NEVE e CLIMA sulle ALPI ITALIANE

Mauro Valt
AINEVA, Vicolo dell'Adige, Trento Italy
mauro.valt@gmail.it

Paola Cianfarra
Università degli Studi di Genova,
Dipartimento di Scienze della Terra,
dell'Ambiente e della Vita – DISTAV,
Corso Europa 26, I-16132 Genova, Italy

Martino Valt
Alpine Ski Instructor
Via Meneghina, 12
32020 FALCADE (BL)

SNOW AND CLIMATE IN THE ITALIAN ALPS

In the Italian Alps, over 20 historic series of snow depth (HS) and new snow depth (HN) are available for the 1961-2020 period. These series have been set up to determine the typical values of the 1961-1990 and 1991–2020 periods, regarding snow depth parameters of 1, 5, 30 and 50 cm (dHS), average snow depth (HS_{imed}), new snow (HN) and snow reliability index. The first data show a decrease of days with the different dHS parameters, especially at low elevations (< 1,500 m of height) and particularly for dHS30 and dHS50. A negative, though less significant, trend can also be observed over 1,500 m of height. The daily average snow depth index (HS_{imed}) shows that snow depth increases slow down as from mid-January, mainly at low elevations. Such decrease of the HS_{imed} value is not always supported by a solid statistic as for the annual cumulative sum of fresh snow values (HN) as the latter, though featuring a negative trend, are much less significant than dHS and HS_{imed} parameters. A reason for this trend may be a rise in snow cover melting periods during the winter season that would reduce HS increases with the same HN precipitation values. The period with the most snow in the Italian Alps was 1971-1980, while the decade with the least snowfalls was 2011-2020. For the 1991-2020 period, the snow reliability index for skiing has grown to 1,750 m of height, i.e. more than 230 m compared with the previous period. The first findings show a snow reliability index growth of 213 m for each degree of temperature rise. Other than analysing data in the 2 periods, several studies have also been carried out on individual stations comparing surveyed and published data about situation in Swiss and Austrian mountains. The study has confirmed a rise of height in the snow reliability index for Southern Alps, due to a milder climate compared with the continental climate of Austria and partially of Switzerland.

Sulle Alpi italiane sono disponibili oltre 20 serie storiche di altezza neve al suolo (HS) e neve fresca (HN) per il periodo 1961-2020.
Queste serie sono state elaborate per definire i valori caratteristici dei periodi 1961-1990 e 1991–2020, per i parametri di altezza neve al suolo di 1, 5, 30 e 50 cm (dHS), spessore medio (HS_{imed}), neve fresca (HN) e quota della neve affidabile (LAN).
Le prime elaborazioni hanno evidenziato una diminuzione dei giorni con i diversi dHS specie alle basse quote (< 1500 m di quota) ed in particolare di dHS30 e dHS50. Anche oltre i 1500 m di quota il trend è negativo ma meno importante. L'andamento dell'indice giornaliero dello spessore medio del manto nevoso (HS_{imed}) ha evidenziato un rallentamento degli incrementi di neve al suolo da metà di gennaio, soprattutto alle basse quote. Tale diminuzione del valore e HSimed non è sempre supportata da una statistica robusta dei valori di sommatoria annuale di neve fresca (HN) poiché questi ultimi, pur mostrando un trend negativo, presentano una significatività inferiore rispetto ai parametri di dHS e HS_{imed}. Una possibile ipotesi di questo andamento è un aumento dei periodi di fusione del manto nevoso durante la stagione invernale che ridurrebbero gli aumenti di HS a parità di precipitazione HN. Il periodo con il maggior innevamento sulle Alpi italiane è stato il 1971-1980 mentre il decennio con meno neve il 2011-2020.
La quota dell'affidabilità della neve naturale (LAN) per lo sci si è innalzata a quota 1750 m per il periodo 1991-2020, oltre 230 m rispetto al precedente periodo. Le prime elaborazioni indicano un aumento della LAN di 213 m per ogni grado di aumento della temperatura. Oltre alle elaborazioni sui 2 periodi, sono state condotte le indagini sulle singole stazioni con confronti sui dati indagati e pubblicati relativi alla montagna della Svizzera e dell'Austria. L'analisi ha confermato per le Alpi meridionali un incremento di quota legato ad un clima più mite rispetto al clima continentale dell'Austria e parzialmente della Svizzera.

INTRODUZIONE

L'IPPC (2018) ha indicato il turismo come uno dei settori economici influenzato dai cambiamenti climatici. In molte aree il turismo è un importante pilastro per la stabilità economica (Steiger et al. 2020) e quello invernale è fortemente dipendente dalle risorse naturali, in primo luogo dalla neve (Shih et al. 2009).

La presenza di "snow impact", quindi la visione di un ambiente imbiancato, incide positivamente sulla frequentazione e sulla sua filiera. Lo scenario "total white", che equivale ad un ambiente montano totalmente innevato, da cartolina di Natale, porta ad un aumento del flusso turistico stimato al 25% nel ponte dell'Immacolata e del 77% nel periodo prima di Natale, per estendersi per tutto l'inverno (ad esempio +38% dal 7 al 31 di gennaio) (JFC, 2018).

Negli ultimi decenni la copertura nevosa ha subito delle importanti variazioni sia sull'arco alpino meridionale che in generale su tutto il pianeta, complice anche l'aumento delle temperature (Notarnicola, 2022).

A livello globale, l'estensione della copertura nevosa annuale (12 mesi- periodo 1982-2020) indica una tendenza negativa del - 3,6% ± 2,7% quantificabile in - 15,1 giorni ± 11,6 giorni (Notarnicola, 2022) di durata del manto nevoso.

La stagione più colpita è l'inverno con una riduzione media dell'estensione del manto nevoso pari a - 11,5% ± 6,9%, mentre la stagione più colpita da variazioni positive, perché ci sono aree dove nevica maggiormente, a livello globale, è la primavera, con un aumento medio del 10% ± 5,9% nel Pamir (Afghanistan, Pakistan, Cina, Kyrgyzstan) (Notarnicola, 2022).

Agli inizi degli anni ottanta l'eruzione del vulcano messicano El Chichon ha provocato un lieve raffreddamento che ha contrastato la diminuzione globale della neve, ma si è trattato di un fenomeno circoscritto nel tempo (Nortanicola, https://www.eurac.edu/it/magazine/in-tutte-le-aree-montane-del-mondo-la-neve-si-ferma-in-media-due-settimane-in-meno).

Per Alpi europee, l'analisi condotta su una base di oltre 800 stazioni nel periodo 1971- 2019 (Metiu et al. 2021) ha evidenziato un trend negativo sull' 85% delle stazioni e solo un 15% con un trend positivo (generalmente sulle stazioni in quota). La copertura nevosa è diminuita maggiormente sulle stazioni al di sotto dei 2000 m, più sulle Alpi meridionali (principalmente Italia) rispetto alle Alpi settentrionali.

Nella fascia sotto i 1000 m, la stagione con neve al suolo si è accorciata di 22 giorni sul versante nord delle Alpi e di 26 giorni sul versante sud, mentre fra i 1000 e i 2000 m la diminuzione è stata di 24 e 33 giorni, per il ritardo nella formazione del manto nevoso autunnale ma soprattutto per l'anticipo della fusione (Crespi et al. 2021).

In Austria, nel periodo 1962-2020 la copertura nevosa (dHS1) ha un trend negativo di -4,4 giorni decennio fra i 500 e i 1000 m (-26,4 giorni), di -2,6 giorni decennio fra i 1000 e i 1500 m (15,6 giorni), di -0,99 giorni decennio fra i 1500 e i 2000 m (-5,9 giorni) e di -0,1 giorni decennio fra i 2000 e i 2500 m e nulla alle quote superiori (Olefs et al. 2020).

In Svizzera, l'analisi delle serie storiche sul periodo 1961-2021 (Buchmann et al. 2022) è stata effettuata nelle due fasce altimetriche: sotto i 1500 m di quota, definita come "bassa quota" e sopra definita come "alta quota". Questa distinzione altimetrica, come già utilizzata in diversi articoli (es. Valt e Cianfarra, 2010), è importante poiché al di sotto dei 1500 m le influenze dell'aumento globale delle temperature sono evidenti sugli effetti del manto nevoso mentre alle quote superiori, dove normalmente la neve è ancora presente, gli effetti futuri potranno essere importanti.

Per quanto riguarda la permanenza della neve al suolo con spessori di 5 (dHS5) e 30 cm (dHS30), la tendenza negativa per le stazioni della Svizzera è per la quasi totalità su valori di -5,6 giorni per decennio per dHS5 (giorni con almeno 5 cm di neve al suolo) e -5,7 per dHS30 (giorni con almeno 30 cm di neve al suolo, pari rispettivamente a -31,9 e -34,2 giorni nel periodo 1961-2021 per le stazioni ubicate alle basse quote. Per le stazioni oltre i 1500 m è invece di -3,3 giorni decennio (-14,6 giorni) per dHS5 e -4,3 giorni decennio per dHS30 (-25,8 giorni). La percentuale di stazioni con una tendenza negativa significativa per dHS5 e dHS30 è anche più alta per le quote più basse: 81 % delle stazioni di altitudine inferiore e 69 % di quelle di altitudine superiore per dHS5 e 70 %, rispettivamente 33 % per dHS30.

Il discorso è inverso per la soglia di 50 cm (dHS50): la tendenza media per le

quote più basse è di -4,7 giorni decennio (-28,2 giorni) e di -5,4 (-32,4 giorni) per le stazioni situate più in alto. Tuttavia solo il 54% delle stazioni alle basse quote hanno un trend negativo per la dHS50, che diventa del 93% delle stazioni alle quote più elevate.

E' quindi evidente che il regime delle nevi è mutato negli ultimi anni con una ricaduta negativa sia sugli aspetti naturali, come i ghiacciai e la disponibilità delle risorsa idrica nivale, sia sulle possibilità degli sport invernali. Questi ultimi hanno visto la compensazione della neve mancante con gli investimenti per la produzione programmata di neve.

Nel presente lavoro viene redatto un primo quadro sull'andamento delle Alpi italiane con un confronto fra i trentenni climatici 1961-1990 e 1991-2020, il primo caratterizzato anche da un forte sviluppo degli impianti di risalita a fondovalle. Vengono presi in considerazione i valori di altezza neve al suolo HS5, HS30 e HS 50 cm nel periodo da dicembre ad aprile (DJFMA), la quantità di neve fresca caduta (HN) e la quota della neve sciabile.

Infine, vengono effettuate alcune considerazioni sulle tendenze future del manto nevoso riportate nei principali articoli recenti.

FONTE DEI DATI

Sull'arco alpino italiano sono disponibili una ventina di serie storiche di altezza neve (HS) e di neve fresca (HN) i cui dati iniziano negli anni '60 e sono aggiornate. Queste stazioni di montagna sono distribuite in gran parte sulle Alpi occidentali e nelle Alpi orientali. Per 18 stazioni sono disponibili entrambi i valori e per le rimanenti solo un parametro (Fig. 1).

Le serie storiche sono state ricostruite attraverso la consultazione degli Annali Idrologici dell' ex Servizio Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici, dei data base dei Servizi Valanghe AINEVA, dei data base di alcune Compagnie di gestione delle acque superficiali dell'arco alpino (CVA Valle D'Aosta, Enel) e della Società Meteorologica Italiana.

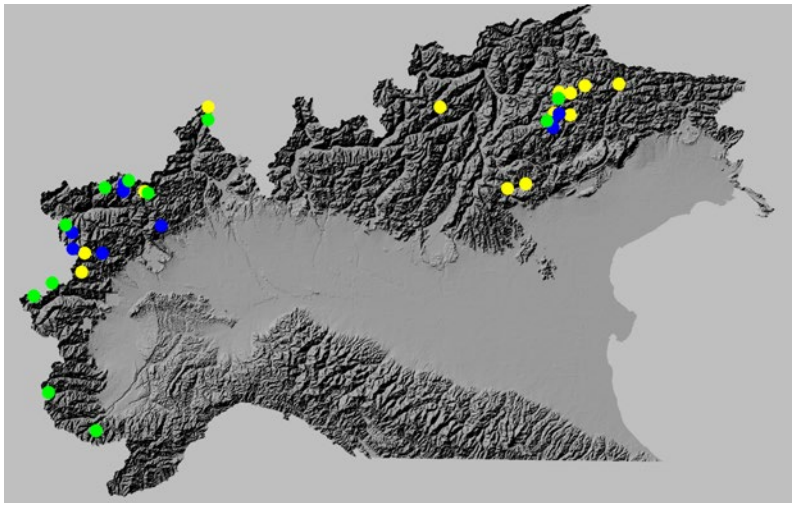

Fig. 1 - Stazione delle Alpi. In giallo le stazioni con misure di HS e HN, in verde le stazioni solo con misure di HS (neve al suolo) e in blu le stazioni solo con misure di HN (neve fresca).

Per i dati recenti sono stati consultati anche i geoportali di www.arpa.piemonte.it; www.arpa.veneto.it, meteotrentino.it; http://presidi2.regione.vda.it/, https://www.meteo.fvg.it/neve.php; https://meteomont.carabinieri.it/home ; http://www.meteomont.org/, https://www.arpalombardia.it/Pages/Ricerca-Dati-ed-Indicatori.aspx; http://meteo.provincia.bz.it/stazioni-meteo-montagna.asp e www.nimbus.it.

I problemi principali delle serie storiche sono l'omogeneizzazione e il reperimento dei meta dati, ovvero delle informazioni relative al punto di misura che nel corso dei decenni può anche essere variato. Per il parametro neve, "meno delicato" della temperatura dell'aria o della pioggia, non costituiscono un grande pregiudizio piccoli spostamenti del sito di misura nell'ordine di 50-100 m di quota o di posizione e, pertanto, nel presente lavoro i dati sono stati accettati.

In tutti i grafici e le tabelle del presente lavoro, l'anno di riferimento è l'anno idrologico: l'anno 2022 inizia il 1° ottobre 2021 e termina il 30 settembre 2022 e così per le stagioni precedenti.

Parte di tutti i dati utilizzati erano già aggregati in tabelle nelle pubblicazioni e siti consultati, per altri si è provveduto ad effettuare le elaborazioni necessarie. Inoltre, per definire gli eventi eccezionali (estremi o rari), è stato determinato il 0,10 e il 0,90 percentile rispetto al periodo di riferimento. Gli scarti medi che si collocano oltre tali soglie sono stati considerati eventi rari. Sono stati considerati come valori rientranti nella variabilità media quelli situati fra il 1° e il 3° quartile (25% e 75%). Gli scarti medi che si collocano all'interno del 1° quartile e del 3° quartile, fino al 0,10 e 0,90 percentile, sono stati definiti eventi al di fuori della norma. Tale metodologia è stata utilizzata per la sua semplicità e per omogeneità con i lavori precedenti.

Per tutte le serie storiche si è proceduto con il test non parametrico di Mann-Kendall utilizzando il software Mekesens 2.0. I valori di significatività trovati per i trend sono espressi nelle appropriate tabelle con i simboli +, *, ** e *** che indicano un livello di significatività pari a:

*** if trend at $\alpha = 0.001$ level of significante

** if trend at $\alpha = 0.01$ level of significance

* if trend at $\alpha = 0.05$ level of significante

+ if trend at $\alpha = 0.1$ level of significance

Il valore di Q (trend) viene elaborato con il software Mekesens 2.0 (Salmi et al. 2002) e definito con il metodo delle mediane Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968).

ELABORAZIONI

I dati di altezza neve e di neve fresca di ogni stazione, sono stati analizzati singolarmente e in modo raggruppato temporale e altimetrico. In base alla disponibilità del parametro sono stati definiti i valori caratteristici di:

a. Durata del manto nevoso al suolo con almeno 1 cm di neve (dHS1) (cm) (inverno)
b. Durata del manto nevoso al suolo con più di 5 cm di neve (dHS30) (cm) (DJFMA)

c. Durata del manto nevoso al suolo con più di 30 cm di neve (dHS30) (cm) (DJFMA)

d. Durata del manto nevoso al suolo con più di 50 cm di neve (dHS50) (cm) (DJFMA)

e. Spessore medio di neve al suolo stagionale (HS_{imed}) (cm)

f. Analisi delle tendenze con il test non parametrico di Mann Kendall (di seguito MK) (Mann, 1945, Kedall, 1975, Salmi et al. 2002))

g. Valore del trend valutato con Theil-Sen slopes (cm decade)

h. Indice di spessore medio della neve al suolo (HS_{imed}), calcolato come media aritmetica sui valori disponibili per il raggruppamento delle stazioni al di sotto dei 1500 m di quota (bassa quota) (cm)

i. Indice di spessore medio della neve al suolo (HSimed), calcolato come media aritmetica sui valori (cm) disponibili per il raggruppamento delle stazioni al di sopra dei 1500 m di quota (alta quota)

j. Sommatoria stagionale di neve fresca dal 1° dicembre al 30 aprile (DJFMA) (cm)

k. SAI Index del cumulo stagionale di neve fresca (DJFMA) per il raggruppamento delle stazioni al di sotto dei 1500 m

l. SAI Index del cumulo stagionale di neve fresca (DJFMA) per il raggruppamento delle stazioni al di sopra dei 1500 m

m. Per il solo valore di HSimed medio di DJFMA è calcolato il punto di cambiamento di regime con il pacchetto Breakpoints (strucchange package) di R.

Per le elaborazioni da a) a h) sono stati determinati i valori caratteristici (ISPRA,2022) per;

- Periodo climatico 1961-1990
- Periodo climatico 1991-2020.

RISULTATI

a. durata del manto nevoso con 1 cm di spessore (dhs1), periodo 1° novembre – 15 giugno

E' stata analizzata la durata del manto nevoso con almeno 1 cm di neve al suolo (dHS1) per tutta la stagione invernale, partendo da novembre (per alcune serie sono disponibili dati validati di ottobre) fino al 15 di giugno. Tutte le stazioni, eccetto per Lago di Fedaia a 2000 m nelle Alpi orientali, il trend è negativo (Fig. 2 e 3) e per la maggior parte con un elevato grado di significatività al test di MK (** o ***) (Fig. 4). Il valore ricavato per i 2 grandi raggruppamenti (alta e bassa quota) sono di un trend negativo di -3,5 giorni decennio per le stazioni in quota (oltre i 1500 m), pari a -21 giorni nel periodo 1961-2020 e di -6,4 decennio (-39 giorni) per quelle a bassa quota (Fig. 5a). I valori caratteristici dei 2 trentenni, 1961-1990 e 1991-2020, sono riportati nelle Fig. 5 a) b) c) d). La durata caratteristica del manto nevoso è diminuita di ben 20 giorni alle basse quote e di 8

Fig. 2 - Tendenza Q (Theil – Sen Slope) per singola stazione e per parametro di dHS.

Theil-Sen Slope (Q) dHS	dHS1	dHS5	dHS30	dHS50
Careser, 2600 m	-0,13	0,00	0,00	0,00
Lago Goillet, 2526 m	-0,07	0,00	0,00	0,00
Lago Gabiet, 2378 m	-0,19	0,00	0,00	0,00
Lago Toggia, 2165 m	-0,14	0,00	0,00	0,00
Cignana, 2137 m	-0,60	0,00	-0,18	-0,67
Lago di Cavia, 2100 m	-0,32	0,00	0,00	-0,38
Lago di Fedaia, 2050 m	0,06	0,00	0,00	0,00
Moncenisio, 2000 m	-0,20	0,00	-0,26	-0,50
Rochemolles, 1929 m	-0,55	-0,02	-0,74	-1,15
Gressoney, 1850 m	-0,32	-0,15	-0,31	-0,47
Valgrisenche, 1772 m	-0,37	-0,17	-0,46	-0,49
Arabba, 1630 m	-0,75	-0,75	-0,81	-1,04
Ceresole R., 1579 m	-0,50	-0,46	-0,91	-1,00
Saretto, 1540 m	-0,78	-0,60	-0,88	-0,82
Balme, 1452 m	-0,86	-0,76	-1,27	-1,00
Andraz, 1440 m	-0,77	-0,67	-0,74	-0,60
Formazza, 1280 m	-0,54	-0,44	-0,59	-0,83
Cortina, 1250 m	-0,53	-0,50	-0,66	-0,41
Asiago, 1000 m	-0,56	-0,76	-0,32	0,00
Entraque, Lago Piastra 990	-0,38	-0,48	-0,57	-0,38
Tonezza, 935 m	-0,67	-0,62	-0,23	-0,02
Auronzo, 864 m	-0,75	-0,94	-0,15	0,00
Ghirlo, 750 m	-0,67	-0,57	-0,10	0,00

Fig. 3 - Valori caratterisici per sintola stazione e parametro per i 2 periodi 1961-1990 (30 anni) e 1991-2020 e differenza. La colorazione indica i range di tendenza.

Stazione, quota	1961-1990 HS01	1991-2020 HS01	Scarto	1961-1990 HS05	1991-2020 HS05	Scarto	1961-1990 HS30	1991-2020 HS30	Scarto	1961-1990 HS50	1991-2020 HS50	Scarto
Careser, 2600 m	219,3	214,2	-5,1	148,6	147,3	-1,4	144,5	134,5	-10	134,5	119,3	-15,2
Lago Goillet, 2526 m	218,1	217,8	-0,3	148,9	150,7	1,7	139,5	144,7	5,2	128,7	140,8	12,1
Lago Gabiet, 2378 m	154,2	206,6	52,5	150,1	148,7	-1,5	142	141,7	-0,4	130,6	131,1	0,5
Lago Toggia, 2165 m	220,2	215,8	-4,4	150,7	150	-0,7	149,3	145,5	-3,8	142,5	140,2	-2,3
Cignana, 2137 m	192,5	178,9	-13,7	140	143,1	3,1	122,8	118,7	-4,1	103,7	89,3	-14,4
Lago di Cavia, 2100 m	202,7	190,9	-11,8	148,4	147,1	-1,3	140,3	122	-18,4	122,5	105,9	-16,7
Lago di Fedaia, 2050 m	195,2	195,1	-0,1	148,3	147,2	-1,1	138	132,7	-5,2	118,1	116,3	-1,8
Moncenisio, 2000 m	184,1	174,3	-9,8	147,4	141,8	-5,7	120,4	108,7	-11,8	102,2	82,6	-19,6
Rochemolles, 1929 m	184,4	166,2	-18,2	146,9	140	-6,9	132,3	107,4	-24,8	116,5	78,7	-37,8
Gressoney, 1850 m	173,3	158,7	-14,6	143,5	135,9	-7,7	118,6	106,9	-11,7	96,6	82,2	-14,4
Valgrisenche, 1772 m	166,2	149,8	-16,4	142	130,6	-11,4	112,6	96,7	-15,9	91,5	72,5	-19,1
Arabba, 1630 m	155,1	129,8	-25,3	134,5	107,2	-27,4	103,3	73,5	-29,8	77,9	45,3	-32,6
Ceresole R., 1579 m	149,8	132,5	-17,3	128,9	113	-15,8	101,3	67,4	-33,9	74,5	39,5	-35,1
Saretto, 1540 m	151,3	119,8	-31,5	125,6	102,6	-23	93,6	66,5	-27,1	70,3	42,9	-27,4
Balme, 1452 m	137,5	110	-27,5	119,8	95,8	-24,1	91,8	56	-35,8	64,1	33,1	-31
Andraz, 1440 m	150,4	123,7	-26,8	130,4	107,9	-22,5	87,1	64,8	-22,3	58,3	30	-28,3
Formazza, 1280 m	154,9	136,8	-18,1	135,5	118,8	-16,8	107,7	89,8	-17,9	86,9	66,3	-20,7
Cortina, 1250 m	116,5	103,7	-12,8	107,1	94,3	-12,7	70,1	47,2	-22,9	45,8	22,3	-23,5
Asiago, 1000 m	92,9	78	-14,9	82,5	63,1	-19,5	45,4	14,9	-30,5	23,5	5,7	-17,8
Lago Piastra, 990	100,9	86,4	-14,5	86	71,9	-14,1	52,1	32,9	-19,2	39,1	18,6	-20,5
Tonezza, 935 m	97,7	79,1	-18,6	83,7	66	-17,6	43,1	23,5	-19,7	22,9	11,6	-11,2
Auronzo, 864 m	98	80,1	-17,9	81	56,7	-24,2	30,3	13,8	-16,5	12,1	3,6	-8,5
Ghirlo, 750 m	95,2	77,4	-17,8	78,4	65,3	-13,2	35,9	22,8	-13,1	17,9	11,9	-6

giorni alle alte quote. Questa netta differenza evidenzia come i maggiori cambiamenti avvenuti negli ultimi 60 anni, sono stati più importanti alle basse quote.

Nella Fig. 6a e 6b, sono riporti i valori medi annuali, le linee del valore del trentennio di riferimento e i valori medi di ogni decade. Per la situazione a bassa quota si nota il divario fra i 2 periodi di 30 anni, ma soprattutto un intervallo fra il 1981 e il 2010 molto simile e poi il decennio più recente (2011-2020) caratterizzato da un calo del numero di dHS1. Per quando concerne l'andamento in quota, a parte il periodo 1971-1980, caratterizzato da lunghe stagioni invernali, le altre decadi sono molto simili. La maggior variabilità si riscontra nel periodo 1961-1990 rispetto al periodo recente.

Mann Kendall (MK)	dHS1	dHS5	dHS30	dHS50
Careser, 2600 m	*		+	+
Lago Goillet, 2526 m				
Lago Gabiet, 2378 m				
Lago Toggia, 2165 m	**			
Cignana, 2137 m	***			+
Lago di Cavia, 2100 m	+		*	
Lago di Fedaia, 2050 m				
Moncenisio, 2000 m				
Rochemolles, 1929 m	***	***	***	***
Gressoney, 1850 m	*	**		
Valgrisenche, 1772 m	*	*	+	
Arabba, 1630 m	***	***	**	**
Ceresole R., 1579 m	**	**	**	**
Saretto, 1540 m	***	**	**	**
Balme, 1452 m	**	**	***	**
Andraz, 1440 m	***	***	*	*
Formazza, 1280 m	***	**	*	*
Cortina, 1250 m	*	*	*	*
Asiago, 1000 m	+	*	**	
Entraque, Lago Piastra 990			*	*
Tonezza, 935 m	*	*	+	
Auronzo, 864 m	***	***	**	*
Ghirlo, 750 m	**	*	+	*

Fig. 4 - Grado di significatività definito con Mann Kendall con il software Mekesens 2.0.

b. Durata del manto nevoso con 5 cm di spessore (dHS5), periodo 1° dicembre – 30 aprile (DJFMA)

L'altezza del manto nevoso con almeno 5 cm di spessore è stata indagata per il periodo da dicembre ad aprile come nel recente lavoro della Svizzera (Buchmann et al. 2022).

I dati relativi alle singole stazioni, elaborati con MK, evidenziano un trend negativo per tutte le stazioni al di sotto dei 2000 m di quota (Fig. 2 e 3), con diversi gradi di significatività (indici * e +) (Fig.4). Il valore del test di Theil–Sen (Q), metodo robusto che si basa sulla regressione lineare della mediana, evidenzia una tendenza negativa anche di oltre -7 giorni decennio per alcune stazioni come Arabba (1630 m), Asiago (1000 m), Balme (1452 m) per arrivare ai -9,4 giorni decennio, pari a -56 giorni, di Auronzo di Cadore (854 m).

Per le stazioni in quota non viene riscontrato nessun trend significativo con il metodo delle mediane (Theil-Sen) mentre con il metodo delle medie viene riscontrato un leggero trend negativo (valori non riportati in tabella) per la maggior parte delle stazioni. Tutte le stazioni di bassa quota sono in negativo mentre in quota, per 2 stazioni, Lago Golliet e Lago Cignana, i rispettivi valori sono positivi. Questa tendenza a locali aumenti della durata del manto nevoso in quota è stata osservata anche nei lavori sulle Alpi della Svizzera (Buchmann et al. 2020) e dell'Austria (Olefs et al. 2021).

Il raggruppamento dei dati per "bassa quota" e "alta quota", includendo in entrambi raggruppamenti le stazioni fra i 1500 m e i 1630 m di quota nella fascia di transizione, elaborati per il periodo 1961-1990, 1991-2020, evidenziano una riduzione netta della durata del manto nevoso alle basse quote di - 6,2 giorni decade (-37,9 giorni) e minore in alta quota -1,5 giorni decade (-9 giorni) (Fig.4b).

			Periodo mesi	Media 1961-1990 giorni	Media 1991-2020 giorni	*Differenza* giorni
a)	**dHS1**	Alta quota (>1500 m)	NDJFMAM	183	175	*-8*
		Bassa quota (<1500 m)	NDJFMAM	125	105	*-20*
b)	**dHS5**	Alta quota (>1500 m)	DJFMA	143	136	*-7*
		Bassa quota (<1500 m)	DJFMA	105	87	*-18*
c)	**dHS30**	Alta quota (>1500 m)	DJFMA	126	112	*-14*
		Bassa quota (<1500 m)	DJFMA	105	45	*-60*
d)	**dHS50**	Alta quota (>1500 m)	DJFMA	108	92	*-16*
		Bassa quota (<1500 m)	DJFMA	47	26	*-21*

Fig. 5 a, b, c, d - Valori caratteristici della durata del manto nevoso per i diversi dHS.

In Fig. 5 b sono riportati i valori riassuntivi dei periodi climatici 1961-1990 e 1991-2020 per il periodo DJFMA. Come si può osservare la diminuzione alle basse quote è del 18% delle giornate mentre alle quote elevate è più contenuta (al 5%).

Nelle Fig. 7 a e Fig. 7 b, oltre ai valori medi per stagione invernale e per trentennio, sono riportati anche i valori per singolo decennio. Gli andamenti evidenziano la progressiva diminuzione, con piccoli "scalini" situati in mezzo ai 2 trentenni e il forte decremento delle decadi finali di entrambi i trentenni (1981-1990 e 2011-2020). L'andamento a bassa quota è molto simile a quello registrato

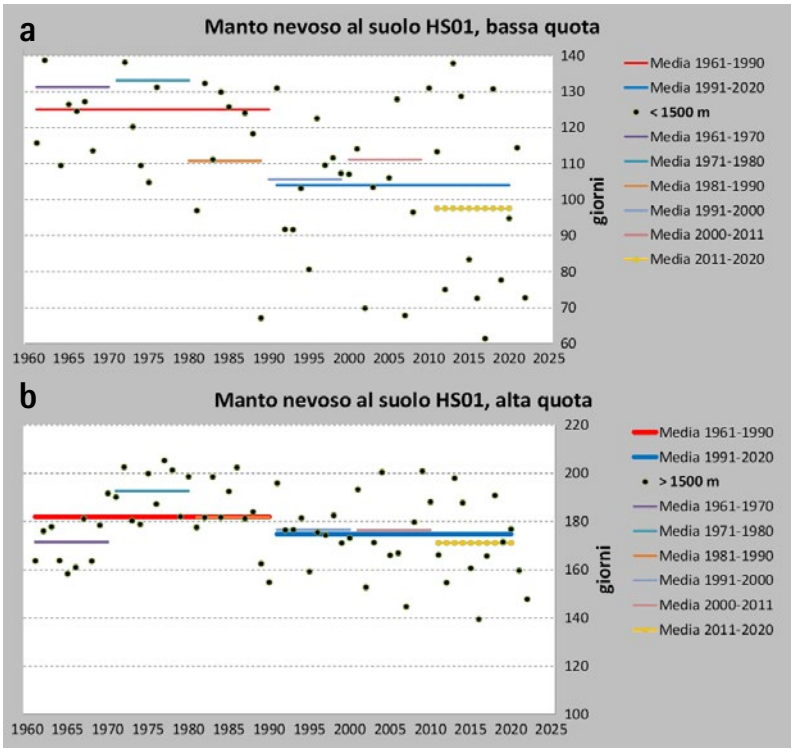

Fig. 6 - a) Andamento dei parametro dHS1 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a bassa quota (< 1500 m); b) Andamento dei parametro dHS1 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a alta quota (> 1500 m).

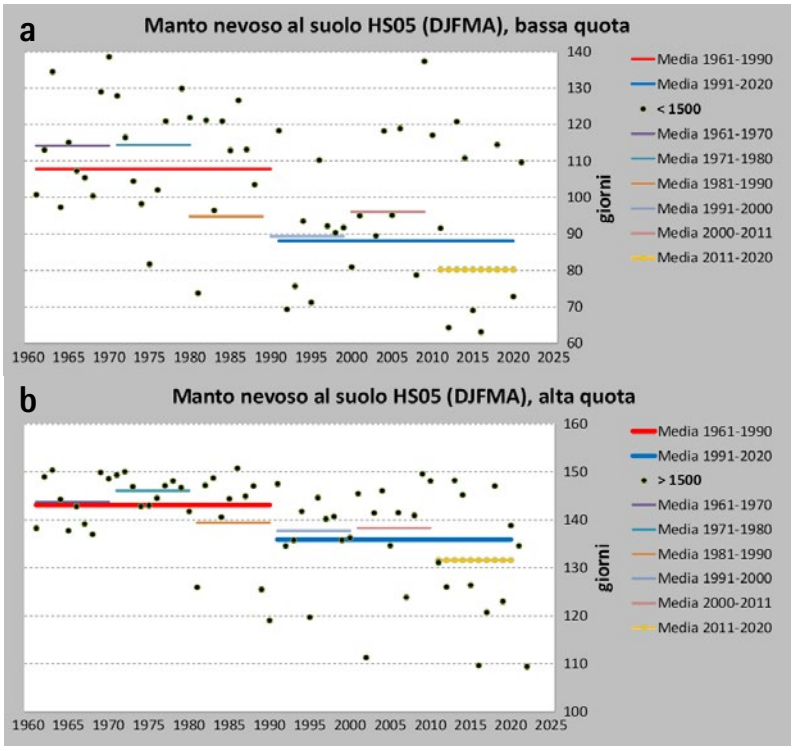

Fig. 7 - a) Andamento dei parametro dHS5 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a bassa quota (< 1500 m); b) Andamento dei parametro dHS5 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a alta quota (> 1500 m).

per dHS1, mentre in quota, l'andamento non è più stazionario ma, dopo il decennio 1971-1980, in generale regressione, più accentuata nel periodo 2011-2020.

c. Durata del manto nevoso con 30 cm di spessore (dHS30), periodo 1° dicembre – 30 aprile (DJFMA)

La durata del manto nevoso con almeno 30 cm di neve al suolo (dHS30) è un parametro molto utilizzato, come per la valutazione della quota della neve sciabile. Il periodo di riferimento è DJFMA, anche se alcuni autori si fermano a metà aprile con le valutazioni.

L'analisi di dHS30 fornisce una prima indicazione sulla variazione della quantità di neve presente in una stagione invernale come durata (giorni) ma anche come spessore di neve (HS).

I risultati statistici indicano un andamento diverso dallo spessore dHS5. Innanzitutto il trend è negativo anche su qualche stazione di alta quota (Cignana, 2137 m; Moncenisio, 2000 m) e il valore aumenta dai -2,6 giorni decade (-15,6 giorni) di Moncenisio a 2000 m fino ai -8/9 giorni decade (-48/54 giorni) nella fascia altimetrica intorno ai 1500 -1600 m, con un massimo di -12,7 giorni decade (-76,2 giorni) alla stazione di Balme (1452 m), per poi diminuire di incremento relativo alle quote più basse, come ad esempio Ghirlo (750 m) - 1 giorno decade o - 5,7 giorni decade (-34,2 giorni) di Lago Piastra (900 m) (Fig. 2 e 3).

Ben 7 le stazioni al di sotto dei 2000 m con trend negativo significativo (rispettivamente con ** e ***) (Fig. 4).

In sintesi, per dHS30 il trend per le stazioni di bassa quota (< 1500 m) è di -5,8 giorni decennio, pari a -35 giorni e di -3,2 giorni decennio, pari a -19 giorni per l'alta quota (> 1500 m) (Fig.4).

I valori calcolati sui 2 trentenni (Fig. 5c) evidenziano una spiccata diminuzione alle basse quote (-35%) e un significativo decremento anche in quota (14 giorni pari al 11%).

Per le stazioni in quota (Fig. 8 a), l'andamento degli ultimi decenni è molto simile fra loro, mentre il decennio 1971-1980 è sempre quello con il maggior numero di giornate. Tuttavia, nell'ultimo trentennio la variabilità è elevata rispetto al 1961-1990. Alle basse quote (Fig.8 b), spicca la decade 2001-2010 con uno scostamento importante rispetto alle adiacenti. Questo è dovuto ad alcune stagioni invernali molto nevose che hanno garantito un buon innevamento anche alle basse quote (esempio inverno 2009).

d. Durata del manto nevoso con 50 cm di spessore (dHS50), periodo 1° dicembre – 30 aprile (DJFMA)

La diminuzione importante dei giorni in quota con dHS30, si fa sentire maggiormente con lo spessore di dHS50.

Oltre i 2000 m di quota, le stazioni non presentano nessun trend significativo con il metodo delle mediane. Solo 3 delle 8 stazioni esaminate hanno una tendenza negativa (Fig. 2 e 3). Nella

fascia altimetrica fra i 2000 e i 1400 m ben 5 stazioni evidenziano un trend negativo con una elevata significatività (** e ***) (Fig. 4).

Il trend alle basse quote e alle alte quote è molto simile e pari rispettivamente a -4,6 giorni decennio e a -4,7 giorni corrispondenti nel periodo 1961-2020 a -27,6 e -28,6 giorni.

Significativa la differenza in termini di giornate fra i 2 trentenni con una diminuzione del 47% alle basse quote e del 15% alle alte quote (Fig. 5d).

In quota, come per dHS30, le recenti 4 decadi sono molto simili come valore assoluto ma con un aumento della variabilità (Fig. 9 a, b). L'andamento dei decenni è simile ai precedenti.

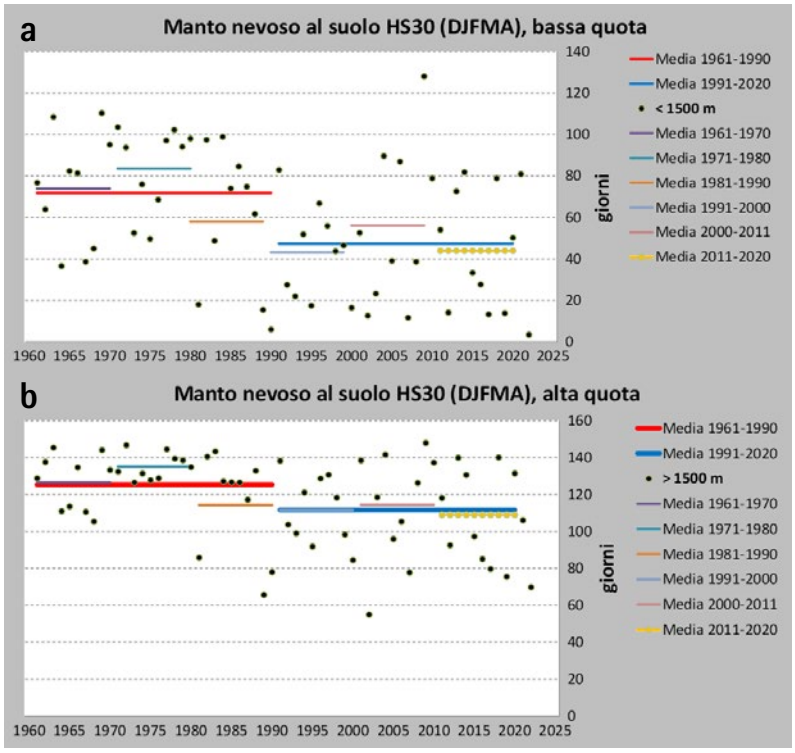

Fig. 8 - a) Andamento dei parametro dHS30 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a bassa quota (< 1500 m); b) Andamento dei parametro dHS30 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a alta quota (> 1500 m).

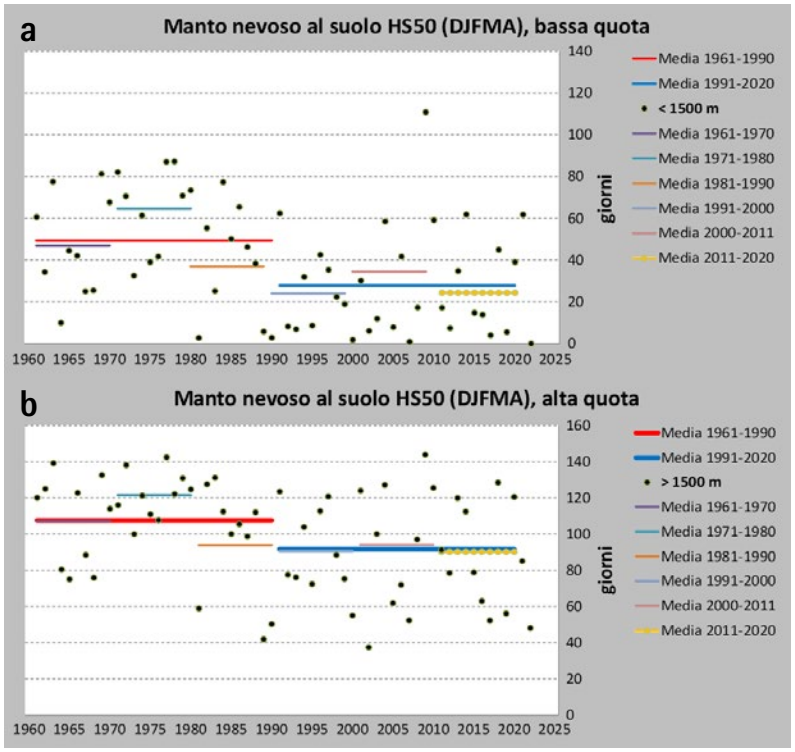

Fig. 9 - a) Andamento dei parametro dHS50 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a bassa quota (< 1500 m); b) Andamento dei parametro dHS50 per decennio e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per i raggruppamenti di stazione a alta quota (> 1500 m).

e. Neve al suolo

In Fig. 10, è rappresentato il valore medio della neve al suolo (HS_{imed}) del trentennio 1961-1990 e 1991-2020 per la fascia altimetrica oltre i 1500 m di quota con andamento giornaliero. Appare subito evidente come il primo periodo abbia un valore decisamente più elevato con una quantità di neve al suolo abbondante specie verso la primavera.

Infatti, nella prima parte dell'inverno, da ottobre a metà gennaio, i due andamenti non si scostano molto fra di loro, con una differenza di 9-10 cm (15-20% del valore dello spessore), per poi divergere molto specie da febbraio, quando il valore di HS_{imed}, rimane stazionario senza significativi incrementi di spessore. Al 28 di febbraio, la differenza è di ben 24 cm, pari al 40% dello spessore e al 31 di marzo di 23 cm pari al 62% dello spessore. Dal mese di marzo in poi la fusione del manto nevoso segue un andamento simile, ma condizionata dal diverso spessore di neve. Lo spessore medio di 5 cm di neve al suolo viene raggiunto 12 giorni prima rispetto al periodo 1961-1990.

Nella fascia altimetrica superiore (Fig.11) l'andamento è simile, con uno scarto minimo fino a metà gennaio per poi aumentare fino al 20% a fine di febbraio, con uno scarto di 25 cm. Nella prima decade del mese di marzo viene raggiunto il massimo valore di HS_{imed} nel periodo recente e poi inizia una accelerata fusione del manto nevoso per tutto marzo. Nella prima decade di aprile viene raggiunto il massimo deficit con oltre 40 cm di spessore medio, pari al 34% dello spessore. La misura di 5 cm di spessore di neve al suolo viene raggiunta 12 giorni prima che nel trentennio recente.

La maggior parte delle stazioni presenta un trend negativo (Fig. 12) nel periodo DJFMA ma con grado di significatività più elevato in MA. Il trend in DJFMA è di -3,3 cm per decennio alle basse quote e maggiore alle quote elevate, con -4,8 cm per decennio a conferma anche del trend negativo elevato degli spessori di dHS30 e dHS50 oltre i 1500 m di quota (DJFMA). Sia in DJF che in MA il trend negativo è maggiore in quota con -3,8 cm decade, che diventa di ben -8,8 cm decade nel periodo MA, mentre alle bas-

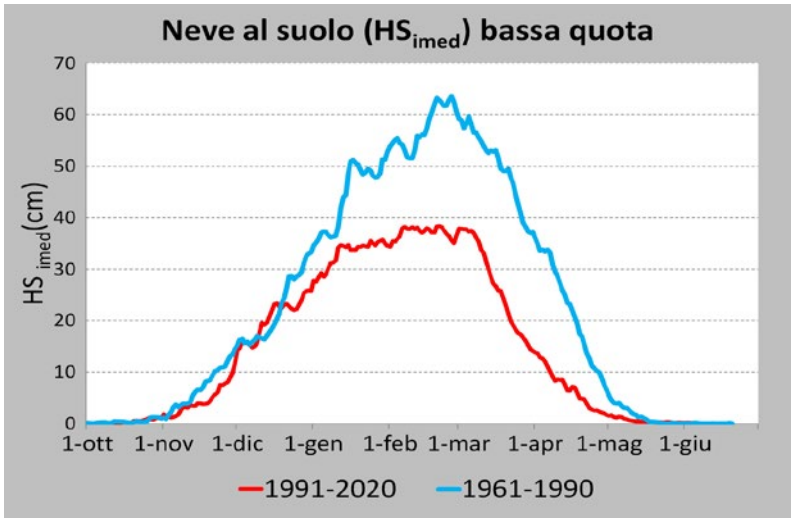

Fig. 10 - Andamento stagionale di HS$_{imed}$ per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per il raggruppamento stazioni bassa quota (< 1500 m).

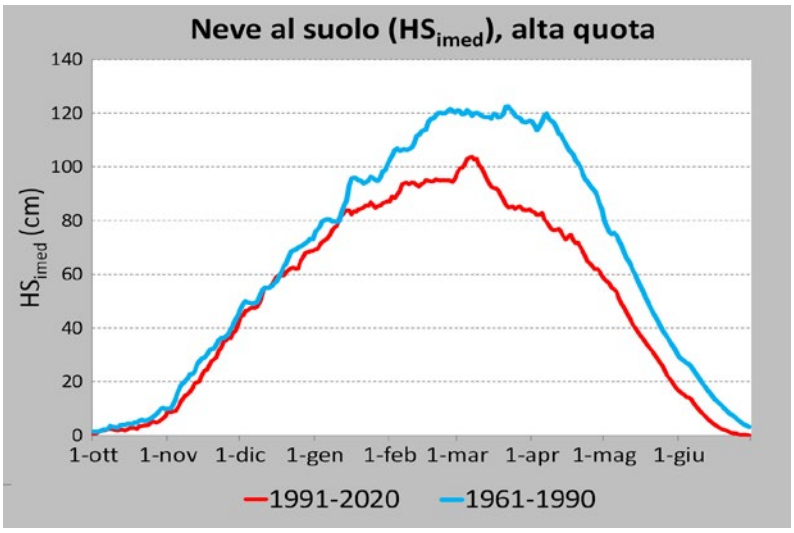

Fig. 11 - Andamento stagionale di HSimed per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per il raggruppamento stazioni alta quota (> 1500 m).

Fig. 12 - Tendenza Q (Theil – Sen Slope) per singola stazione per il parametro HS$_{imed}$ e grado di significatività MANN Kendall elaborato con Mekesens 2.0.

Mann Kendall (MK)	**DJFMA**		**DJF**		**MA**	
Theil-Sen Slope (Q)	**Q**	**MK**	**Q**	**MK**	**Q**	**MK**
Careser, 2600 m	-1,49	**	-0,90	+	-2,21	***
Ceresole Lago Serru, 2275 m	0,55		0,57		0,47	
Cavia, 2100 m	-0,71		-0,44		-1,09	*
Passo Rolle, 2000 m	-0,10		-0,10		-0,56	+
Ussin, 1931 m	-1,12	**	-0,61	*	-1,39	***
Locana-Lago Telessio, 1917 m	-0,38		-0,38		-1,45	**
Gressoney, 1840 m	-0,09		-0,09		-0,24	
Perreres, 1839 m	-0,48		-0,48		-0,92	*
Rhemes Notre Dame, 1775 m	-1,15	***	-1,15	***	-1,69	***
Arabba, 1650 m	-0,27		-0,27		-0,67	+
Paneveggio, 1600 m	-0,06		-0,06		-0,57	*
Ceresole Reale, 1579 m	-0,56	*	-0,56	*	-0,63	**
Andraz, 1450 m	-0,42	+	-0,42	+	-0,62	**
Balme, 1450	-0,44	*	-0,44	*	-0,79	***
Cortina, 1225 m	-0,65	**	-0,59	**	-0,64	***
San Martino, 1200 m	-0,32	*	-0,23		-0,40	*
Oropa, 1180 m	-0,50	*	-0,34		-0,57	*
Falcade, 1150 m	-0,29	*	-0,35	*	-0,11	
Asiago, 1000	-0,12		-0,20	+	-0,03	
Tonezza,985 m	-0,26	*	-0,30	+	-0,19	*
Auronzo, 856 m	-0,14	+	-0,23	*	-0,04	
Ghirlo, 750 m	-0,18	**	-0,26	**	-0,05	**
Rosone, 714 m	-0,12	+	-0,19	+	-0,03	

se quote rimane stazionario (Fig. 13).

I valori caratteristici per trentennio e suddivisi per DJFMA, DJF e MA, confermano l'accentuata diminuzione degli spessori soprattutto in quota e nel periodo MA (Fig. 13), quando viene raggiunto di norma il valore massimo di altezza neve al suolo (HSmax).

L'andamento di HS$_{imed}$ per decennio evidenzia ancora il periodo 1971-80 (Fig. 14) come il maggiormente nevoso, e poi presenta una riduzione con la temporanea ripresa del periodo 2001-2010. In quota (Fig. 15), il periodo con minor spessore medio al suolo è stato il 1980-1989 e i periodi recenti, pur non discostandosi di molto, sono leggermente in ripresa anche se la variabilità è molto accentuata.

f. Neve fresca

Per comprendere meglio gli andamenti della neve al suolo è stata indagata la sommatoria di neve fresca in DJFMA per 23 stazioni, 13 delle quali coincidenti con le stesse di dHS e HS$_{imed}$ (Fig. 1).

Nella Fig. 16 sono riportati i valori statistici di MK e di Theil –Sen per ogni stazione e per i periodi DJF e MA, in Fig.17 i valori caratteristici di precipitazione in cm. Nel periodo DJFMA il 78% delle stazioni hanno un trend negativo e solo 5 positivo (Careser, Passo Rolle, Ceresole Reale, Tonezza e Rosone), in DJF solo Rhemes N.D., oltre alle 5 citate, hanno un trend positivo. Situazione ben diversa nel periodo di marzo-aprile (MA) quando solo Passo Rolle mantiene una positività, mentre tutte le altre stazioni presentano un trend negativo.

Rispetto ai paramenti precedenti sono poche le stazioni con un trend negativo ad elevata significatività.

I valori dei due trentenni, espressi in cm (Fig.18), evidenziano una diminuzione di neve fresca (DJFMA) simile (-38/-36 cm) pari all' 11% in alta quota e al 14,5% alle quote basse rispetto alla media 1961-1990.

In termini assoluti di cm di neve, il deficit è maggiore alle basse quote nel periodo DJF e maggiore alle alte quote in MA.

Il decennio 1971-1980 è stato caratterizzato (Fig. 19 e 20), dalla maggiore nevosità a tutte le quote, e il decennio 1991-2000 è stato invece quello più secco. Il decennio 2011-2020 è stato più nevoso ad alta quota dei precedenti, mentre alle quote basse è sempre il 2001-2010 il più nevoso dell'ultimo trentennio. I dati presentano una grande dispersione degli ultimi 15 anni. Infatti, questi ultimi 3 lustri sono stati caratterizzati da una forte variabilità climatica con inverni molto nevosi (2009, 2010, 2014, 2020 etc.) alternati ad altri molto secchi come il 2012 e 2017.

g. Quota dell'affidabilità della neve naturale per lo sci

La quota della affidabilità della neve naturale (LAN) per lo sci viene definita come la quota dove per almeno 100 giorni, da dicembre ad aprile (DJFMA), la neve rimane al suolo con almeno 30 cm di spessore (dHS30) (Beniston, 1997). Questo criterio viene utilizzato a livello internazionale per descrivere la neve anche dal punto vista di risorsa turistica: Burki (2000) definisce la sopravvivenza di un comprensorio sciistico quando almeno 7 stagioni invernali su 10 abbiano una copertura nevosa fra HS30 e HS50 per almeno 100 giorni da dicembre ad aprile.

Tuttavia la quota dell'affidabilità della neve naturale varia da regione a regione in funzione delle differenze di clima delle Alpi.

Alberg et al. (2007) in "Climate Change in The European Alps – Adapting Winter Tourism and Natural Hazard Management" descrive la situazione delle Alpi con i lavori del tempo. In Svizzera, Föhn (1990) and Laternser e Schneebeli (2003) avevano definito una LAN intorno ai 1200- 1300 m di quota. Wielke et AL. (2004) comparando diversi parametri della neve fra Svizzera e Austria, avevano trovato risultati simili ma a circa 150 m più in quota in Svizzera rispetto all'Austria orientale, indicando una transizione da un clima atlantico - marittimo a uno più continentale. Per incorporare

		Periodo mesi	Media 1961-1990 cm	Media 1991-2020 cm	*Differenza* cm
HS_{imed}	Alta quota (>1500 m)	DJFMA	96	85	*-11*
	Bassa quota (<1500 m)	DJFMA	38	27	*-12*
	Alta quota (>1500 m)	DJF	91	84	*-7*
	Bassa quota (<1500 m)	DJF	40	30	*-10*
	Alta quota (>1500 m)	MA	124	91	*-33*
	Bassa quota (<1500 m)	MA	36	17	*-19*

Fig. 13 - Valori caratteristici per HSimed per i periodi invernali DJFMA, DJF e MA per i trentenni 1961-1990 e 1991-2020.

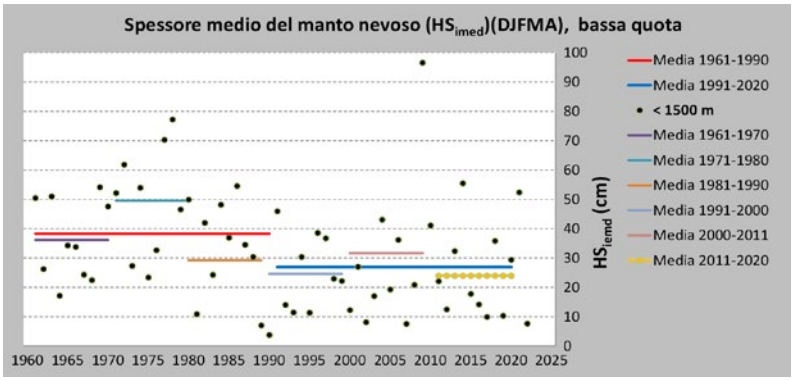

Fig. 14 - Andamento del parametro HSimed per decade e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per le stazioni a bassa quota (< 1500 m).

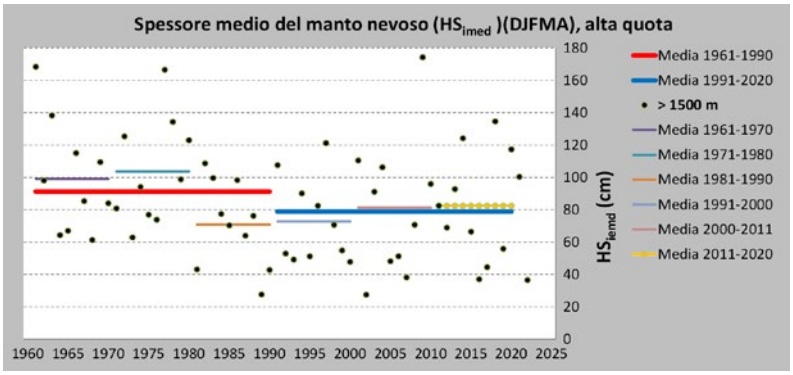

Fig. 15 - Andamento del parametro HSimed per decade e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per le stazioni ad alta quota (> 1500 m).

Fig. 16 - Tendenza Q (Theil – Sen Slope) per singola stazione per il parametro HN (neve fresca) e grado di significatività MANN Kendall elaborato con Mekesens 2.0.

Mann Kendall (MK)	**DJFMA**		**DJF**		**MA**	
Theil-Sen Slope (Q)	**Q**	**MK**	**Q**	**MK**	**Q**	**MK**
Careser, 2600 m	0,15		0,31		-0,12	
Ceresole Lago Serru, 2275 m	-1,43		-0,43		-0,56	
Cavia, 2100 m	-1,68		-1,37	+	-0,41	
Passo Rolle, 2000 m	0,53		0,13		0,55	
Ussin, 1931 m	-0,43		-0,30		-0,30	*
Locana-Lago Telessio, 1917 m	-1,82		-1,75	*	-1,77	*
Gressoney, 1840 m	-0,29		-0,19		0,00	
Perreres, 1839 m	-1,33		-0,05		-1,33	**
Rhemes Notre Dame, 1775 m	-0,19		0,53		-0,38	
Arabba, 1650 m	-0,52		-0,39		-0,19	
Paneveggio, 1600 m	-2,49	**	-1,68	**	-0,67	
Ceresole Reale, 1579 m	0,00		0,13		0,00	
Andraz, 1450 m	-1,87	+	-1,36	+	-0,26	
Balme, 1450	-0,43		-0,09		-0,20	
Cortina, 1225 m	-2,17	*	-1,07		-0,61	
San Martino, 1200 m	-0,96		-0,74		-0,25	
Oropa, 1180 m	-0,62		-0,44		-0,32	
Falcade, 1150 m	-1,77	*	-0,91		-0,50	
Asiago, 1000	-0,84	+	-0,48		-0,32	
Tonezza,985 m	0,04		0,27		0,00	
Auronzo, 856 m	-0,71	*	-0,54	+	-0,01	
Ghirlo, 750 m	-1,30	*	-0,80	+	-0,15	
Rosone, 714 m	0,46		0,49		0,00	

H N (neve fresca, cm)	1961-1990 DJFMA	1991-2020 DJFMA	Scarto	1961-1990 DJF	1991-2020 DJF	Scarto	1961-1990 MA	1991-2020 MA	Scarto
Careser, 2600 m	355	357	1,98667	206	214	8,07333	148	142	-6,0867
Ceresole Lago Serru, 2275 m	462	409	-52,87	256	229	-26,929	206	180	-25,941
Cavia, 2100 m	521	440	-81,662	284	240	-44,659	237	200	-37,003
Passo Rolle, 2000 m	343	346	3,07586	196	198	2,87931	148	148	0,19655
Ussin, 1931 m	159	157	-1,4	116	128	11,5	43	30	-12,9
Locana-Lago Telessio, 1917 m	436	362	-74,333	236	216	-20,533	200	146	-53,8
Gressoney, 1840 m	328	296	-31,681	191	186	-4,8024	137	110	-26,879
Perreres, 1839 m	330	278	-51,864	209	202	-7,3379	121	76	-44,526
Rhemes Notre Dame, 1775 m	333	300	-33,166	211	208	-3,4057	122	92	-29,76
Arabba, 1650 m	322	302	-19,604	196	190	-6,7004	125	113	-12,903
Paneveggio, 1600 m	290	200	-90,467	184	122	-62,167	106	78	-28,3
Ceresole Reale, 1579 m	293	268	-25,133	191	184	-6,5	103	84	-18,633
Balme, 1450	293	219	-73,933	224	169	-54,533	69	49	-19,4
Andraz, 1450 m	229	199	-30,5	146	132	-13,467	84	67	-17,033
Cortina, 1225 m	260	173	-87,283	175	122	-53,017	85	51	-34,267
San Martino, 1200 m	239	240	0,6119	145	147	1,67143	94	93	-1,0595
Oropa, 1180 m	224	188	-36,367	153	133	-20,167	71	55	-16,2
Falcade, 1150 m	279	224	-54,833	176	149	-26,9	103	75	-27,933
Asiago, 1000	155	109	-46,367	106	81	-25,5	49	28	-20,867
Tonezza,985 m	185	169	-16,233	126	121	-4,7333	59	48	-11,5
Auronzo, 856 m	101	74	-26,733	83	63	-19,667	19	11	-7,0667
Ghirlo, 750 m	132	89	-42,833	106	72	-33,433	26	17	-9,4
Rosone, 714 m	74	81	7,56667	62	70	8,83333	12	11	-1,2667

		Periodo mesi	Media 1961-1990 cm	Media 1991-2020 cm	*Differenza* cm
HN	Alta quota (>1500 m)	DJFMA	348	310	*-38*
	Bassa quota (<1500 m)	DJFMA	205	169	*-36*
	Alta quota (>1500 m)	DJF	206	193	*-13*
	Bassa quota (<1500 m)	DJF	141	120	*-21*
	Alta quota (>1500 m)	MA	141	117	*-25*
	Bassa quota (<1500 m)	MA	64	49	*-15*

Fig. 17 - Valori caratterisici per sintola stazione e parametro per i 2 periodi 1961-1990 (30 anni) e 1991-2020 e differenza. La colorazione indica i range di tendenza.

Fig. 18 - Valori caratteristici di HN il periodo invernali DJFMA, DJF e MA per i trentenni 1961-1990 e 1991-2020.

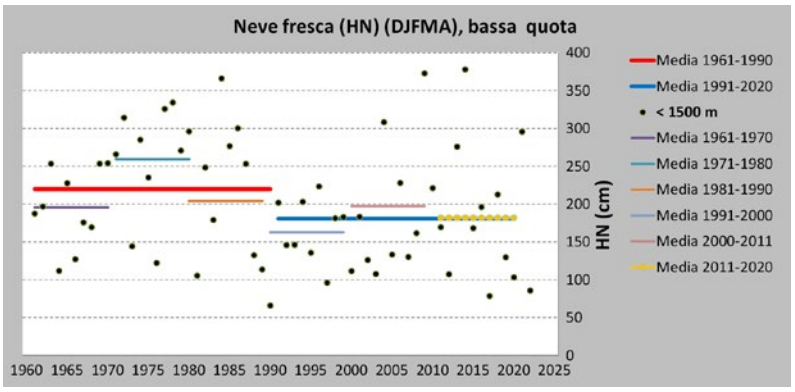

Fig. 19 - Andamento del parametro HN per decade e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per le stazioni a bassa quota (< 1500 m).

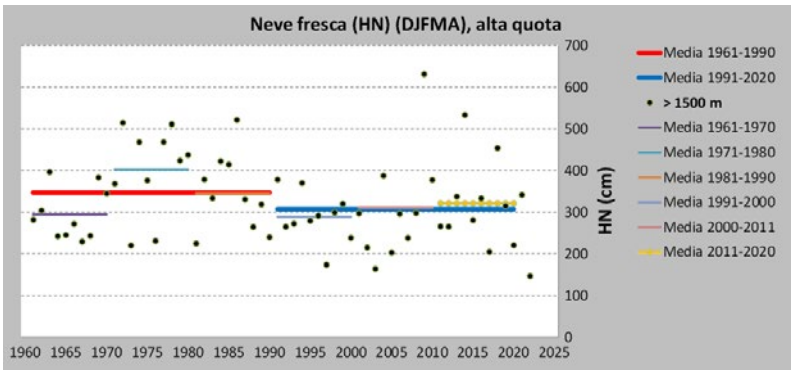

Fig. 20 - Andamento del parametro HN per decade e per i periodi 1961-1990 e 1991-2020 per le stazioni ad alta quota (> 1500 m).

l'effetto della continentalità (inverni più freddi nelle zone più orientali delle Alpi), la linea di base dell'affidabilità naturale della neve, stabilita per la Svizzera, era stata abbassata di 150 m, cioè 1050 m per l'Austria orientale rimanendo invariata a 1200 m di quota per l'Austria occidentale e la Svizzera, e innalzata di 300 m per i climi mediterranei. Ne è risultato che la maggior parte dei comprensori sciistici della Francia avevano una LAN a 1500 m, eccetto per Isère, Savoia e Alta Savoia a 1200 m, per la Svizzera a 1200 m, per l'Austria occidentale a 1200 m e a 1050 m per la parte orientale, per la Germania a 1050 m e 1200 m e per l'Italia tutti i comprensori sciistici a 1500 m. Recenti lavori hanno studiato l'impatto dell'aumento della temperatura per la Spagna (Luis Campos et al. 2018), la Svizzera (esp. Schmucki et al., 2015,) e per l'Austria (esp. Olefs et al. 2020), indicando anche i possibili scenari futuri. Per quanto riguarda l'arco alpino italiano (Fig. 21), la quota LAN è passata dai 1511 m del periodo 1961-1990 ai 1750 m di quota del 1991-2020. Il periodo con la quota più bassa è stato il 1971-1980 per poi gradualmente risalire fino oltre i 1800 m di quota del 2011-2020. La variabilità delle stagioni è più marcata nel tempo recente rispetto ai primi decenni. La serie annuale evidenzia un trend positivo con una buona significatività (**) e con un valore di circa 73 metri di quota a decennio.

DISCUSSIONE

Nella Fig. 22 viene riassunta la variazione della durata del manto nevoso, con diversi spessori, fra i 2 trentenni di riferimento climatico: 1961-1990 e 1991-2020, come scarto percentuale.

Alle basse quote la diminuzione delle giornate con gli spessori minori (dHS1 e dHS5) e con gli spessori maggiori (dHS30 e dHS50), pur con valori assoluti diversi, sono dello stesso ordine di grandezza. La differenza fra il primo e il secondo trentennio, espressa come percentuale, evidenzia una netta riduzione di dHS30 e dHS50 alle basse

quote (-34/-44%) che determina una possibile minor massa di neve al suolo al di sotto dei 1500 m. Significativa è la differenza fra dHS5 e dHS30 che varia relativamente di poco oltre i 1500 m, da -5% a -15% pari a 6 punti percentuali, mentre alle basse quote il divario è di ben 16 punti percentuali, da -18% a -34%.

La situazione delle Alpi italiane, per quanto riguarda la durata della neve con i diversi spessori, è stata messa in relazione (Fig. 23) con i valori determinati per l'Austria (Buchmann et al. 2022) (Fig. 23 a) e la Svizzera (Olefs et al. 2020) (Fig. 23 b) per valutare se sussistono degli andamenti simili.

Nei confronti fra Austria e Italia (ricalcolati in funzione del data set austriaco) appare evidente che oltre i 2000 m di quota i valori siano molto simili, mentre alle quote inferiori il divario della durata della copertura nevosa è molto accentuato in Italia nella fascia fra i 1000 e i 2000 m. Questa notevole differenza è anche in linea con i risultati di Matiu et al., 2020.

Per quanto riguarda le Alpi svizzere, alle quote inferiori ai 1500 m, la riduzione degli spessori sono simili con tutti gli spessori di neve indagati. Oltre i 1500 m di quota, la riduzione di giornate è maggiore sul versante della Svizzera, con uno scarto ridotto di 5-7 giornate in generale.

L'andamento dello spessore medio del manto nevoso HS_{imed} evidenzia meglio la variazione del manto nevoso fra i 2 trentenni, indicando anche il periodo della stagione invernale dove avviene il cambiamento.

Confrontando l'andamento dei 2 trentenni, a bassa e alta quota di HS_{imed} nella serie giornaliera (Fig. 10 e 11), gli spessori di neve al suolo hanno variato regime dal 1991 al 2020 soprattutto da metà gennaio in poi. Questa situazione può essere ricondotta ad un minor apporto di neve fresca o a periodi inusuali di fusione del manto nevoso specie alle basse quote, conseguenza di un generale riscaldamento. Oltre alla fusione potrebbe sussistere un cambiamento di regime della precipitazione, più liquida che solida alle basse quote. In questo lavoro non viene indagato su questa ipotesi, ma potrebbe dare indicazioni importanti sull'andamento stagionale della neve al suolo.

Osservando l'andamento medio dei diversi decenni, il cambiamento di regime è avvenuto nel 1981-1990 dopo il periodo nevoso 1971-80. Gli spessori si attestano, sia alle basse quote che in alto, su un range di valori più basso.

Il punto di cambiamento di regime (breakpoint) per la bassa quota (<1500 m) è stato individuato nel 1987 (Fig. 24) e nel 1980 per le alte quote (> 1500 m) (Fig. 25). Tuttavia gli intervalli di confidenza del 90% sono alquanto ampi e quindi queste stagioni, se pur indicative, presentano un certo margine di incertezza.

Questo andamento della neve al suolo, decisamente più abbondante nel trentennio 1961-1990 e anche più duraturo nella stagione, può motivare anche il forte sviluppo di comprensori sciistici a bassa quota di quel periodo, con skilift nei fondovalle e a ridosso dei paesi.

La mancanza di neve a bassa quota, iniziata a fine degli anni '80 e proseguita per il decennio successivo, ha portato alla scomparsa di tutti questi piccoli comprensori. Questa considerazione va al di là della quantità di neve in pista per un'ottima sciata che lo sciatore di quei tempi richiedeva rispetto alle esigenze dello sci moderno.

Alcuni siti riportano oltre 300 le piccole stazioni dismesse, forse non tutte per la mancanza di neve ma per gran parte di loro la non sostenibilità economia è iniziata con una quota neve più elevata.

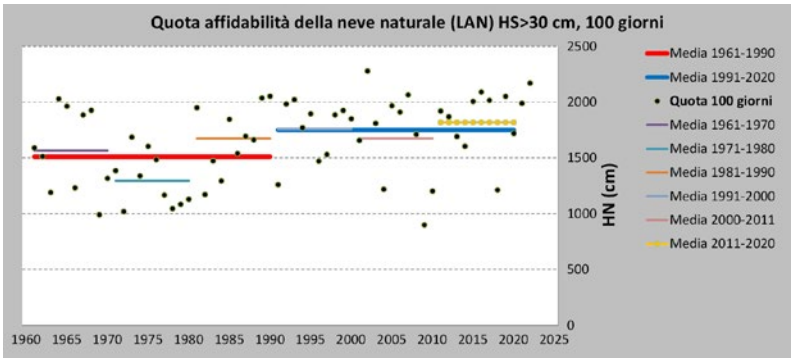

Fig. 21 - Andamento della quota della neve naturale affidabile per lo sci.

Fig. 22 - Scarto percentuale della durata del manto nevoso per parametro dHS.

Fig. 23 - Confronto fra settori dell'arco alpino per alcuni parametri del manto nevoso.

	Periodo	Differenza fra il periodo 1961-90 e 1991-2020 espresso in % e in (giorni) per diversi spessori di neve	
	mesi	Bassa quota (< 1500 m)	Alta quota (> 1500 m)
dHS1	DJFMA	-16% (-20)	-4% (-8)
dHS5	DJFMA	-18% (-19)	-5% (-7)
dHS30	DJFMA	-34% (-24)	-11% (-14)
dHS50	DJFMA	-44% (-22)	-15% (-16)

		Periodo mesi	500-1000 m giorni	1000 -1500 m giorni	1500-2000 m giorni	2000-2500 m giorni
Austria 1962-2020	**dHS1**	NDJFMA	-26,4	-15,6	-5,9	-0,6
Italia 1961-2020	**dHS1**	NDJFMA	-36,2	-34,6	-23,5	-3,2

a)

			500- 1500 m	1500 - 2500 m
Svizzera 1961-2020	**dHS5**	DJFMA	-31,9	-14,6
Italia 1961-2020	**dHS5**	DJFMA	-38,9	-9
Svizzera 1961-2020	**dHS30**	DJFMA	-34,2	-25.8
Italia 1961-2020	**dHS30**	DJFMA	-37,2	-19,2
Svizzera 1961-2020	**dHS50**	DJFMA	-28,2	-32,4
Italia 1961-2020	**dHS50**	DJFMA	-30,2	-28,2

b)

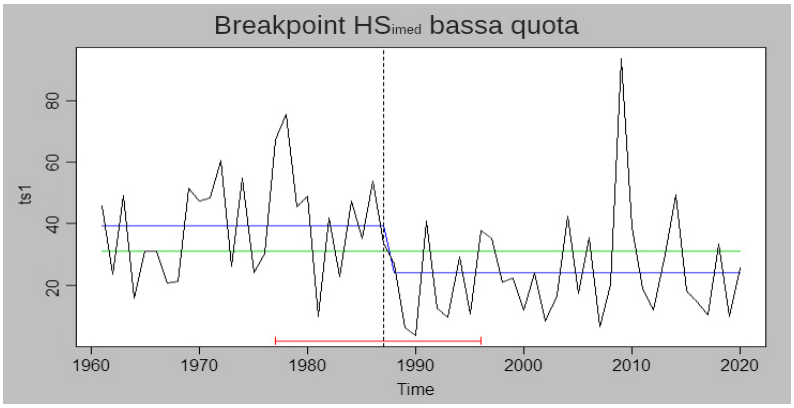

Fig. 24 - Discontinuità di HS_{imed} per le stazioni in bassa quota.

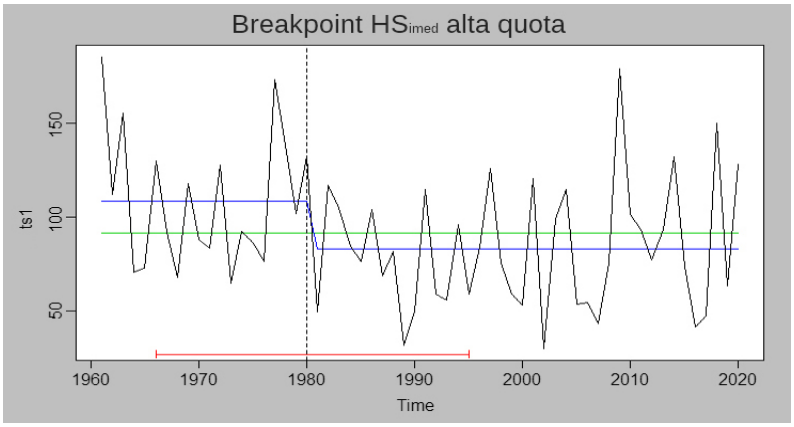

Fig. 25 - Discontinuità di HS_{imed} per le stazioni in alta quota.

L'analisi della precipitazione nevosa (HN), che dovrebbe indicare una spiccata riduzione in considerazione dei trend negativi con una elevata significatività MK riscontrati elaborazioni di dHS 1,5,30, 50 e di HS_{imed}, evidenzia un'anomalia. Infatti le stazioni hanno trend negativi ma con una significatività più bassa degli altri parametri indagati. Questo evidenzia che l'andamento della neve fresca non è l'elemento decisivo per la presenza e permanenza della neve al suolo sia in termini di spessori che di durata.

Infatti HS_{imed} indica chiaramente e in modo assai robusto un trend alla diminuzione. Pertanto una possibile causa è che a parità di precipitazione non corrisponda un aumento degli spessori di neve suolo e questo per 2 possibili motivi:

- elevate temperature dopo le precipitazioni nevose, che accelerano il metamorfismo e la fusione del manto nevoso
- periodi invernali con temperature miti, che favoriscono la fusione del manto nevoso e la riduzione degli spessori di neve, così che le nevicate successive non hanno un impatto positivo sugli spessori assoluti.

Fra l'altro alcune ricerche hanno evidenziato una stazionarietà della precipitazione invernale (AA.VV, 2015) misurata con i pluviometri, con tutti i difetti della sottostima, e questa avallerebbe la maggior frequenza di possibili periodi di fusione del manto nevoso a parità di precipitazione (liquida+solida).

Per quanto riguarda la quota della neve affidabile (LAN), alcuni autori svizzeri (Föhn, 1990, Haeberli e Beniston, 1998) hanno stimato che per un incremento della temperatura media dell'aria di 1°C, la quota della LAN sarebbe aumentata di 150 m.

Per quanto riguarda il versante italiano delle Alpi, le prime elaborazioni indicano un aumento della temperatura di +1,1°C DJFMA fra i 2 trentenni (Valt e Cianfarra, 2022; Valt, 2022). L'aumento di quota della LAN è stato di 240 m, che ricalcolato all'unità di temperatura corrisponderebbe a 218 m di innalzamento di quota della LAN per +1°C di aumento della temperatura.

Anche il trend elaborato con i singoli valori annuali, indica un trend positivo ad alta significatività (***) per la temperatura dell'aria (DJFMA) (Q=0,34 °C per decennio). Il trend negativo per la LAN, determinato con le quote stazionali è pari a Q= 72,79 m per decennio. Rapportando l'incremento della temperatura dell'aria e la diminuzione della LAN risulta che per ogni grado centigrado di incremento della temperatura dell'aria la LAN si innalza di 213 m di quota sulle Alpi italiane, che non si discosta molto dal valore climatico. Questo trend, riferito ad un'area con un clima mediterraneo è maggiore di quello definito per le Alpi svizzere da Föhn (1990), Haeberli e Beniston (1998), caratterizzate da un clima alpino e in parte continentale.

TENDENZE FUTURE

La copertura nevosa presenta forti variazioni naturali da un anno all'altro e reagisce alle variazioni della temperatura e delle precipitazioni.

Poiché la temperatura dell'aria è il parametro più robusto dei modelli climatici, gli scenari per l'evoluzione futura del manto nevoso sono più attendibili alle quote con una forte sensibilità alla temperatura, cioè alle basse e medie quote (fino a 1500-2000 m). Oltre i 2000 m, pur con le variazioni di temperature previste, farà comunque freddo coscchè nevichi e l'evoluzione futura del manto nevoso dipenderà dalla quantità delle precipitazioni e quindi dagli scenari meteorologici futuri.

Secondo alcuni autori, anche in futuro (2021-2050), la neve naturale mostrerà un'ampia variabilità di anno in anno e una variabilità multidecadale che potrà mascherare l'effetto del riscaldamento a lungo termine su scala regionale.

Tuttavia le simulazioni dei modelli climatici regionali mostrano una drastica diminuzione sia della durata della copertura nevosa sia della risorsa idrica in Europa entro la fine del XXI secolo.

Per le Alpi a un'altitudine di 1500 m le simulazioni recenti prevedono una riduzione della SWE dell'80-90% entro la fine del secolo.

Tuttavia, va notato che l'aumento della temperatura dell'aria previsto per i prossimi decenni è accompagnato da grandi incertezze sui cambiamenti delle precipi-

tazioni invernali. Per l'Europa continentale i modelli climatici non mostrano una chiara variazione delle precipitazioni fino al 2050 e un leggero aumento delle precipitazioni invernali.

Il clima futuro molto probabilmente non consentirà l'esistenza di una copertura nevosa permanente durante l'estate, anche alle quote più elevate delle Alpi ove si pratica lo sci estivo, con ovvie implicazioni per i ghiacciai rimanenti.

A causa del progressivo riscaldamento, i vincoli per la produzione di neve programmata aumenteranno fortemente nelle Alpi europee, soprattutto a basse e medie altitudini fino a circa 1500 m, poiché le fasce orarie per la produzione di neve si ridurranno fortemente a tutte le quote (le tecnologie odierne hanno limiti tecnici legati alla temperatura).

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati indagati gli spessori di neve al suolo con 1, 5, 30 e 50 cm, la distribuzione annuale della neve al suolo, la quantità di neve fresca caduta e la quota dell'affidabilità della neve naturale al suolo. Per ogni parametro sono stati definiti i valori caratteristici del trentennio 1961-1990 e 1991-2020 con i dovuti confronti.

La quantità di neve al suolo, in tutti i suoi aspetti, è diminuita nel trentennio recente specie alle basse quote (> 1500 m) più sensibili all'aumento globale della temperatura. Alle quote superiori nevica di meno e gli spessori di neve al suolo sono in diminuzione in tutti i parametri anche se sussistono singole stazioni con parametri in crescita. Il confronto con il versante settentrionale delle Alpi ha dato delle risposte simili per il settore più occidentale (Svizzera) mentre la continentalità dell'Austria evidenzia ancora sostanziali differenze nell'innevamento.

La quota di affidabilità della neve naturale è in innalzamento, indicando una maggior possibilità di sciabilità per i comprensori ad alta quota. Le elaborazioni sul periodo di 60 anni evidenziano un incremento della quota della neve di 213 m per ogni aumento di 1°C della temperatura.

RIGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato possibile grazie all'opera di osservazione e registrazione dei dati da parte di tutti gli osservatori neve dell'arco alpino che nel corso degli anni si sono avvicendati. Un particolare ringraziamento alla Compagnia Valdostana delle Acque - CVA S.p.A per aver messo a disposizione la sua banca dati, alla Società Meteorologica Italiana, in particolare a Daniele Cat Betto per i dati storici delle Alpi e i suggerimenti, ad ENEL per una parte dei dati nelle Alpi orientali.

Bibliografia

- IPCC, 2018. Global warming of 1.5°C. In: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse GasEmission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to theThreat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, https://www.ipcc.ch/sr15/
- Steiger R., Posch E., Tappainer G. e Walde J. (2020) The impact of climate change on demand of ski tourism - a simulation study based on stated preferences. Ecological Economics 170 (2020) https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106589
- Shih,C., Nicholls, S., Holecek, D.F., 2009. Impact of weather on downhill ski lift ticketsales. J. Travel Res. 47 (3), 359–372 https://doi.org/10.1177/00472875083212
- JFC. (2018). Skipass Panorama Turismo. Situazione congiunturale Montagna Bianca Italiana. Modena. Pag. 51. www.jfc.it
- Notarnicola C. (2022). Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. Scientifc Reports | (2022) 12:13731. https://doi.org/10.1038/s41598-022-16743-w
- Matiu, M. et al. (2021) Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. Cryosphere 15, 1343–1382. https://doi.org/10. 5194/tc-15-1343-202
- Crespi A., Matiu M., Bertoldi G. Petitta M., e M. Zebisch. (2021). A high-resolution gridded dataset of daily temperature and precipitation records (1980–2018) for Trentino-South Tyrol (north-eastern Italian Alps . Earth Syst. Sci. Data, 13, 2801–2818, 2021. https://doi.org/10.5194/essd-13-2801-2021
- Olefs M., Formayer H., Gobiet A., Marke T., Schoner W. e M.Revesz. (2021). Past and future changes of the Austrian climate – Importance for tourism. Journal of Outdoor Recreation and Tourism Volume 34, June 2021, 100395 https://doi.org/10.1016/j.jort.2021.100395 Buchmann M., Resch G., Brgert M., Brönnimann S. , Chimani B., Schöner W. e C. Marty (2022) Homogenizing Swiss Snow e depth seried – Impact on decadal trends and extremes Preprint egusphere-2022-715 https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-715
- Valt, M., e P. Cianfarra. (2010). Recent snow cover variability in the Italian Alps. Cold Regions Science and Technology, 64, 146-157
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric test against trend. Econometrica 1945, 13, 245–259
- Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods, 4th ed.; Charles Griffin: London, UK, .
- Salmi T., Määttä A., Pia Anttila, Tuija Ruoho-Airola (2002) Detecting Trends of Annual values of atmospheric Pollutant the Mann-Kendall Test and Sen'Slope etimates the excel template application Makesens. Publications on air quality No. 31 Finnish Meteorological Institute, Helsinki 2002. Pag. 35. https://www.researchgate.net/publication/259357030_MAKESENS_10xls
- Sen, P. K. (1968)."Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau." JASA, 1379-1389.
- Theil, H. (1950) "A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis."Reprinted in 1992 in Henri Theil's contributions to economics and econometrics, Springer, 345-381.
- ISPRA (2022) Valori climatici normali di temperatura e precipitazione in Italia. ISPRA, Stato dell'Ambiente 99/2022 ISBN 978-88-448-1120-4
- Olef M., Koch R., Schöner W. e T. Marke. (2020). Changes in Snow Depth, Snow Cover Duration, and Potential Snowwmaking Conditions in Austria, 1961- 2020. A model Based Approach. Atmosphere 2020, 11(12), 1330; https://doi.org/10.3390/atmos11121330
- AA.VV. (2015).Il clima del Tirolo, Alto Adige, Bellunese, Pag. 102 http://www.clima-alpino.eu/download
- Beniston, M. (1997) Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: Links to changes in largescale climatic forcings. Clim. Chang. 1997, 36, 281–300.
- Buerki R (2000): Klimaaenderung und Anpassungsprozesse im Wintertourismus. Ostschweizerische Geographische Gesellschaft NF H. 6, St. Gallen
- OECD, (2007). Climate change in the European Alps. S. Agarwala (ed.), OECD Publications, Paris, p. 127.
- Foehn, P.M., (1990). Schnee und Lawinen. In: Schnee, Eis und Wasser in der Alpen in einer waermeren Atmosphaere, Mitteil. VAW/ETH Zuerich, Nr. 108, S. pp. 33-48
- Laternser, M., Schneebeli, M., (2003). Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). Int J Climatol 23(7):733–750. doi:10.1002/ joc.912
- Wielke, L.M., Haimberger, L., Hantel, M., (2004). Snow cover duration in Switzerland compared to Austria. Meteorol Z 13(1):13–17. doi:10.1127/0941-2948/2004/0013-0013
- Campos Rodrigues L., Freire-González J., González Puig A. e Puig-Ventosa I. (2018). Climate Change Adaptation of Alpine Ski Tourism in Spain. Climate 2018, 6(2), 29; https://doi.org/10.3390/cli6020029
- Schmucki E., Marty C., Fierz C., Weingartner R. e M.Lehning. (2015) Impact of climate change in Switzerland on socio economic snow indices Theoretical and Applied Climatology 127(3-4) DOI:10.1007/s00704-015-1676-7
- Valt M. e P. Cianfarra (2022). L'inverno 2021-22 sulle Alpi italiane. Neve e valanghe- Speciale stagione invernale 2021-22, pagg. 10-23
- Valt M. (2022). Gli ultimi 30 anni di "Nostra signora dell'inverno. Professione Montagna Anno XXXV n. 166, settembre/ottobre 2022 pag. 76-79