caratterizzati da una più alta densità di popolazione, beni economici (edifici, infrastrutture, attività lavorative) e servizi. Nelle aree urbane, inoltre, la severità degli effetti di determinati eventi estremi tende ad amplificarsi, come ad esempio per le ondate di calore a causa dell'effetto di "isola di calore urbana" e per le alluvioni in virtù dell'elevata percentuale di superfici impermeabili che impediscono l'infiltrazione dell'acqua nei suoli. Per il Trentino è importante tenere in considerazione come gli insediamenti e le aree urbane siano spesso distribuiti a differenti quote e possano pertanto essere esposti a differenti rischi climatici, con impatti che tendenzialmente potranno interessare in futuro in maniera più netta le grandi aree urbane situate nelle valli alle quote minori, anche perché esse ospitano ad oggi la maggior parte della popolazione provinciale.

L'emergenza climatica e il potenziale aggravarsi dei pericoli naturali (vedi capitolo PERICOLI NATURALI) derivanti da eventi meteorologici estremi e delle loro conseguenze per gli insediamenti (frane, smottamenti, inondazioni e allagamenti, interruzione delle reti infrastrutturali, ecc.), renderanno inoltre indispensabile un approccio alla pianificazione territoriale in grado di farsi carico anche del tema dei cambiamenti climatici. Si tratta di sfide che impongono un ripensamento dell'approccio alla pianificazione in termini di conversione ed efficientamento di insediamenti e reti infrastrutturali per rispondere alla necessità dell'adattamento ai cambiamenti climatici e di una maggior resilienza climatica, così come al perseguimento dell'obiettivo di raggiungere nuovi livelli di prestazione energetica degli edifici e del sistema urbano per ridurre nettamente consumi energetici ed emissioni di gas climalteranti.

Impatti sulle aree urbane

Eventi estremi e pericoli naturali associati come ondate di calore, scarsità d'acqua, forti piogge con scorrimento e accumulo delle acque piovane, allagamenti e inondazioni possono comportare forti perdite econo-

omiche nelle aree urbane legate al danneggiamento di edifici e beni, ma anche incidere negativamente sulla fornitura di servizi essenziali come trasporti, acqua e energia, sulla salute pubblica e sulla qualità della vita.

Impatti sulla gestione delle risorse idriche e sicurezza idraulica

Per quanto non siano noti ad oggi studi specifici per il territorio trentino, eventi di siccità e di precipitazione intensa più frequenti in futuro, associati a problematiche anche preesistenti di dissesto idrogeologico, porranno in futuro maggiori problemi di gestione della risorsa idrica e di sicurezza idraulica nei contesti urbani.

Le reti di drenaggio per il deflusso delle acque meteoriche risentono enormemente degli effetti legati ai cambiamenti climatici, soprattutto dell'aumento dei fenomeni di precipitazione particolarmente intensa. La continua impermeabilizzazione dei suoli ha portato ad un aumento dei deflussi superficiali e alla diminuzione dell'infiltrazione sia superficiale che profonda anche a fronte della stessa quantità di precipitazione. Gli allagamenti urbani solitamente si verificano quando, in seguito a precipitazioni intense, la rete di drenaggio urbana non riesce a far defluire correttamente l'afflusso meteorico, a causa di un dimensionamento insufficiente delle rete e talvolta anche a seguito di possibili ostruzioni o sovraccarichi

del sistema fognario che amplificano ulteriormente le criticità. Questi fenomeni, che possono mettere a serio rischio le zone urbanizzate e le infrastrutture insistenti sul territorio cittadino, sono tra gli eventi più complessi da modellare data la forte incertezza che caratterizza le precipitazioni estreme e la rapidità con la quale si sviluppano i processi di allagamento che ne derivano (alluvioni lampo o flash floods).

Inoltre, i sempre più frequenti e prolungati periodi secchi possono avere l'effetto di aumentare l'inquinamento atmosferico e dell'ambiente urbano, che sono entrambi responsabili del deterioramento dei parametri di qualità delle acque di prima pioggia (intese convenzionalmente come le acque di dilavamento originate dalla pioggia che cade nei primi 15 minuti dell'evento di precipitazione). Tali acque possono risultare così più inquinate che in passato, richiedono trattamenti di depurazione ad hoc, e contribuiscono ad abbassare temporaneamente la qualità dell'acqua dei corpi idrici.



Intervento dei Vigili del Fuoco del Trentino in area alluvionata (foto Ufficio Stampa. PAT).

I processi di deterioramento delle reti idrauliche urbane, che sono il risultato di una complessa interazione tra i materiali (metallici e non metallici) e i fattori di impatto climatico, come umidità, pioggia, inondazioni, vento, radiazione solare, temperatura estreme prolungate, siccità, escursione termica diurna, nonché di impatto ambientale, come inquinanti atmosferici, polvere e particolato, potrebbero risultare più rapidi in futuro.

I sistemi di drenaggio e trattamento delle acque reflue forniscono un servizio fondamentale per la società e la loro vulnerabilità agli impatti dei cambiamenti climatici può mettere a rischio igiene e salute delle comunità urbane. Gli impatti potenziali per la rete delle acque reflue si riferiscono essenzialmente alla fuoriuscita o sversamento, all'emanazione di odori fastidiosi, al deterioramento della qualità dell'acqua a causa di più frequenti scarichi incontrollati per sovraccarico e a maggiori danni alle infrastrutture. Le implicazioni immediate e a lungo termine derivanti da questi impatti potrebbero manifestarsi con effetti sia ambientali che economici, accompagnati da rischi per la salute pubblica.

Soluzioni basate sulla natura per il drenaggio delle acque

Sempre più spesso, nelle aree urbane, la rete di drenaggio esistente viene ri-progettata o integrata attraverso l'introduzione di tecniche di drenaggio urbano sostenibile che permettono di trattenere l'acqua piovana in maniera diffusa prima che questa venga convogliata nella rete di drenaggio, attraverso l'applicazione di Nature Based Solutions (soluzioni basate sulla natura). Tra le tecniche più comuni: tetti verdi, pavimentazioni porose, trincee filtranti, aree umide, ecc. che permettono di favorire l'infiltrazione, distribuire e rallentare il deflusso, contribuendo inoltre ad un primo filtraggio dell'acqua piovana.

Siccità più frequenti in futuro possono determinare periodici problemi di approvvigionamento idrico rendendo necessario sia l'efficientamento dei sistemi acquedottistici che la predisposizione e l'adeguamento di sistemi di riuso e recupero dell'acqua. I piccoli centri situati sui versanti di alcune valli del Trentino appaiono maggiormente esposti alla scarsità d'acqua potabile nella stagione estiva rispetto ai centri maggiori nel fondovalle, che sono serviti da reti di acquedotto più ampie e interconnesse, alimentate da più sorgenti e/o fonti.



Autobotte della Protezione Civile (foto: Servizio prevenzione rischi e Cue PAT).

Impatti sulla domanda energetica

Le temperature mediamente più elevate durante tutto l'anno e le ondate di calore più frequenti, soprattutto in estate, comportano una rimodulazione della domanda di energia associata al riscaldamento e al raffrescamento degli edifici sia privati che pubblici nelle diverse stagioni. In particolare nelle aree urbane

di fondovalle alle quote inferiori, come la Valle dell'Adige, le temperature elevate dei picchi estivi possono incrementare fortemente la domanda di energia, mettendo sotto pressione le infrastrutture, ad esempio le reti energetiche, fino a causare interruzioni e disservizi. (vedi capitolo ENERGIA).

Impatti sulla salute umana

Ondate di calore più frequenti comportano maggiori rischi per la salute umana, in particolare nei centri urbani di fondovalle, oltre a peggiorare le condizioni di disagio termico percepito per le persone che vivono,

lavorano e interagiscono all'interno di edifici privi di adeguati sistemi di raffrescamento e negli spazi urbani esterni. (vedi capitolo SALUTE).

Impatti sugli edifici

I cambiamenti climatici possono influire sia sulle caratteristiche strutturali degli edifici che sulle condizioni interne degli stessi. Il futuro potrebbe comportare un aumento del rischio di degrado dei materiali da costruzione e persino dell'integrità strutturale degli edifici pre-esistenti, deterioramento del clima interno e riduzione della durata dell'edificio. Gli edifici nuovi ed esistenti devono essere valutati per la resilienza ai rischi attuali e ai futuri cambiamenti climatici e pianificati, progettati, realizzati o adeguati di conseguenza, anche in funzione della loro localizzazione

spaziale (il principale fattore di esposizione).

Oltre ad avere un impatto sulle caratteristiche strutturali di un edificio, il cambiamento climatico può influenzare le condizioni di comfort termico in cui le persone vivono e lavorano all'interno. I sistemi di riscaldamento e, soprattutto, di raffreddamento dovranno essere adeguati per far fronte al disagio termico causato dalle future condizioni di temperatura, in particolare per quanto concerne il periodo estivo e le temperature estreme.

Impatti sugli ecosistemi urbani

Gli effetti negativi dei cambiamenti climatici colpiscono anche la salute degli ecosistemi delle aree verdi e dei parchi urbani. Temperature più elevate e stress da siccità nei periodi prolungati di scarse precipitazioni possono indebolire gli alberi, ren-

dendoli più suscettibili agli attacchi e ai danni di parassiti e malattie. Piogge intense più frequenti possono provocare ristagni d'acqua che possono danneggiare o addirittura uccidere gli alberi. Le gelate tardive possono interrompere la fioritura e

lo sviluppo delle gemme fogliari che tendono ad anticipare il loro ciclo a causa del riscaldamento generalizzato. I forti venti su piante già indebolite sia dalle modifiche climatiche che da stress urbani come tagli e danni alle radici, suolo scadente, cure colturali inadeguate, possono provocare schianti con importanti implicazioni legate alla gestione emergenziale di protezione civile.

Parco di Levico a seguito della tempesta Vaia (foto: F. Fronza, Archivio SOVA).



Effetti sulle discariche di rifiuti

L'impatto dei cambiamenti climatici sulle discariche è ancora poco studiato, tuttavia esso può rappresentare una significativa minaccia ambientale. Ad esempio, l'aumento dell'intensità degli eventi di precipitazione brevi può causare produzioni non previste di percolato (rifiuto liquido altamente inquinante prodotto dalle stesse discariche) che possono portare a rotture dei tubi e alla fuoriuscita di tali liquidi, come è avvenuto nella discarica Maza nel Comune di Arco nel 2018. L'aumento dell'intensità delle piogge brevi può anche causare un aumento dell'erosione e delle inondazioni che possono interessare le discariche situate in aree soggette ad alluvioni e allagamenti. In Trentino, ad esempio, si sono verificati due eventi di piena durante l'estate 2023 (sul rio Selle nel Comune di Levico terme e sul fiume Sarca nel Comune di

Tione) che hanno contribuito ad erodere la copertura di vecchie discariche coperte con solo uno strato di terra e adiacenti agli alvei. Nonostante i rifiuti presenti fossero già mineralizzati, si sono avuti rifiuti all'interno dell'alveo e si è dunque dovuto procedere alla pulizia dell'alveo oltre che alla messa in sicurezza delle vecchie discariche.

Il possibile incremento della frequenza di tali eventi pone un rischio crescente e la necessità di ricorrere a soluzioni nuove. In tal senso, per evitare la realizzazione di nuove discariche in aree idraulicamente sensibili, i nuovi criteri localizzativi per le discariche previsti nel 5° aggiornamento del Piano provinciale di gestione dei rifiuti prevedono la non idoneità di aree ricadenti in Ambiti Fluviali di interesse idraulico (AFI) del Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche. Per le discariche esistenti, considerando che l'alternarsi di

fasi di siccità a fasi di piogge intense in brevi periodi può favorire il deterioramento dei materiali di copertura favorendo nel lungo termine infiltrazione dell'acqua piovana e percolazione, si rende necessario un loro continuo monitoraggio. Ciò al fine di ridurre e prevenire un maggior rischio di fenomeni di contaminazione ambientale.

Discarica della Maza ad Arco (foto: Comune di Arco).



Impatti sulla pianificazione e la progettazione urbana

Gli effetti dei cambiamenti climatici impongono la necessità di rivedere la pianificazione e la progettazione urbana in ottica di resilienza climatica, anche al fine di migliorare la qualità e la funzione sociale degli spazi urbani. In risposta a queste sfide, molti pianificatori, designer e progettisti stanno ripensando le città,

attraverso nuovi paradigmi che integrano strategie di adattamento al cambiamento climatico, quali ad esempio l'utilizzo diffuso di soluzioni basate sulla natura, con le necessarie misure di mitigazione, in particolare attraverso una maggior efficienza energetica e una maggior produzione di energia rinnovabile.

Soluzioni Basate sulla Natura nelle aree urbane

Le Soluzioni Basate sulla Natura sono interventi che utilizzano il verde e la natura per migliorare la qualità dell'ambiente e della vita nelle città. Si tratta di interventi ispirati alla natura in grado di dare risposte a problemi urbani concreti, come ridurre gli effetti delle ondate di calore, ma anche aumentare le occasioni di interazione e quindi la coesione sociale, oltre a promuovere una vita più attiva all'aria aperta e quindi la buona salute dei cittadini, migliorando al contempo la biodiversità e la salute degli ecosistemi di ambito urbano

e la loro capacità di fornire servizi ecosistemici. Esempi concreti sono: parchi e giardini pubblici, orti comunitari, alberature stradali, siepi e fasce piantumate, foreste urbane, tetti e pareti verdi, oasi urbane di biodiversità, così come spazi verdi che offrano opportunità ricreative e sportive. Tutte queste soluzioni, inoltre, presentano il vantaggio di favorire l'infiltrazione e il drenaggio delle acque di pioggia durante gli eventi di precipitazione particolarmente intensi, contribuendo alla diminuzione del rischio di allagamenti grazie alla maggior permeabilità delle superfici.

Il monitoraggio del verde urbano nel Comune di Trento

Il monitoraggio del verde urbano è fondamentale nel contesto del cambiamento climatico in atto. Un recente studio dell'Università di Trento ha testato nel territorio del Comune di Trento un processo semplice e replicabile per la mappatura delle superfici permeabili e della copertura vegetale, ai fini di supportare una pianificazione urbana sostenibile che integri soluzioni di adattamento e mitigazione. Il metodo proposto combina l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), estratto da immagini aeree ad alta risoluzione (20 cm), con modelli digitali di elevazione del terreno e fornisce una mappatura dettagliata degli spazi verdi nelle aree urbane, descrivendone la quantità e la distribuzione spaziale con un'accuratezza dell'80%, oltre ad una mappa di sintesi alla scala del singolo isolato che esprime il grado di superficie permeabile e di copertura vegetale.

Il cambiamento climatico deve quindi modificare gli approcci alla pianificazione e alla progettazione anche in Trentino. Va potenziato l'uso dei servizi ecosistemici e delle soluzioni basate sulla natura, con particolare attenzione alle aree verdi cittadine, come i parchi e i giardini, e alla migliore qualità di vita che esse determinano in termini di salute e benessere. Anche se gli ecosistemi urbani ricoprono superfici limitate, il loro contributo è fondamentale in quanto forniscono benefici diretti a un numero elevato di persone.

Il Comune di Trento e l'Università degli studi di Trento sono attualmente coinvolti e collaborano in due progetti finanziati dal programma Horizon Europe, SELINA (Science for Evidence-based and sustainable decisions about NATural capital) e BioValue (Biodiversity Value in spatial policy and planning: leveraging multi-level transformative change), con l'obiettivo di supportare la protezione, il ripristino e la gestione sostenibile e climaticamente neutra della biodiversità e degli ecosistemi urbani, integrando servizi ecosistemici e soluzioni basate sulla natura in ambito urbano.

Mentre BioValue si concentra sul caso di studio del corso del torrente Fersina, il progetto Selina intende predisporre strumenti di supporto alle decisioni per una programmazione e una gestione integrate del prezioso patrimonio di verde urbano cittadino.



Parco delle Albe a Trento
(foto: Archivio MUSE).

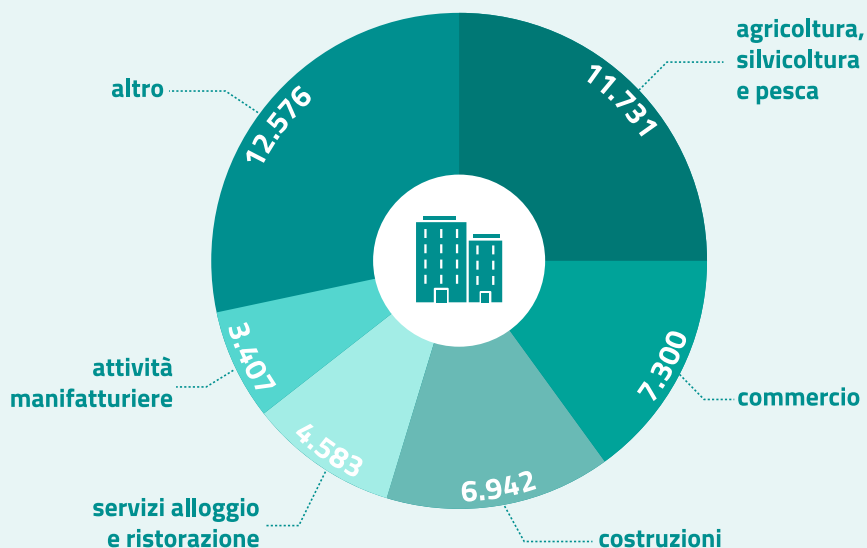
An aerial photograph of the Polo industriale di Rovereto, showing several large industrial buildings with solar panels on their roofs. The image is partially covered by a semi-transparent green rectangle containing white text. In the background, a town and mountains are visible.

Imprese, industrie e infrastrutture

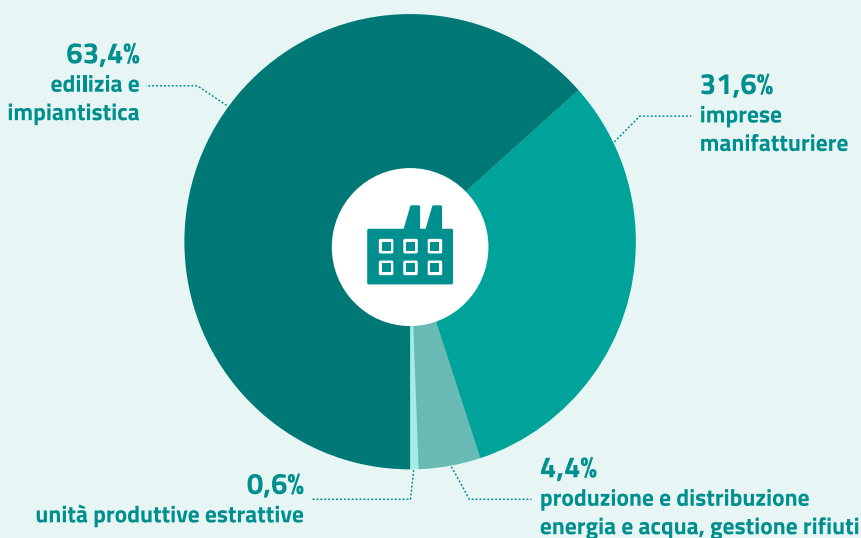
I cambiamenti climatici possono avere impatti diretti e indiretti sulle attività produttive, causando danni materiali e minor produttività e aumentando i costi sia per la gestione di strutture e infrastrutture che per la tutela dei lavoratori.

Valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sul settore industriale e produttivo della Provincia di Trento è complesso, anche a causa della grande eterogeneità delle attività che caratterizzano il settore, che appaiono molto varie per tipologia, dimensioni e risorse utilizzate.

Nel 2023 in Trentino sono risultate attive 46.539 imprese distribuite nei diversi settori di attività economica. Tra le più numerose quelle che appartengono al settore dell'agricoltura, silvicoltura e pesca, con un totale di 11.731 imprese. Seguono il settore del commercio, con 7.300 imprese, quello delle costruzioni con 6.942 imprese, le attività dei servizi alloggio e ristorazione (turismo) con 4.583 imprese e le attività manifatturiere con 3.407 imprese.



Numero delle imprese attive per settore di attività commerciale (fonte: Elaborazioni ISPAT su dati Movimprese).



Numero delle imprese attive nel comparto industriale (fonte: Elaborazioni ISPAT su dati ISTAT ASIA imprese 2021).

Per quanto concerne il comparto industriale, in termini numerici in Trentino prevalgono le imprese che operano nell'edilizia e impiantistica (63,4%), cui fanno seguito le imprese manifatturiere (31,6%) e quelle che operano nella produzione e distribuzione di energia, acqua e gestione dei rifiuti (4,4%). Marginale è la presenza di unità produttive estrattive (0,6%). Dal punto di vista occupazionale i pesi mutano in modo significativo: la manifattura prevale con il 58,9% di occupati; seguono le costruzioni con il 34,2%, l'energia (6,1%) e le imprese estrattive (0,8%).

Impatti diretti e indiretti dei cambiamenti climatici

Una valutazione in dettaglio degli effetti dei cambiamenti climatici su industrie, imprese e infrastrutture associate per il territorio trentino non è ad oggi disponibile, tuttavia analisi effettuate a livello nazionale mettono in evidenza potenziali impatti che, in futuro, potrebbero manifestarsi in maniera analoga anche a livello locale.

L'aumento in termini di frequenza e intensità dei fenomeni meteorologici estremi potrà causare maggiori impatti diretti in termini di danni fisici a beni (come impianti e macchinari), stabilimenti produttivi e infrastrutture a loro servizio (di trasporto, energetiche, di informazione e telecomunicazione, ecc.), causando una maggiore discontinuità delle

I potenziali impatti dei cambiamenti climatici su industrie, imprese e infrastrutture sono descritti nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici approvato nel 2023 e nel rapporto “Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità” redatto nel 2022 da un'apposita Commissione incaricata dal Ministero Infrastrutture e mobilità sostenibile (oggi Ministero delle infrastrutture e dei trasporti).



Danni da alluvione in stabilimento (foto Pexels).

attività lavorative e, quindi, una minor produttività oltre ai maggiori costi di ripristino. La gravità di questi effetti varierà principalmente a seconda dell'ubicazione dell'azienda, del settore produttivo e della sua vulnerabilità specifica. Tra i settori più vulnerabili vi è quello delle imprese di costruzione, per i potenziali danni alle infrastrutture e per l'interruzione delle attività che i maggiori eventi estremi potrebbero causare. Sarà quindi necessario agire nella direzione di ripensare edifici industriali e commerciali, spazi e infrastrutture del settore con una maggior attenzione alla resilienza degli stessi a fenomeni di temperature estreme, piogge intense, allagamenti e inondazioni, tempeste di vento e grandine (vedi capitolo PERICOLI NATURALI).

Gli effetti dell'aumento delle temperature e delle ondate di calore si ripercuoteranno in maniera particolare su alcuni settori, come quello agricolo, forestale e dell'allevamento e acquacoltura, in virtù del loro stretto legame con l'ambiente naturale e con le alterazioni ad esso apportate dai cambiamenti climatici (si vedano i capitoli AGRICOLTURA, PRODUTTIVITÀ FORESTALE E FILIERA e ALLEVAMENTO E ACQUACOLTURA).

Gli impatti indiretti, invece, sono costituiti da effetti collaterali come l'interruzione della catena di approvvigionamento (di materie prime e componenti), la riduzione delle entrate economiche, l'aumento dei costi e le alterazioni nella disponibilità di risorse idriche per quei settori che ne fanno uso. L'utilizzo dell'acqua è infatti fondamentale in molti processi produttivi

oppure in processi di lavaggio e raffreddamento; la risorsa idrica è soggetta ad una domanda crescente, soprattutto nella stagione estiva, e, di conseguenza, a possibili conflitti per il suo utilizzo legato ad altre attività essenziali, quali l'irrigazione in agricoltura, la produzione idroelettrica e l'uso civile e potabile (si veda il capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE).

Un altro impatto importante potrebbe essere quello sull'approvvigionamento energetico (vedi capitolo ENERGIA). Ad esempio, il crescente fabbisogno di energia elettrica per il raffrescamento estivo da parte degli edifici sia residenziali che industriali e commerciali, in concomitanza con una possibile minor produzione idroelettrica locale nello stesso periodo a causa dei possibili conflitti per la scarsità d'acqua, potrebbe

indurre con più frequenza episodi di black out e interruzione della fornitura di energia elettrica su scala nazionale, con conseguente interruzione delle attività produttive anche in Trentino.

Anche le imprese del comparto turistico invernale potranno risentire in maniera significativa delle conseguenze negative dei cambiamenti climatici, in particolare a seguito della riduzione della disponibilità naturale di neve e della sua durata al suolo. La maggior necessità di utilizzo delle tecnologie di innevamento artificiale, inoltre, aumenterà il consumo di acqua e energia e i costi associati (vedi capitolo TURISMO).

Impatti sulla produttività e sulla salute dei lavoratori

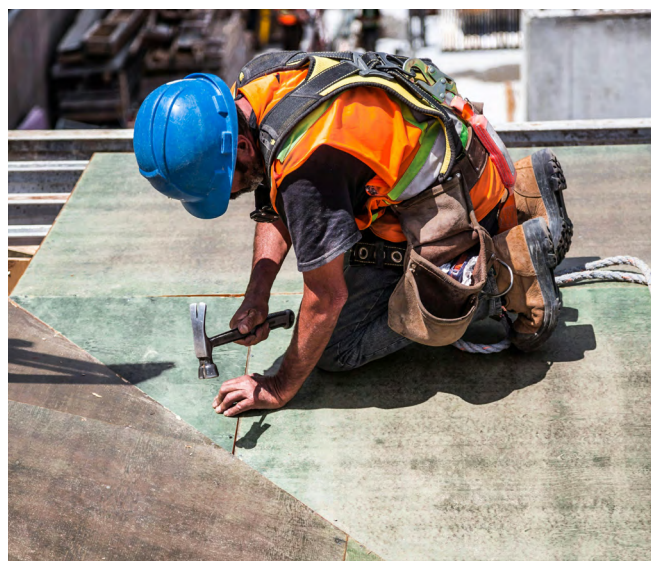
Le temperature in aumento, così come le ondate di calore più intense e frequenti, potranno avere un impatto negativo sulla produttività dei lavoratori in diversi settori, fino a costituire un rischio per la loro salute (vedi capitolo SALUTE), in particolare in riferimento a quelle mansioni lavorative che si svolgono all'aria aperta durante la stagione estiva nelle ore più calde del giorno, come i lavoratori agricoli, quelli del settore dell'edilizia e quelli del comparto estrattivo, oppure in ambienti industriali e manifatturieri chiusi privi di impianti di condizionamento adeguati e/o nelle immediate vicinanze di macchinari che lavorano ad alte temperature, come ad esempio caldaie e forni.

In assenza di misure di prevenzione adeguate, l'aumento dell'esposizione professionale al calore potrà avere un significativo impatto sulla produttività e anche sui costi del lavoro. Potrebbe essere necessario sospendere le operazioni in alcune ore o giornate, allungando i tempi di lavoro, oppure aumentare il numero di lavoratori per ottenere la stessa produzione. I costi economici correlati alla perdita di produzione e/o agli interventi volti a tutelare maggiormente la salute dei lavoratori, ad esempio contro l'esposizione al calore eccessivo, potrebbero aumentare notevolmente in futuro e incidere in maniera significativa sui costi d'impresa.

Impatti dei pericoli naturali sulle aziende italiane



In Italia una impresa su tre risulta esposta a potenziali perdite economiche a causa di pericoli naturali come ondate di calore, precipitazioni intense, inondazioni e frane (fonte: International Center for Social Research).



Lavoratore del settore edile (foto: Pexels).

Impatti sulle piccole e medie imprese

La struttura del tessuto economico trentino è caratterizzata soprattutto dalla presenza prevalente di piccole e medie imprese nei diversi settori, in particolare in quello agricolo e turistico, ma anche nel settore industriale e artigianale. Tale circostanza corrisponde in generale ad una maggior vulnerabilità del settore produttivo ai rischi climatici, in virtù della minor capacità di accesso a formazione specifica, risorse umane e tecnologiche ma anche investimenti finanziari per accrescere la resilienza ai cambiamenti climatici rispetto alle imprese e alle industrie di dimensione maggiore.

Le piccole e medie imprese, inoltre, sostengono in maniera capillare l'occupazione nelle comunità locali e contribuiscono al tempo stesso all'identità dei luoghi dove sono presenti. Ne consegue che, quando esse subiscono l'impatto dei cambiamenti climatici, gli effetti possono ricadere in maniera pesante sull'intera comunità e sul tessuto socio-economico locale (vedi capitolo COESIONE SOCIALE, BENESSERE E SICUREZZA DELLE COMUNITÀ).

Trasporti e infrastrutture

Gli impatti causati dal cambiamento climatico sui trasporti e sulle relative infrastrutture sono destinati a intensificarsi in futuro, con una maggiore probabilità di interruzione dei trasporti e dei collegamenti ed effetti negativi di carattere economico e sociale, non solo a livello locale.



Gli impatti dei cambiamenti climatici possono causare danni importanti alle infrastrutture per la mobilità e i trasporti come strade, autostrade, ferrovie e mezzi di superficie. In particolare, possono essere danneggiate le singole componenti strutturali come ponti, viadotti, gallerie, opere di sostegno e impianti di alimentazione elettrica di ambito ferroviario.

Come riportato anche dal Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici, approvato nel 2023, in questo settore sono prevedibili una serie di impatti potenziali, per i quali però non è ancora stata valutata in dettaglio la rilevanza attuale e futura per il ter-

ritorio trentino. Tuttavia, è possibile che in futuro le conseguenze siano maggiormente significative, sia in termini di gestione di situazioni emergenziali che per quanto riguarda la manutenzione e la progettazione delle infrastrutture stesse. Maggiore rilievo potranno assumere anche le conseguenze negative di carattere socio economico, poiché, data la natura stessa del territorio provinciale, un'interruzione dei collegamenti può causare l'isolamento quasi completo di una valle o di un'area, oppure addirittura interrompere completamente il trasporto di persone e merci tra Italia e Nord Europa lungo il corridoio del Brennero.

Impatti sul trasporto terrestre

L'aumento di fenomeni meteorologici estremi e dei pericoli naturali associati (vedi capitolo PERICOLI NATURALI) potrebbe incrementare le interruzioni di funzionamento, incidendo in modo negativo sui costi di manutenzione e ripristino per le infrastrutture di trasporto terrestre. Esondazioni, inondazioni e allagamenti possono invadere sedi stradali, ferroviarie e strutture connesse, ma anche causare fenomeni di erosione che danneggiano strutturalmente opere e ponti. Il trasporto di materiale solido, detriti e massi può ostruire sia le opere idrauliche che le vie di comunicazione terrestri. Le frane, rese più probabili dalla maggior possibilità di precipitazioni intense, possono danneggiare le infrastrutture viarie e ferroviarie e distruggere ponti e viadotti. Infine, anche le tempeste di vento possono causare danni alle carreggiate stradali e alle sedi ferroviarie, interrompendo il transito per la presenza di rami o alberi caduti, che possono inoltre colpire le linee aeree interrompendo il servizio ferroviario.

Le ondate di calore tendono a peggiorare i processi di degradazione e rottura del manto della pavimentazione stradale, con il conseguente aumento degli interventi e dei costi di manutenzione e ripristino necessari. Per quanto riguarda l'infrastruttura ferroviaria, le temperature estreme troppo elevate possono causare fenomeni di deformazione dei binari per eccessivo calore e possibili malfunzionamenti degli apparecchi di segnalazione e telecomunicazione, con il risultato di richiedere la riduzione della velocità d'esercizio e/o di causare maggiori interruzioni del servizio.

I danni causati dalle ondate di freddo e, in particolare i cicli di gelo-disgelo, seppur in grado di indurre danni rilevanti, appaiono in chiara diminuzione all'aumentare delle temperature a scala locale.



Detriti su una strada a causa del maltempo (foto: Dipartimento Protezione Civile, foreste e fauna PAT).

A seguito di lunghi periodi di siccità possono aumentare i fenomeni di subsidenza del terreno, provocando la degradazione e la deformazione delle sedi stradali. Questo può avvenire, d'altro canto, anche a causa di effetti di degradazione del permafrost nelle aree d'alta quota.

Il possibile aumento degli incendi, a causa di temperature elevate e condizioni secche persistenti, può causare l'interruzione e il danneggiamento strutturale di strade, ferrovie e ciclovie, oltre a indurre danni e guasti ai sistemi di controllo e monitoraggio del traffico e alla segnaletica stradale.

Impatti sul trasporto pubblico locale

Eventi estremi più frequenti e intensi, assieme ai pericoli naturali associati, quali inondazioni, allagamenti in ambito urbano, frane e colate detritiche, incendi o tempeste di vento, possono danneggiare in maniera significativa infrastrutture, veicoli, attrezzature e sedi di deposito dei mezzi del trasporto pubblico locale, con l'effetto di determinare l'interruzione del servizio e ulteriori ritardi e disservizi a catena, con un aggravio di costi e di fabbisogno in termini di risorse umane, anche per i servizi sostitutivi.

Il verificarsi di temperature estreme molto elevate, ad esempio durante fenomeni come ondate di calore

estive, potrebbe diminuire sensibilmente il comfort dei passeggeri del trasporto pubblico locale sia durante la fase di attesa presso le fermate, specialmente se prive di protezioni dall'irraggiamento (ad esempio pensiline ombreggianti), che a bordo dei mezzi di trasporto stessi, in particolare in assenza di adeguati impianti di condizionamento di bordo. Queste circostanze negative, specialmente in orari e situazioni di alta affluenza, potrebbero portare gli utenti a preferire l'utilizzo dell'auto privata rispetto ai mezzi di trasporto pubblico.



Danni causati da evento di frana sulla SS350 di Folgaria e Valdastico (foto: Servizio Gestione strade PAT).

Impatti sulla mobilità ciclabile

Eventi estremi più frequenti e intensi possono determinare un'intensificarsi degli episodi di interruzione della fruibilità delle ciclovie, incidendo in modo negativo sui costi di ripristino. In Trentino, in particolare, numerose piste ciclabili a lunga percorrenza seguono il corso dei fiumi e dei torrenti e sorgono nelle immediate vicinanze delle loro rive. Questo le espone a rischi maggiori in termini di possibili allagamenti.

Al contrario, la diminuzione delle condizioni di freddo, neve e gelo costituisce un'opportunità di utilizzo più frequente e più sicuro per gli utenti delle ciclovie urbane e non, contribuendo a incentivare sempre più l'uso del mezzo ciclabile in una logica di transizione verso mezzi di trasporto maggiormente sostenibili anche sulle brevi percorrenze.

Impatti sulla navigazione lacustre

Condizioni di siccità più frequenti e prolungate possono risultare in minori livelli idrometrici per i maggiori laghi pre-alpini, come già verificatosi nell'estate 2022 per il Lago di Garda. Fenomeni analoghi più frequenti in futuro potranno indurre maggiori criticità per la funzionalità e la regolarità dei servizi di navigazione di linea sul Lago di Garda, in particolare per quanto ri-

guarda l'accesso ad alcuni porti turistici, proprio nella stagione nella quale i flussi turistici nell'area sono al picco.

Inoltre, anche tempeste di vento e temporali intensi più violenti potrebbero causare maggiori rischi in termini di sicurezza per la navigazione, sia di linea che turistica, anche per i laghi minori.

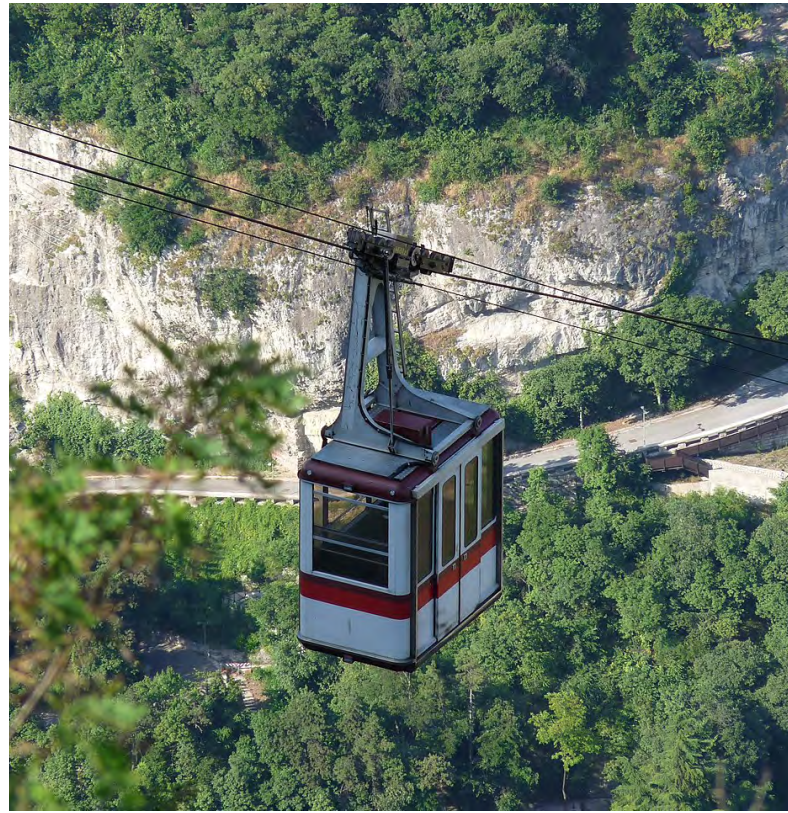


Navigazione di linea sul lago di Garda (foto: Garda Dolomiti Azienda per il Turismo S.p.A.).

Impatti sugli impianti a fune

Maggiori eventi estremi, sia in termini di precipitazioni intense che di siccità prolungata, che si sommano ad una maggior erosione dei suoli e a fenomeni di degrado e fusione del permafrost in aumento in quota, potrebbero causare più frequenti condizioni di danneggiamento e interruzione per quanto concerne gli impianti a fune in Trentino. Gli effetti potrebbero interessare la mobilità dei turisti e quindi l'indotto economico del settore, in particolare in quelle aree dove gli impianti di risalita costituiscono una componente importante dell'attrattività dei luoghi.

Funivia di Sardagna (foto: Matteo Ianeselli, Wikimedia Commons).





Patrimonio culturale

I cambiamenti climatici potrebbero avere impatti più significativi in futuro anche sul patrimonio culturale, incidendo sia su beni ed edifici che su tradizioni, conoscenze e pratiche culturali delle comunità.

Il Patrimonio culturale, nella sua complessa articolazione in beni immobili e mobili e in attività con implicazioni di natura materiale e immateriale, insieme ai beni naturalistici, costituisce il tessuto connettivo, sul piano valoriale e della vita civile, degli elementi in grado di alimentare conoscenze, consapevolezza storiche, capacità critiche, creatività, virtù civiche, senso di appartenenza, coesione sociale e sentimenti identitari.

La conservazione e la fruizione dell'eredità e delle produzioni culturali tradizionali e creative alimenta pertanto conoscenza, sensibilità e partecipazione, risorse strategiche per lo sviluppo sostenibile, per la crescita della coesione sociale e della qualità della vita.

I beni culturali e paesaggistici, con le loro caratteristiche di unicità e di irripetibilità, si configurano anche come elementi di forte qualificazione turistica.

È per questo che in Trentino, la loro conservazione e fruizione assume inoltre un'importanza strategica in quanto segni tangibili di una storia sulla quale si fondano le ragioni stesse della nostra autonomia speciale, e pertanto l'Amministrazione provinciale è anche

per questo motivo chiamata alla responsabilità di intervenire a protezione del patrimonio, della sua conoscenza e pubblico godimento.

I cambiamenti climatici possono avere, e talvolta hanno già dimostrato di avere, impatti negativi sul paesaggio culturale, con effetti gradualmente oppure improvvisi. Basti soltanto pensare al riaffiorare delle tracce della Grande Guerra sull'Adamello e sulla Presanella, con la fusione accelerata dei ghiacciai e ai sempre più frequenti episodi di danneggiamento subito da luoghi della cultura a seguito di eventi estremi.

La valutazione dettagliata degli effetti dei cambiamenti climatici in Trentino sul patrimonio culturale provinciale, sia materiale che immateriale, tuttavia è in fase di studio e attualmente è possibile identificare solo alcuni potenziali impatti che potranno avere un ruolo significativo in futuro. Un obiettivo già individuato è la predisposizione di un primo Piano di intervento a protezioni dei beni più a rischio.

Impatti sul patrimonio culturale in ambienti esterni

Il degrado del patrimonio culturale esposto all'ambiente esterno è strettamente determinato dalle alterazioni di temperatura, precipitazione, umidità e vento, con danni potenzialmente maggiori che potrebbero derivare in particolare dagli eventi meteorologici estremi più intensi e frequenti attesi in futuro.

Eventi di precipitazione intensa più frequenti e intensi potrebbero causare maggior saturazione del terreno, sovraccaricare grondaie e pluviali, dare origine a inondazioni e allagamenti, aumentando di conseguenza l'umidità che favorisce un più rapido degrado fisico, chimico e biologico dei materiali storici, inclusi gli edifici in muratura. Inoltre, la condensazione e l'azione dell'umidità favoriscono anche i processi di corrosione, l'attività biologica e i fenomeni di efflorescenza e subflorescenza, ossia di cristallizzazione di sali sulla superficie o all'interno dei materiali (fenomeni di degrado tipici delle murature). Le precipitazioni estreme previste in aumento potrebbero incrementare il rischio di erosione dei suoli, frane e crollo di massi, che potrebbero interessare anche edifici che fanno parte o custodiscono elementi del patrimonio culturale e aree archeologiche.

Il Parco delle Terme di Levico colpito dalla tempesta Vaia
(foto: F. Fronza, Archivio SOVA).





I danni provocati dalla tempesta Vaia nel 2018 all'opera "Dentro Fuori" di Michele Lucchi nel parco di Arte Sella (foto: Giacomo Bianchi).

Tempeste di vento più violente e frequenti che in passato potrebbero provocare danni anche gravi a edifici storici e siti archeologici, mettendo a rischio la loro integrità e stabilità e causando scoperchiamenti o crolli. Il vento può, inoltre, trasportare sostanze dannose come inquinanti, sali e sabbia, che possono contribuire all'usura e al deterioramento di costruzioni e reperti archeologici.

Situazioni più frequenti e severe di siccità e temperature estreme potrebbero innescare incendi più frequenti, portando alla perdita e alla deformazione di elementi materiali e beni culturali, oltre a provocare degrado dei materiali lapidei e problemi strutturali ad edifici e strutture.

I cicli di gelo e disgelo rappresentano normalmente una minaccia significativa per molti elementi del patrimonio culturale materiale, dal momento che l'espansione ciclica dell'acqua nei materiali porosi a causa del congelamento e dello scongelamento può causare danni strutturali sul lungo periodo. Le tendenze verso un aumento generale delle temperature ridurranno in futuro il numero di tali cicli anche in Trentino, mitigando di conseguenza i danni associati.

Il rischio di danni causati da fenomeni di termoclastismo, ossia il danno derivante dall'alternarsi di espansione e contrazione dei grani minerali a causa di intense variazioni termiche, potrebbe invece aumentare, causando maggiori fenomeni di microfessurazione ed erosione delle superfici dei materiali.

Impatti sul patrimonio culturale negli ambienti interni

Le variazioni climatiche esterne possono determinare di conseguenza cambiamenti nelle condizioni termo-igrometriche all'interno di edifici storici o edifici che ospitano collezioni, come i musei. L'alterazione delle condizioni microclimatiche può danneggiare, accelerando il decadimento meccanico, chimico e biologico, gli interni, gli oggetti e le collezioni, specialmente negli edifici che non sono dotati di adeguati sistemi di controllo e condizionamento climatico interno.



Big void, MUSE - Museo delle Scienze (foto: Archivio MUSE).

Impatti sul paesaggio

La riduzione e, in casi estremi, la scomparsa dei ghiacciai sta già modificando i paesaggi di alta montagna, mentre le alterazioni climatiche ai danni degli ecosistemi naturali e antropici stanno avendo influenza sui paesaggi agricoli e pastorali. In entrambi i casi il significato storico e culturale di queste zone ne risulta a sua volta alterato e danneggiato. Inoltre, la fusione e il degrado del permafrost mettono a rischio la stabilità strutturale delle costruzioni e la fruizione di elementi culturali d'alta quota, inclusi rifugi di montagna, siti e costruzioni militari storiche, percorsi e sentieri storici o caratteristici.

D'altro canto, il progressivo ritiro dei ghiacciai contribuisce a far emergere sempre più reperti archeologici legati alla Prima Guerra Mondiale, che arricchiscono il patrimonio archeologico provinciale e devono essere adeguatamente conservati e gestiti.



Filo spinato di utilizzo militare ritrovato sul ghiacciaio del Lares (foto: M. Lencioni, Archivio MUSE).

Impatti sulle tradizioni culturali

I cambiamenti climatici potranno avere effetti sulle tradizioni, le pratiche, le espressioni, le conoscenze e le abilità che le comunità considerano parte del loro patrimonio culturale immateriale. Ad esempio, gli impatti negativi su alcune specie endemiche e/o caratteristiche di flora e fauna, che costituiscono parte integrante dell'identità culturale locale, possono influire su pratiche tradizionali identitarie, come l'agricoltura, l'allevamento a pascolo e la conduzione delle malghe, la pastorizia e la produzione di prodotti locali tradizionali e caratterizzanti. Questa perdita di conoscenze e pratiche culturali, che

spesso comporta anche l'interruzione della trasmissione intergenerazionale, potrà avere in futuro effetti profondi, anche se meno evidenti di altri, sul patrimonio culturale immateriale delle comunità trentine, in particolare di quelle che popolano le aree più rurali e interne.



Pecore e pastori in val di Fiemme, ottobre 2016 (foto: Romano Magrone, Trentino Sviluppo S.p.A.).



Coesione sociale, benessere e sicurezza delle comunità

Gli impatti dei cambiamenti climatici possono favorire o esacerbare disparità sociali ed economiche, con conseguenze negative sulla coesione sociale delle comunità locali.

Gli effetti negativi derivanti dagli impatti climatici possono inasprire disuguaglianze sociali ed economiche nuove o preesistenti, creando disparità in termini di condizioni di benessere e accesso alle risorse, al lavoro e, più in generale, alla prospettiva di una vita dignitosa e sicura. Per gli impatti dei cambiamenti climatici a lenta insorgenza, quali l'aumento progressivo della temperatura e l'aumento dei conflitti d'uso delle risorse idriche disponibili, è possibile valutare in anticipo le ricadute socio-economiche sulle fasce di popolazione più vulnerabili e sulla coesione e la sicurezza delle comunità locali. Al contrario, gli eventi climatici estremi e i pericoli naturali associati, quali ondate di calore, tempeste, alluvioni e frane, possono causare in maniera repentina danni ingenti alle abitazioni e ai beni privati, così come alle realtà produttive in diversi settori, con conseguenze negative significative ma poco prevedibili sulla rete sociale e l'economia delle comunità direttamente e indirettamente colpite.

Non sono ancora presenti studi specifici su questi aspetti per il Trentino, tuttavia è opportuno riportare i potenziali impatti elencati nel Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (2023) che in futuro potrebbero assumere maggiore rilevanza anche nel contesto provinciale.

Tra le conseguenze di carattere socio-economico che in futuro potrebbero diventare più significative anche in Trentino figurano gli impatti negativi su alcuni settori economici che sostengono in maniera quasi esclusiva l'economia e il benessere di comunità e

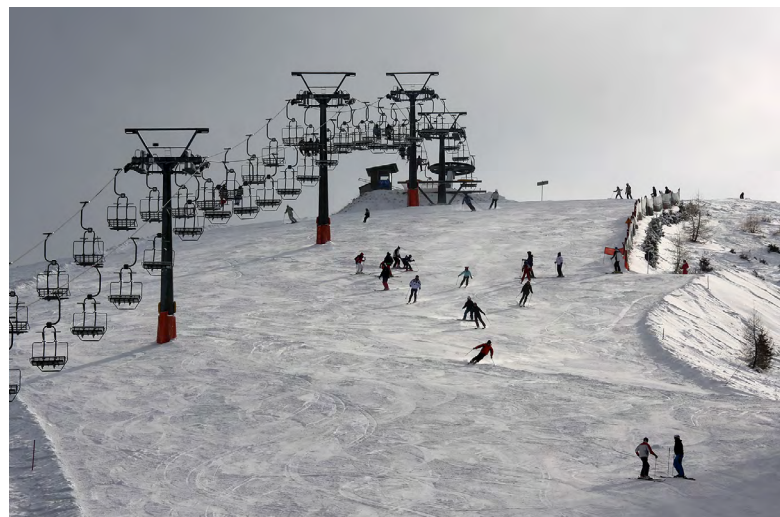
territori, che proprio per questo appaiono più vulnerabili. Ad esempio, gli impatti negativi sui settori del turismo invernale legato allo sci o sul settore agricolo per alcune produzioni caratterizzanti, come le mele o il vino, potrebbero mettere in difficoltà sia l'occupazione e il reddito per l'intera filiera interessata che per l'indotto collegato a livello locale, in particolare in alcune valli che hanno un'economia meno differenziata e varia.

A livello di singolo individuo, invece, i maggiori impatti negativi interesseranno le fasce più vulnerabili della popolazione, dotate di meno risorse, non solo finanziarie, tra le quali i gruppi che rischiano maggiormente di perdere lavoro e reddito. Inoltre, in una prospettiva generazionale, i giovani sono il gruppo più vulnerabile in quanto la loro possibilità futura di una vita dignitosa e di un buon livello di benessere e sicurezza rischia di essere maggiormente compromessa rispetto a quella delle generazioni precedenti.

L'inasprirsi della crisi climatica e l'insufficienza delle azioni di contrasto ai cambiamenti climatici poste in essere anche a livello internazionale stanno generando negli anni più recenti una crescente reazione da parte dei cittadini e dell'opinione pubblica, che alimenta movimenti ambientali e sociali e ha conferito una particolare vitalità soprattutto all'attivismo giovanile. L'aumento della severità degli impatti climatici, così come l'impatto socio-economico dell'implementazione delle stesse politiche di mitigazione e adattamento, potrebbero contribuire in futuro a creare maggiori tensioni e conflitti sociali su tali tematiche.

Impatti su lavoro e occupazione

Come anticipato, il cambiamento climatico potrebbe causare impatti significativi nelle comunità montane, specialmente di quelle la cui economia dipende in maniera prevalente da un solo settore. L'esempio più immediato è quello delle comunità nelle quali l'occupazione e il benessere sono legate strettamente al turismo sciistico invernale, che sostiene anche un indotto più ampio. Solo affrontando le sfide dell'innovazione tecnologica e degli investimenti in termini di innevamento artificiale e efficientamento energetico (vedi capitolo TURISMO) si potrà scongiurare un calo o un arresto di questo settore, eventualità che porterebbe a perdite in termini di reddito e posti di lavoro sia nell'indotto diretto che indiretto.



Pista da sci a Folgarida (foto: Roberto Ferrari, Flickr)

La maggior frequenza e severità di situazioni di siccità, che potrebbe incrementare in futuro i conflitti legati all'uso delle risorse idriche tra settori produttivi concorrenti, come agricoltura, industria, idroelettrico e turismo, potrà contribuire ad aumentare il rischio di occupazione meno stabile e minor coesione sociale nelle

comunità locali, ma anche innescare dinamiche sociali conflittuali, sia a livello politico che con la popolazione delle regioni confinanti con le quali il Trentino condivide le maggiori riserve d'acqua di fiumi e laghi (vedi capitolo GESTIONE DELLE RISORSE IDRICHE).

Impatti sulle disuguaglianze socio-economiche

Gli impatti socio-economici derivanti dall'attuazione di politiche di mitigazione e di cosiddetta "transizione ecologica", se non accompagnate dall'adozione di necessari e adeguati strumenti di supporto ed, eventualmente, compensazione, potranno aumentare in futuro le disuguaglianze sociali ed economiche, colpendo in misura maggiore le fasce di popolazione più vulnerabili ed emarginate. Alcuni gruppi a basso reddito, con meno sostegni finanziari e risorse socio-culturali, potrebbero avere maggiori difficoltà ad affrontare un necessario cambio di occupazione e ad acquisire nuove qualifiche professionali. Anche l'aumento del costo della vita, ad esempio nel caso di acquisto di un veicolo elettrico, di pannelli fotovoltaici o di elettrodomestici a minor consumo e più alta efficienza, potrebbe aggravare ulteriormente disparità sociali preesistenti o indurne di nuove.

Le categorie più colpite dalle conseguenze socio-economiche dei cambiamenti climatici potranno includere anche le donne, principalmente a causa delle differenze salariali ancora oggi esistenti tra generi, gli individui con disabilità, gli anziani e i giovani, questi ultimi costretti ad affrontare un futuro più incerto e meno prospero che in passato a causa degli impatti dei cambiamenti climatici pur senza averne responsabilità rispetto alle generazioni precedenti.

Inoltre, i rischi dei cambiamenti climatici per il settore della salute potranno contribuire a sovraccaricare i sistemi locali di assistenza sanitaria, sociale e socio-sanitaria, inasprendo le disuguaglianze future nell'accesso e nella fruizione dei relativi servizi (vedi capitolo SALUTE).

Lo stato del clima in Trentino

Impatti dei cambiamenti climatici sui sistemi ambientali e sui settori socio-economici



PROVINCIA AUTONOMA DI TRENTO

