

Anno idrologico 2023-2024

## **Report meteo-climatico per l'ambiente glaciale e periglaciale alpino**

*Le temperature aumentano, così come le giornate calde. Le precipitazioni cambiano, aumenta la frequenza e la magnitudo degli eventi pluviometrici in alta montagna. Di neve ne cade, ma spesso in ritardo.*



Anno idrologico 2023-2024

## **Report meteo-climatico per l'ambiente glaciale e periglaciale alpino**

Guido Nigrelli

### **Introduzione**

Gli ambienti alpini ed in particolare quelli glaciali e periglaciali, stanno rispondendo rapidamente e in maniera chiara all'aumento delle temperature, nel contesto di un cambiamento climatico globale, rapido e pericoloso, che si manifesta oramai da alcuni decenni ([WMO, 2024](#)).

Fra gli effetti più evidenti e preoccupanti di questo cambiamento, che interessano l'alta montagna, vi è la drastica riduzione delle masse glaciali. Questo fenomeno si manifesta a livello globale, procedendo con tassi di fusione che per l'anno 2023 hanno raggiunto valori record e che per il 2024 sono destinati ad aumentare ([ICCI, 2024](#)). Ad esempio, sull'arco alpino italiano, i dati della campagna glaciologica 2023 ci restituiscono una situazione che rispecchia quella a livello globale: i 114 ghiacciai misurati sono tutti in netto ritiro ([Chiarle et al. 2024](#)). Dati significativamente negativi si registrano anche per quanto riguarda i bilanci di massa ([Carturan 2023](#)). Un secondo e altrettanto preoccupante effetto in alta montagna di questi cambiamenti, anche se meno evidente del precedente, è lo spostamento verso l'alto di molte specie floristiche e faunistiche. Ad esempio, recenti studi hanno dimostrato che sulle Alpi è in corso uno spostamento verso l'alto della linea degli alberi di circa 1,3 m/anno ([Hansson et al. 2021](#); [Schickhoff et al. 2022](#)).

Nell'ottica di osservare e documentare con sempre maggior accuratezza le trasformazioni che avvengono negli ambienti glaciali e periglaciali delle nostre Alpi, nel contesto degli attuali cambiamenti climatici, è importante conoscere l'andamento nel tempo e l'evoluzione negli anni del clima attraverso lo studio dei suoi principali elementi. Per applicare questi studi a questi ambienti è necessario fare riferimento all'anno idrologico che va da ottobre a settembre, poiché risulta indispensabile poter considerare per intero il periodo in cui cadono le precipitazioni nevose e in cui le temperature assumono i valori più bassi.

### **Dati e metodi**

Al fine di descrivere l'andamento meteorologico che ha interessato gli ambienti glaciali e periglaciali dell'arco alpino italiano durante l'anno idrologico 2023-2024, sono state prese in considerazione dieci stazioni meteorologiche ritenute rappresentative per posizione geografica, contesto ambientale, quota e qualità dei dati raccolti, facenti parte delle reti di monitoraggio regionali e provinciali (Tabella 1 e Figura 1). Per queste stazioni si sono acquisite le serie di dati orari di temperatura dell'aria, di

precipitazione e di altezza di neve al suolo. Sulle serie di dati orari così acquisite si è applicato un controllo di qualità secondo metodiche standardizzate (WMO 2018) e, da queste serie, si sono ricavate le serie giornaliere di temperatura media (TM), minima (TN) e massima (TX), di precipitazioni totali (P) e di massima altezza di neve al suolo (S). Dalle serie giornaliere sono stati successivamente calcolati i valori medi mensili (i mesi con meno dell'80 % di dati sono stati considerati mancanti) di TM, TN, TX e S ed i totali di P. Unitamente a questi parametri sono stati calcolati anche i valori mensili degli estremi di temperatura minima (TNn) e massima (TXx); i gradi-giorno (DD), calcolati mediante sommatoria degli scarti dei valori positivi giornalieri secondo la formula  $DD = \sum(TX-T)$ , quando  $TX > 0$  °C e con  $T = 0$  °C; il numero di giorni di gelo (ID), cioè quando  $TX \leq 0$  °C; il numero di giorni con gelo (FD), cioè quando  $TN \leq 0$  °C; il numero di giorni senza gelo (FF), cioè quando  $TN > 0$  °C; le precipitazioni totali (P) ed il numero di giorni piovosi (PD, quando  $P > 1$  mm); l'altezza di neve al suolo (S) ed il relativo equivalente in acqua (calcolato facendo riferimento alla relazione generale dove 10 cm di neve fresca corrispondono a 10 mm di acqua); il numero di giorni con neve al suolo (SD, quando  $S > 5$  cm). Dalle serie mensili si sono infine ricavate le serie annuali per gli stessi parametri.

Per quanto riguarda la qualità e la disponibilità dei dati, la situazione non presenta particolari problematiche per le serie di temperatura, mentre lo stesso non si è riscontrato per le serie di precipitazioni (pioggia e neve fusa) e di neve al suolo. Sulle serie giornaliere, dove possibile, alcuni dati mancanti sono stati aggiunti, come media del dato precedente e del dato successivo. In presenza di lacune di più di sei giorni consecutivi, i calcoli e i confronti sulle aggregazioni temporali mensili ed annuali non sono stati effettuati.

Le stazioni meteorologiche presenti sull'arco alpino, soprattutto quelle ubicate in ambiente glaciale e periglaciale come quelle qui utilizzate, spesso sono dotate di pluviometri non riscaldati: questa caratteristica non consente una immediata fusione della neve che si deposita al loro interno, causando una perdita di informazione in termini di quantità di acqua equivalente correttamente misurata nel tempo. Per quanto riguarda la misura dell'altezza di neve al suolo, attualmente eseguita con metodi indiretti utilizzando sensori ad ultrasuoni, è possibile riscontrare valori minori rispetto alle quantità reali perché la neve, una volta depositatasi al suolo, può venire sollevata ed essere trasportata via dal vento e questo capita sovente. Anomalie positive di altezze di neve al suolo possono verificarsi in estate-autunno, a causa della crescita della vegetazione erbacea sotto il sensore. Al fine di limitare il più possibile l'influenza di queste anomalie sui risultati finali, l'innevamento è stato calcolato considerando il periodo novembre-giugno.

Infine, un contributo è stato fornito anche in termini di tendenze climatiche, analizzate secondo due modalità: 1) calcolando le differenze tra i valori annuali dell'anno idrologico analizzato e gli stessi

parametri del quinquennio precedente (2019-2020); 2) confrontando le temperature medie giornaliere dell'anno 2024 con quelle riferite al periodo climatologico normale 1991-2020, in questo caso riferite all'intero arco alpino.

Tabella 1 – Stazioni meteorologiche considerate e loro principali caratteristiche. La latitudine e la longitudine sono espresse in gradi decimali, la quota in metri. Per l'individuazione del settore alpino si è fatto riferimento alla Partizione della Alpi del 1926 a cura del Comitato Geografico Nazionale. I parametri acquisiti sono la temperatura dell'aria (T), le precipitazioni (P) e la neve al suolo (S).

N	Stazione	Lat. °N	Long. °E	Quota	Settore alpino	Parametro
1	Colle Lombarda	44.207400	7.147687	2305	Alpi Occidentali	T, P, S
2	Colle Barant	44.774372	7.060617	2294	Alpi Occidentali	T, P, S
3	Rifugio Gastaldi	45.298053	7.142719	2659	Alpi Occidentali	T, P, S
4	La Thuile La Grande Tête	45.683370	6.915950	2430	Alpi Occidentali	T, S
5	Bocchetta delle Pisse	45.875659	7.900708	2410	Alpi Centrali	T, P, S
6	Formazza Pian dei Camosci	46.433399	8.358220	2453	Alpi Centrali	T, P, S
7	Madesimo Spluga	46.471776	9.348033	1915	Alpi Centrali	T, P
8	Pantano d'Avio	46.176910	10.472854	2108	Alpi Centrali	T, P, S
9	Passo Rolle	46.297961	11.786886	2012	Alpi Orientali	T, P
10	Predoi Malga Merbe	47.036132	12.122193	2006	Alpi Orientali	T, N



Figura 1 – Distribuzione geografica delle dieci stazioni meteorologiche considerate. 1, Colle Lombarda; 2, Colle Barant; 3, Rifugio Gastaldi; 4, La Thuile La Grande Tête; 5, Bocchetta delle Pisse; 6, Formazza Pian dei Camosci, 7, Madesimo Spluga; 8, Pantano d'Avio; 9, Passo Rolle; 10, Predoi Malga Merbe. Per l'individuazione del settore alpino si è fatto riferimento alla Partizione della Alpi del 1926 a cura del Comitato Geografico Nazionale.



Figura 2 – In primo piano, un esempio di stazione meteorologica utilizzata nel presente studio: la stazione meteorologica automatica di Bocchetta delle Pisse (ARPA Piemonte) e, sullo sfondo, il versante sud-est del Monte Rosa con il ghiacciaio delle Piode (foto 28/08/2018).

## Temperatura

### Regime termico mensile ed annuale

Il quadro generale del regime termico mensile ed annuale per l'anno idrologico 2023-2024 riferito alle dieci stazioni considerate è riportato in Tabella 2.

Tabella 2 – Anno idrologico 2023-2024: valori medi mensili ed annuali delle temperature (°C) medie (TM), minime (TN) e massime (TX) e differenze ( $\Delta$ ) tra i valori medi annuali dell'anno idrologico 2023-2024 con quelli del quinquennio precedente (2019-2020). In grassetto i minimi e massimi mensili; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

Staz.	T	O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	Anno	$\Delta$
1	TM	7,6	1,0	1,1	-0,5	0,8	-0,9	0,6	3,5	8,9	13,6	14,0	6,2	4,7	0,4
	TN	4,8	-2,0	-1,4	-3,0	-1,7	-3,5	-2,3	0,7	5,9	10,2	10,7	3,5	1,8	0,3
	TX	10,3	4,0	3,7	1,9	3,4	1,7	3,6	6,3	11,8	17,0	17,4	8,9	7,5	0,4
2	TM	6,9	-0,4	0,3	-1,2	0,4	-1,6	0,2	3,1	8,2	12,7	13,2	5,7	3,9	0,3
	TN	3,9	-3,3	-2,3	-3,8	-2,4	-4,2	-2,6	0,6	5,5	9,7	10,7	3,1	1,3	0,0
	TX	9,9	2,4	2,9	1,3	3,1	1,0	3,1	5,5	10,8	15,7	15,6	8,3	6,6	0,6
3	TM	4,6	-3,0	-1,6	-2,1	-0,4	-2,2	-0,6	3,3	7,2	9,9	10,5	3,4	2,4	0,8
	TN	2,1	-5,8	-4,4	-4,9	-2,8	-5,0	-3,5	0,1	4,6	7,4	8,2	1,1	-0,2	0,9
	TX	7,1	-0,3	1,2	0,6	1,9	0,5	2,3	6,4	9,8	12,4	12,8	5,6	5,0	0,8
4	TM	4,9	-3,6	-2,6	-3,5	-2,2	-3,6	-1,2	1,6	6,2	10,8	12,0	4,0	1,9	0,5
	TN	2,6	-6,1	-4,9	-5,8	-3,9	-5,4	-3,3	-0,3	4,0	8,0	9,3	2,1	-0,3	0,7
	TX	7,1	-1,0	-0,3	-1,1	-0,5	-1,7	0,9	3,5	8,5	13,6	14,6	5,9	4,1	0,3
5	TM	5,3	-2,2	-2,5	-2,3	-1,1	-2,3	-0,2	2,7	7,0	10,5	11,7	4,8	2,6	0,4
	TN	3,3	-5,3	-4,9	-4,9	-3,1	-5,0	-3,0	0,0	4,7	8,5	9,9	2,9	0,3	0,4
	TX	7,4	0,8	0,0	0,3	0,9	0,4	2,5	5,4	9,4	12,5	13,5	6,7	5,0	0,4
6	TM	4,2	-4,6	-4,0	-4,9	-3,3	-4,4	-2,8	1,2	5,4	9,3	10,8	3,5	0,9	0,1
	TN	1,7	-7,8	-7,1	<b>-8,3</b>	-6,2	-7,4	-5,9	-1,8	2,7	6,3	7,7	1,4	-2,1	0,1
	TX	6,7	-1,4	-0,9	-1,5	-0,5	-1,5	0,3	4,1	8,1	12,3	14,0	5,6	3,8	0,1
7	TM	7,5	-0,9	-0,9	-2,1	0,3	-0,4	1,7	5,2	10,0	13,9	15,1	7,3	4,7	nd
	TN	5,0	-3,3	-3,3	-4,7	-1,7	-2,5	-1,0	2,6	7,0	11,0	12,0	5,0	2,2	nd
	TX	10,0	1,5	1,5	0,5	2,3	1,8	4,4	7,8	12,9	16,8	18,3	9,5	7,3	nd
8	TM	7,3	-1,2	0,3	-0,6	2,2	1,0	3,0	5,8	9,9	13,4	14,6	7,4	5,3	0,9
	TN	4,3	-4,5	-3,0	-4,8	-2,1	-3,3	-1,6	1,7	6,0	9,8	11,0	4,6	1,5	0,8
	TX	10,3	2,1	3,7	3,5	6,6	5,2	7,6	9,9	13,8	17,0	18,2	10,2	9,0	1,0
9	TM	7,3	-1,3	-0,9	-2,4	-0,4	-0,8	2,2	4,6	10,1	13,3	14,5	6,8	4,4	0,7
	TN	3,4	-6,0	-5,8	-6,8	-3,8	-4,6	-2,6	1,4	5,5	9,3	10,6	3,2	0,3	1,0
	TX	11,8	3,7	3,9	3,2	4,2	4,4	8,3	10,0	15,7	19,0	<b>19,5</b>	11,5	9,6	0,3
10	TM	6,8	-2,5	-1,9	-3,7	-0,4	-0,4	2,0	5,3	10,1	13,3	14,5	6,5	4,1	nd
	TN	3,6	-5,2	-4,2	-6,6	-2,7	-3,3	-1,3	2,2	6,5	8,7	10,1	3,7	1,0	nd
	TX	9,9	0,1	0,4	-0,9	2,0	2,5	5,4	8,5	13,7	17,8	19,0	9,3	7,3	nd

Il valore mensile più elevato si osserva alla stazione di Passo Rolle, in agosto (TX 19,5 °C), mentre l'opposto alla stazione di Formazza, in gennaio (TN -8,3 °C). Le medie annuali della temperatura media, minima e massima sono rispettivamente 3,5 °C, 0,6 °C e 6,5 °C. Il confronto con il quinquennio precedente, effettuato sulle medie annuali, mette in evidenza un significativo aumento

di tutti e tre i parametri analizzati. Gli incrementi maggiori si sono osservati a Pantano d'Avio per le temperature medie e massime, rispettivamente con  $\Delta +0,9$  °C e  $\Delta +1,0$  °C, mentre l'aumento maggiore delle temperature minime si è osservato alla stazione Rifugio Gastaldi, con  $\Delta +0,9$  °C. Gli incrementi minori si sono osservati a Formazza, dove tutti e tre i parametri analizzati hanno fatto registrare  $\Delta +0,1$  °C. Da questo confronto emerge una media generale di  $\Delta +0,5$  °C. Da tenere presente il mancato confronto per le stazioni di Madesimo Spluga e Predoi Malga Merbe causa assenza di dati. L'andamento mensile delle temperature medie, minime e massime, come media dei dati delle 10 stazioni è riportato in Figura 3. L'andamento unimodale della temperatura, tipico per i nostri climi, si manifesta per l'anno idrologico 2023-2024 con una serie di mesi freddi relativamente omogenea, che va da novembre a marzo e, per quanto riguarda le temperature medie, tutte sotto lo zero. Prossime allo zero, ma positive, le temperature massime dello stesso periodo. Per quanto riguarda le temperature minime, valori negativi sono presenti durante il periodo novembre-aprile, con gennaio che presenta il dato più basso (TN  $-5,4$  °C). Agosto risulta essere il mese più caldo (TM  $13,1$  °C, TN  $10,0$  °C, TX  $16,3$  °C), seguito a breve distanza da luglio (TM  $12,1$  °C, TN  $8,9$  °C, TX  $15,4$  °C).

### *Estremi termici*

Il quadro generale degli estremi termici su base mensile registrati durante l'anno idrologico 2023-2024 è riportato in Tabella 3. L'estremo termico più elevato in assoluto si osserva alla stazione di Predoi Malga Merbe, l'11 agosto (TXx  $24,4$  °C), mentre l'opposto alla stazione di Formazza, il 20 gennaio (TNn  $-19,0$  °C). Il confronto con il quinquennio precedente, effettuato sulla media dei valori estremi annuali, mette in evidenza anche qui un significativo aumento per entrambi i parametri analizzati. Gli incrementi maggiori si sono osservati alla stazione Rifugio Gastaldi ( $\Delta$  TNn  $+1,4$  °C e  $\Delta$  TXx  $+2,5$  °C), mentre le variazioni minori, comunque sempre positive, si sono osservate alla stazione di Formazza ( $\Delta$  TNn  $+0,2$  °C) e a Colle Barant ( $\Delta$  TXx  $+1,1$  °C). Da questo confronto emerge che la media degli estremi termici delle temperature massime ( $\Delta$  TXx  $+1,7$  °C) aumenta di oltre il doppio della media degli estremi termici delle temperature minime ( $\Delta$  TNn  $+0,8$  °C). L'andamento mensile degli estremi termici, come media sulle 10 stazioni è riportato in Figura 3. Come è logico aspettarsi, anche qui i valori estremi seguono un andamento unimodale tipico per i nostri climi. Per l'anno idrologico 2023-2024, gennaio presenta il più basso valore estremo di temperatura minima (TNn  $-14,4$  °C), mentre luglio fa registrare il più elevato (TXx  $21,1$  °C). In questo grafico è interessante osservare come, da novembre a marzo, la media mensile degli estremi termici massimi (TXx) si mantenga relativamente stabile attorno al valore di circa  $9$  °C.

Tabella 3 – Anno idrologico 2023-2024: valori estremi delle temperature (°C) minime (TNn) e massime (TXx) mensili e differenze ( $\Delta$ ) tra la media annuale degli estremi per l'anno idrologico 2023-2024 con la media annuale del quinquennio precedente (2019-2020). In grassetto i minimi e massimi valori mensili; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

St		O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	$\Delta$
1	TNn	-2,1	-9,0	-11,4	-12,2	-8,5	-8,6	-8,7	-3,5	1,6	6,4	7,3	-1,9	0,7
	TXx	17,5	10,8	11,1	12,0	12,9	9,1	12,9	11,4	19,9	21,9	21,1	15,1	1,5
2	TNn	-2,3	-9,1	-11,2	-12,2	-9,1	-8,7	-9,2	-3,6	1,3	4,7	8,1	-3,0	0,4
	TXx	17,9	9,4	9,7	9,0	10,9	8,0	13,7	10,2	19,3	21,7	21,1	14,5	1,1
3	TNn	-3,8	-13,4	-13,6	-14,3	-10,7	-10,4	-11,2	-3,6	0,1	4,1	5,8	-5,4	1,4
	TXx	15,0	8,4	7,0	10,9	7,9	10,8	13,3	12,5	16,2	17,8	16,5	11,8	2,5
4	TNn	-3,6	-12,5	-14,0	-14,8	-9,7	-9,9	-11,5	-4,6	-1,4	1,2	5,3	-5,2	0,6
	TXx	16,4	7,7	6,4	7,8	6,9	6,6	11,5	7,7	15,7	19,5	19,3	13,4	1,8
5	TNn	-2,7	-10,9	-12,9	-13,0	-11,2	-9,2	-10,8	-3,3	0,3	3,7	7,6	-2,5	0,9
	TXx	15,9	9,9	8,2	8,5	8,5	8,3	14,4	11,4	14,9	18,7	16,5	12,4	1,6
6	TNn	-4,7	-15,4	-16,5	<b>-19,0</b>	-13,5	-17,5	-13,0	-5,4	-1,0	1,1	5,6	-5,8	0,2
	TXx	15,1	8,2	6,2	5,1	6,4	6,6	11,2	7,7	13,1	18,2	17,3	12,7	1,2
7	TNn	-2,2	-9,7	-13,1	-13,2	-8,7	-7,4	-7,3	0,0	1,6	4,7	8,3	-0,8	nd
	TXx	18,1	8,3	7,5	9,2	7,7	7,7	14,3	13,2	21,3	22,7	21,6	18,1	nd
8	TNn	-2,6	-11,1	-12,5	-14,2	-8,3	-8,5	-9,5	-2,3	0,2	4,2	8,6	-0,7	0,8
	TXx	17,3	9,4	11,4	13,0	12,5	11,0	19,6	14,5	21,1	22,6	21,2	17,4	2,1
9	TNn	-2,4	-10,9	-13,4	-16,1	-7,9	-8,5	-8,9	-2,2	0,2	3,3	7,7	-3,6	0,9
	TXx	18,5	10,8	11,7	10,7	11,7	12,3	19,2	14,0	21,9	24,1	21,7	19,2	1,7
10	TNn	-5,4	-12,2	-13,7	-15,1	-10,3	-7,5	-7,4	-0,5	0,7	4,8	8,2	-2,7	nd
	TXx	18,1	6,1	7,3	8,5	7,9	7,6	14,3	12,7	21,0	24,1	<b>24,4</b>	17,5	nd

### Gradi giorno

Il massimo valore mensile dei gradi giorno si è registrato alla stazione di Passo Rolle, in agosto, 605 unità, mentre l'opposto è il dato di La Thuile, in marzo, 26 unità (Tabella 4). Il valore medio annuale è di 2600 unità, il massimo appartiene alla stazione di Passo Rolle (3659 unità), il minimo alla stazione di Formazza (1826 unità).

Tabella 4 – Anno idrologico 2023-2024: gradi-giorno (DD, °C) totali mensili ed annuali. In grassetto i minimi e massimi valori mensili; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

St.	O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	Anno
1	318	127	132	99	118	83	127	195	354	528	539	268	2887
2	307	90	111	79	113	70	116	170	325	487	484	252	2603
3	220	45	70	71	87	63	108	199	293	385	397	170	2108
4	219	29	43	36	43	<b>26</b>	87	110	255	417	454	180	1897
5	230	72	46	56	68	57	112	169	283	388	419	201	2101
6	208	36	41	32	37	29	84	129	243	381	433	171	1826
7	309	71	77	48	78	68	152	241	388	521	567	276	2793
8	321	84	135	128	183	160	232	308	415	528	564	295	3351
9	367	122	137	108	125	138	249	310	472	589	<b>605</b>	346	3569
10	308	45	54	35	71	86	173	263	412	551	588	280	2865

Per questo parametro non è stato possibile effettuare il confronto con il quinquennio precedente causa significative lacune presenti nelle serie di dati.

### *Giorni di gelo, con gelo e senza gelo*

Il valore massimo mensile dei giorni di gelo si osserva alla stazione di Formazza, in gennaio e marzo (21 giorni), mentre l'analogo per i giorni con gelo si osserva alla stazione di Pantano d'Avio, in marzo (28 giorni). I giorni di gelo medi annuali (media sulle dieci stazioni) risultano 72, quelli con gelo 104 e quelli senza gelo 188 (Tabella 5). Per questi indici non è stato possibile effettuare il confronto con il quinquennio precedente causa significative lacune nelle serie di questi dati.

Tabella 5 – Anno idrologico 2023-2024: numero di giorni di gelo (ID), con gelo (FD) e senza gelo (FF) mensili ed annuali. In grassetto i massimi valori mensili di ID e FD; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

Staz.		O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	Anno
1	ID	0	6	9	9	10	12	8	0	0	0	0	0	54
	FD	3	17	8	14	8	11	14	10	0	0	0	5	90
	FF	28	7	14	8	10	8	8	21	30	31	31	25	221
2	ID	0	11	6	11	10	16	11	0	0	0	0	0	65
	FD	9	16	13	14	10	11	9	10	0	0	0	5	97
	FF	22	3	12	6	8	4	10	21	30	31	31	25	203
3	ID	2	18	13	14	9	15	13	0	0	0	0	1	85
	FD	11	11	12	11	11	13	9	17	0	0	0	12	107
	FF	18	1	6	6	8	3	8	14	30	31	31	17	173
4	ID	0	20	15	18	16	20	17	2	0	0	0	2	110
	FD	14	9	10	11	6	8	6	17	3	0	0	4	88
	FF	17	1	6	2	6	3	7	12	27	31	31	24	167
5	ID	0	18	20	17	13	19	15	1	0	0	0	0	103
	FD	10	9	8	9	7	10	7	17	0	0	0	5	82
	FF	21	3	3	5	8	2	8	13	30	31	31	25	180
6	ID	0	19	18	<b>21</b>	16	<b>21</b>	15	1	0	0	0	1	112
	FD	15	10	12	9	12	10	11	26	4	0	0	8	117
	FF	16	1	1	1	0	0	4	4	26	31	31	21	136
7	ID	0	10	12	15	10	9	9	0	0	0	0	0	65
	FD	3	15	13	12	11	15	10	1	0	0	0	3	83
	FF	28	5	6	4	7	7	11	30	30	31	31	27	217
8	ID	0	8	6	9	0	1	2	0	0	0	0	0	26
	FD	5	17	15	18	19	<b>28</b>	17	4	0	0	0	2	125
	FF	26	5	10	4	9	2	11	27	30	31	31	28	214
9	ID	0	6	6	6	7	4	3	0	0	0	0	0	32
	FD	6	24	21	25	16	27	17	8	0	0	0	9	153
	FF	25	0	4	0	5	0	10	23	30	31	31	21	180
10	ID	0	13	12	20	9	8	7	0	0	0	0	2	71
	FD	7	15	13	11	16	21	11	2	0	0	0	5	101
	FF	24	2	6	0	3	2	12	29	30	31	31	23	193

## Precipitazioni

Il quadro generale del regime pluviometrico mensile ed annuale per l'anno idrologico 2023-2024 è riportato in Tabella 6. Il valore mensile più elevato di precipitazioni si osserva alla stazione di Pantano d'Avio, in ottobre (529 mm); alla stessa stazione si registra anche il mese con il maggior numero di giorni con precipitazioni, maggio (23 giorni). I totali annuali di precipitazione più elevati si osservano alle stazioni di Pantano d'Avio e Passo Rolle, rispettivamente con 2277 mm e 2133 mm. La media annuale delle precipitazioni cadute durante l'anno idrologico 2023-2024 è di 1602 mm ed il numero medio di giorni con precipitazioni è pari a 132.

Tabella 6 – Anno idrologico 2023-2024: precipitazioni totali (pioggia e neve fusa, mm, P), numero di giorni con precipitazioni (PD) mensili e annuali e differenze ( $\Delta$ ) tra i totali annuali dell'anno idrologico 2023-2024 con quelli del quinquennio precedente (2019-2020). In grassetto i massimi valori mensili; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

St.		O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	Anno	$\Delta$
1	P	285	108	99	36	18	53	59	141	243	19	55	184	1301	206
	PD	12	7	3	4	4	8	7	20	16	5	8	12	106	17
2	P	117	68	63	30	20	71	78	242	227	29	67	133	1145	102
	PD	10	10	8	7	5	9	11	16	14	3	8	11	112	1
3	P	105	75	41	26	32	96	210	219	240	75	37	325	1481	402
	PD	11	8	7	4	6	11	16	22	18	8	5	18	134	15
4	P	126	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	152	102	56	201	nd	nd
	PD	11	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1	14	9	7	13	nd	nd
5	P	163	59	45	21	37	48	147	266	261	93	47	187	1375	126
	PD	11	4	8	6	7	7	15	22	19	9	11	14	133	-5
6	P	267	86	27	24	42	90	126	225	195	61	69	214	1428	244
	PD	14	9	8	5	10	14	15	22	16	9	9	16	147	21
7	P	444	73	69	19	25	90	91	195	201	180	61	230	1676	nd
	PD	13	10	6	4	3	12	7	21	18	9	9	15	127	nd
8	P	<b>529</b>	100	253	44	43	127	152	237	254	156	86	297	2277	928
	PD	13	10	11	7	11	16	12	<b>23</b>	16	12	9	15	155	35
9	P	382	125	136	52	110	181	98	294	232	138	121	265	2133	259
	PD	14	10	5	7	9	18	8	22	16	10	9	13	141	-24
10	P	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	PD	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

Il confronto con il quinquennio precedente, effettuato sui totali annuali, ma carente di tre stazioni su dieci (una per settore alpino), ci restituisce una situazione che vede un sostanziale incremento di acqua caduta, non sempre accompagnato da un altrettanto incremento del numero di giorni di pioggia. Da segnalare l'elevata differenza di precipitazioni osservata alla stazione di Pantano d'Avio ( $\Delta$  928 mm), unitamente a quella di Rifugio Gastaldi ( $\Delta$  402 mm). Il dato di giorni di pioggia invece, si presenta con una alternanza di valori positivi e negativi, oscillando dai +35 giorni di Pantano d'Avio ai -24

giorni di Passo Rolle, a confermare una variabilità che risente più di altri parametri della posizione geografica e dell'orografia a scala locale.

L'andamento medio del regime pluviometrico mensile è riportato in Figura 3. Il mese con maggior precipitazioni è stato ottobre (269 mm), seguito da maggio, settembre e giugno, con valori rispettivamente di 227 mm, 226 mm e 223 mm. Gennaio e febbraio sono i mesi con meno precipitazioni, rispettivamente con 32 mm e 41 mm. I mesi con più giorni di pioggia sono stati maggio (19 giorni) e giugno (16 giorni), all'opposto abbiamo gennaio (6 giorni).

## Innevamento

Il quadro generale dello spessore medio mensile ed annuale del manto nevoso per l'anno idrologico 2023-2024 è riportato in Tabella 7. Il valore mensile più elevato si osserva alla stazione di Formazza, in aprile (348 cm), mentre l'opposto si osserva alla stazione di Colle Lombarda, in novembre (6 cm). La media annuale dello spessore della neve al suolo durante l'anno idrologico 2023-2024 è di 118 cm, con un massimo annuale di 211 cm registrato alla stazione di Formazza. Il valore medio del totale annuale di giorni con neve al suolo è pari a 225.

Tabella 7 – Anno idrologico 2023-2024: media mensile e annuale dello spessore della neve al suolo (S, cm) e totale mensile e annuale di giorni di neve al suolo (SD), calcolati per il periodo novembre-giugno. In grassetto il valore massimo mensile; nd, no data. Per la numerazione delle stazioni fare riferimento alla Tabella 1.

St.		O	N	D	G	F	M	A	M	G	L	A	S	Anno
1	S		6	17	38	56	174	177	142	15				78
	SD		13	28	31	28	31	30	31	10				25
2	S		18	25	37	53	177	154	148	22				79
	SD		30	31	31	28	31	30	31	30				30
3	S		20	34	22	26	182	196	242	121				105
	SD		30	31	31	28	31	30	31	30				30
4	S		78	128	130	133	186	187	148	nd				142
	SD		30	26	25	28	28	30	27	11				26
5	S		24	60	45	78	211	223	236	118				124
	SD		26	24	31	28	31	30	31	29				29
6	S		64	125	147	168	286	<b>348</b>	336	213				211
	SD		30	31	31	28	31	30	31	30				30
7	S		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd				nd
	SD		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd				nd
8	S		59	85	118	132	185	165	86	nd				119
	SD		30	31	31	28	31	30	26	1				26
9	S		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd				nd
	SD		nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd				nd
10	S		44	85	116	125	151	130	36	14				88
	SD		30	31	31	28	31	30	19	27				28

Per questo parametro non è stato possibile effettuare il confronto con il quinquennio precedente causa significative lacune nelle serie di dati. L'andamento medio su base mensile degli apporti nevosi in termini di equivalente in acqua è riportato in Figura 3. La media mensile dello spessore del manto nevoso, in termini di acqua equivalente mostra chiaramente come i maggiori apporti siano avvenuti in primavera, nei mesi di marzo, aprile e maggio, rispettivamente con 194 mm, 198 mm e 172 mm.

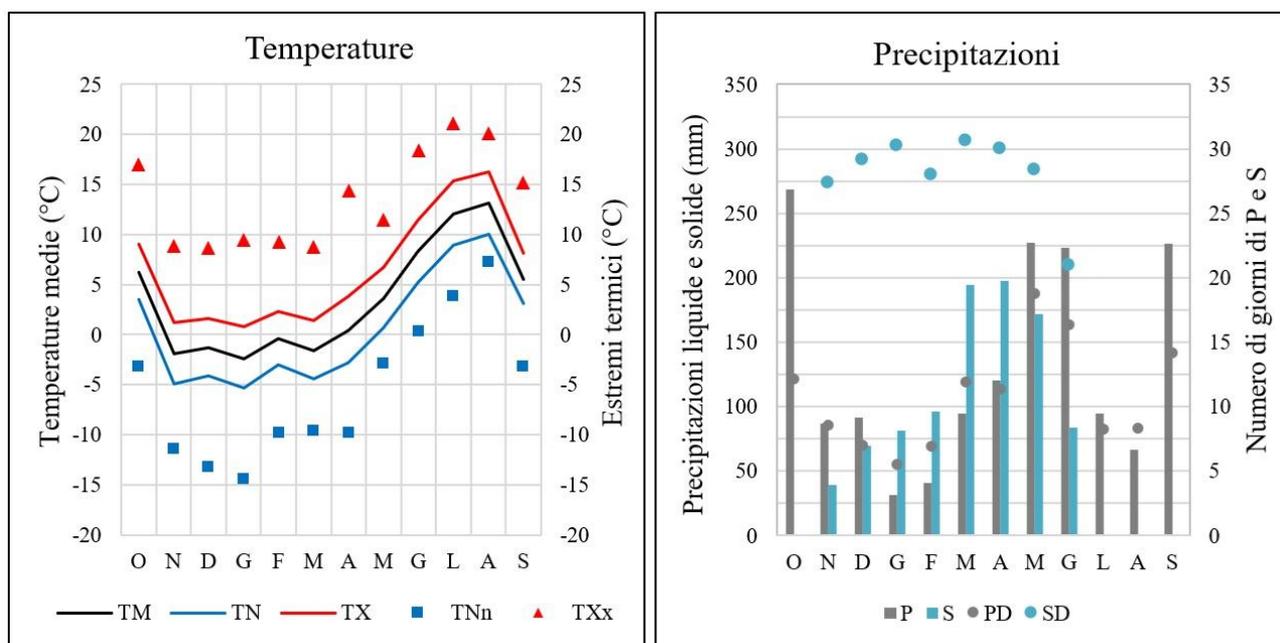


Figura 3 – Anno idrologico 2023-2024: a sinistra, media mensile dei valori delle temperature e degli estremi termici; a destra, precipitazioni totali mensili (pioggia e neve fusa), altezze di neve al suolo medie mensili (esprese in acqua equivalente), numero totale di giorni con precipitazioni e di giorni con neve al suolo. Per il significato delle abbreviazioni vedere la sezione “Dati e metodi”.

### Tendenze climatiche sull'arco alpino

Al fine di poter conoscere l'evoluzione nel tempo delle temperature presenti sulle Alpi e stimare scenari futuri è necessario poter disporre di lunghe serie di dati di buona qualità, acquisite da stazioni meteorologiche geograficamente ben distribuite. Negli ambienti alpini di alta quota, glaciali e periglaciali, le stazioni meteorologiche che soddisfano tali criteri non sono molte: con il passare degli anni il numero di queste è andato aumentando, anche se diverse aree di alta quota ne sono ancora prive.

Per la ricerca delle tendenze climatiche, uno dei metodi maggiormente utilizzati prende come riferimento i periodi climatologici normali, cioè dei periodi temporali lunghi 30 anni, aggregati per decade. L'ultimo in ordine di tempo è il periodo 1991-2020 (WMO 2017). Un recente lavoro in cui è stato applicato tale approccio e che ha considerato i dati provenienti da 23 stazioni meteorologiche localizzate sull'arco alpino a quote superiori ai 1500 metri, riporta che i valori medi annuali della

temperatura minima e massima per il periodo climatologico normale 1991-2020 sono rispettivamente  $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con un tasso di riscaldamento di circa  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/10$  anni. Il confronto della temperatura media annuale registrata nel periodo climatologico normale 1961-1990 con quella del periodo climatologico normale 1991-2020 mostra un aumento di  $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Nigrelli et al. 2023).

Un secondo approccio utilizzato in questo studio ha messo a confronto la temperatura media giornaliera dell'anno 2024, ricavata dalle temperature medie giornaliere delle 10 stazioni considerate, con la temperatura media giornaliera del periodo climatologico normale 1991-2020, ricavata dalle temperature medie giornaliere delle 23 stazioni considerate nello studio sopra citato (Figura 4). Questo confronto assume un valore indicativo ma di riferimento, sia perché 5 delle 10 stazioni qui considerate fanno parte anche del gruppo di 23 stazioni utilizzate nell'analisi del periodo 1991-2020 e sia perché la quota media delle 10 stazioni (2259 m) qui utilizzate è simile alla quota media delle 23 stazioni utilizzate nell'analisi del periodo 1991-2020 (2372 m).

Osservando gli andamenti termici presenti in Figura 4, è possibile notare come la temperatura media giornaliera del 2024, considerata come media generale di tutte e dieci le stazioni utilizzate in questo studio, sia significativamente più elevata rispetto allo stesso parametro riferito al periodo 1991-2020 e questo in diversi giorni dell'anno. Si conferma quindi la tendenza ad un aumento generalizzato della temperatura che, a seconda degli anni, può presentarsi in modo diverso.

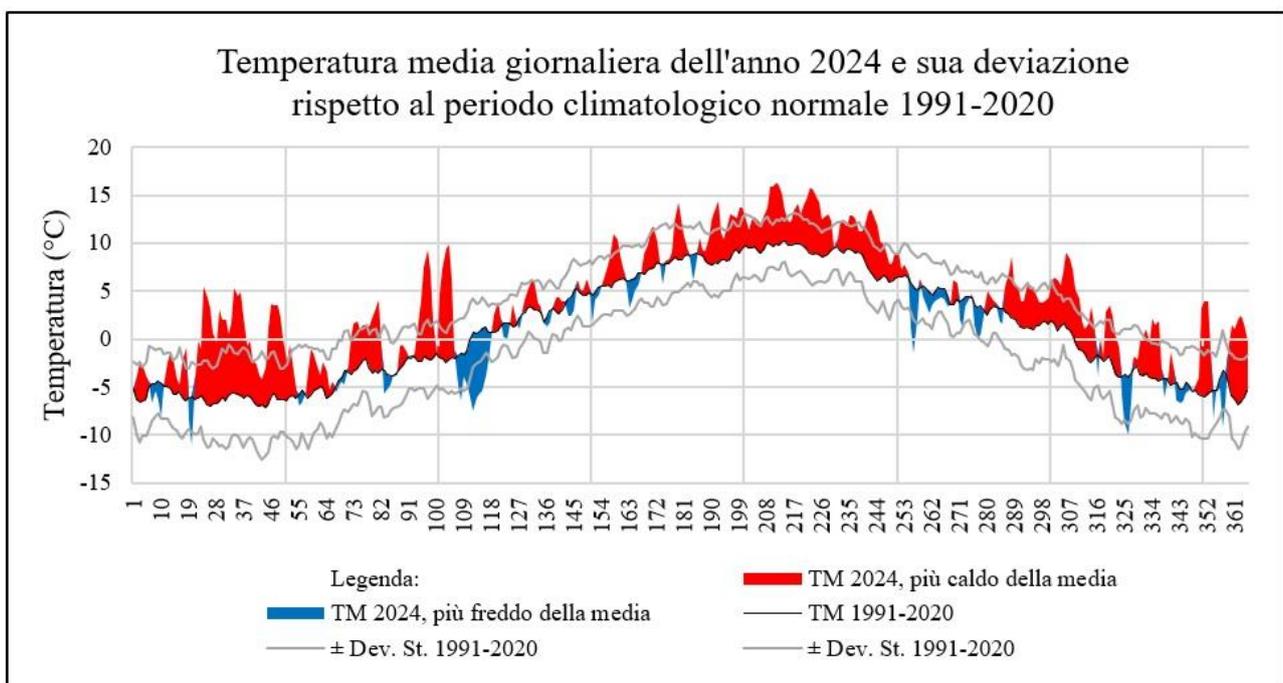


Figura 4 – Temperatura media (TM) giornaliera e sua deviazione rispetto al periodo climatologico normale 1991-2020.

## **Conclusioni**

Gli ambienti glaciali e periglaciali delle nostre Alpi stanno rispondendo rapidamente ai cambiamenti climatici: le temperature aumentano, così come le notti calde, allo stesso tempo le precipitazioni cambiano il loro regime, aumenta la frequenza e la magnitudo degli eventi pluviometrici, di neve ne cade ma spesso in ritardo. Le quote dello zero termico in estate tendono ad alzarsi e a mantenersi elevate per diversi giorni: la fusione del ghiaccio e la degradazione del permafrost procedono anche di notte, alcuni processi di instabilità naturale come i crolli di ghiaccio, i crolli di roccia, le colate di detrito e le piene torrentizie sembrano essere in aumento (Nigrelli et al. 2024).

Nei prossimi cento anni il clima e i diversi ambienti delle Alpi subiranno notevoli trasformazioni (Kotlarski et al. 2023). L'intera regione alpina avrà un clima più caldo, soprattutto in estate e soprattutto nella sua parte meridionale, cioè quella italiana. Alla fine di questo secolo, o forse anche prima, gran parte dei ghiacciai al di sotto dei 3000 metri saranno estinti, le aree glaciali si trasformeranno velocemente in aree periglaciali, fenomeno peraltro già ampiamente in corso: in pratica tutto si sposta verso l'alto, la montagna cambia e perde il bianco.

L'alta montagna sarà sempre più frequentata da turisti, escursionisti e alpinisti. Nei prossimi decenni è molto probabile che verranno costruite nuove strutture, al fine di soddisfare diversi settori produttivi (turismo, produzione idroelettrica, agricoltura, silvicoltura, approvvigionamento idrico) ma, allo stesso tempo, aumenterà anche l'instabilità naturale. Il forte interesse dell'uomo per questi ambienti deve quindi prendere in considerazione gli scenari evolutivi dei prossimi decenni, al fine di conoscere preventivamente i pericoli, ridurre i rischi e applicare concrete azioni di mitigazione e di adattamento al clima che cambia. Indagini come quella qui presentata, se ripetute nel tempo e magari ampliate, prendendo in considerazione più stazioni e più indici climatici, possono costituire un utile strumento di conoscenza e di supporto alle decisioni.

## **Ringraziamenti**

Si ringrazia l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte, il Centro Funzionale della Regione Autonoma Valle d'Aosta, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Lombardia, la Provincia Autonoma di Trento e la Provincia Autonoma di Bolzano per la messa a disposizione gratuita dei dati meteorologici attraverso i portali dedicati e aperti al pubblico.

## **Bibliografia**

1. Chiarle M., Bondesan A., Carturan L., Scotti R. (2024) – Campagna glaciologica annuale dei ghiacciai italiani (2023). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 47, 3-27. <https://doi.org/10.4454/g5672anf>

2. Carturan L. (2024) – Bilanci di massa dei ghiacciai italiani nell'anno 2023. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 47, 3-27. <https://doi.org/10.4454/g5672anf>
3. Hansson A., Dargusch P., Shulmeister J. (2021) - A review of modern treeline migration, the factors controlling it and the implications for carbon storage. *Journal of Mountain Science*, 18(2), 291-306. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6221-1>
4. ICCI, 2024. State of the Cryosphere 2024 – Lost Ice, Global Damage. International Cryosphere Climate Initiative (ICCI), Stockholm, Sweden. 72 pp. Published: 12 November 2024
5. Kotlarski S., Gobiet A., Morin S., Olefs M., Rajczak J., Samacoits R. (2023) - 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 60: 65-86. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3>
6. Nigrelli G., Chiarle M. (2023) – 1991–2020 climate normal in the European Alps: focus on high-elevation environments. *Journal of Mountain Science*, 20(8), 2149-2163. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-7951-7>
7. Nigrelli G., Paranunzio R., Turconi L., Luino F., Mortara G., Guerini M., Giardino M., Chiarle M. (2024) – First national inventory of high-elevation mass movements in the Italian Alps. *Computers and Geosciences*, 184, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2024.105520>
8. Schickhoff U., Singh R. B., Mal S. (2022) - Mountain Landscapes in Transition. Effects of Land Use and Climate Change. Springer Nature
9. World Meteorological Organization, WMO (2017) – Guidelines on the Calculation of Climate Normals. WMO No. 1203, Geneva, Switzerland
10. World Meteorological Organization, WMO (2018) – Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100. Geneva, Switzerland
11. World Meteorological Organization, WMO (2024) – State of the Climate. Update for COP29. Geneva, Switzerland

Torino, 1 Febbraio 2025

Report distribuito con licenza [CC-BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[www.naturacene.it](http://www.naturacene.it)

