

EVENTI DI PIOGGIA SU NEVE (ROS) nelle Alpi meridionali

Di Mauro Valt

ARPAV-Centro Valanghe di Arabba, Via Arabba-Pradat, 5,
32020 Livinallongo del Col di Lana (BL)- ITALY
Mauro.valt@arpa.veneto.it

Rain-on-snow (ROS) events in the Southern Alps

Winter precipitation in the Alps does not show any particular trends. However, especially in the last 40 years, snow depths on the ground have decreased, the share of reliable snow has increased, the amount of new snow has decreased as well as the SWE snow resource has contracted. Thus, rain-on-snow episodes are increasing as already pointed out by some authors. Investigating in AINEVA's Italian avalanche services database, an increase in rain-on-snow episodes was found at all elevations, even above 2200 m altitude. The analysis conducted on 20 years of data verified that on days with rain-on-snow events, spontaneous medium and large avalanche activity also appears to be more frequent.

The analysis conducted in the Dolomites on a 6 stations at different elevations further verified the increase in rainy days, especially in February and at medium and low elevations. In the survey area, the number of days with precipitation in the period 2016-2025 decreased by 25 percent, thus indicating more intense episodes as the total precipitation does not show such important changes.

The number of snow days decreased by 33% further indicating the change in snow/rain regime. Over the past 30 years, the snow/rain line has risen by as much as 240 m in January and more than 420 m in February.

Sulle Alpi le precipitazioni invernali, in mm di acqua equivalente non, evidenziano particolari tendenze. Tuttavia, specie negli ultimi 40 anni, gli spessori di neve al suolo si sono ridotti, l'altitudine della neve affidabile è salita, la quantità di neve fresca si è ridotta, così come la risorsa nivale SWE si è contratta. Sono quindi in aumento gli episodi di pioggia su neve, come evidenziato già da alcuni autori. Indagando nel database dei Servizi valanghe italiani di AINEVA, è stato riscontrato un aumento degli episodi di pioggia sulla neve a tutte le quote, anche oltre i 2200 m di quota. L'analisi condotta su 20 anni di dati ha permesso di verificare che nelle giornate con eventi di pioggia su neve, anche l'attività valanghiva spontanea di medie e grandi valanghe sembra più frequente.

L'analisi condotta nelle Dolomiti su 6 stazioni a diverse quote, ha permesso di verificare ulteriormente l'aumento dei giorni di pioggia, specie nel mese di febbraio e alle quote medie e basse. Nell'area di indagine il numero di giornate con precipitazioni nel periodo 2016-2025 è diminuito del 25%, quindi con episodi più intensi in quanto la precipitazione totale non evidenzia così importanti variazioni.

Il numero di giornate nevose è diminuito del 33% ad indicare ulteriormente il cambiamento di regime neve/pioggia. Negli ultimi 30 anni, il limite neve/pioggia si è innalzato di ben 240 m nel mese di gennaio e di oltre 420 m nel mese di febbraio.



NEVE INTRODUZIONE

Foto 1 (pagina precedente)
Colonne di ghiaccio nel
manto nevoso "flow
fingers". Stazione di Col dei
Baldi, 1900 m. Primavera
2025. L'acqua trova i
percorsi preferenziali per
trasferirsi per gravità e
capillarità. Foto Renato
Zasso

Il manto nevoso ha un ruolo importante per diversi aspetti, dall'ecosistema alpino, al sistema economico della montagna e in generale nel bilancio energetico del pianeta. L'estensione della copertura nevosa (Snow Cover Area-SCA), gli spessori di neve al suolo (HS), la durata della stagione invernale (HSday) e il contributo come risorsa idrica nivale (Snow Water Equivalent, SWE) sono oggetto di monitoraggio a livello planetario.

Negli ultimi anni la SCA ha subito importanti variazioni di estensione anche sull'arco alpino, anche a causa dell'aumento delle temperature (Notarnicola, 2022).

Infatti l'analisi condotta su una base di oltre 800 stazioni delle Alpi nel periodo 1971-2019 (Matiu et al. 2021) ha evidenziato un trend negativo di HS sull'85% delle stazioni e solo un trend positivo del 15% generalmente per le stazioni in quota. La copertura nevosa è diminuita maggiormente sulle stazioni al di sotto dei 2000 m specie sulle Alpi meridionali (principalmente in 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 rispettivamente 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).

Secondo Marty et al. (2017, 2023) la risorsa idrica nivale (SWE) ha mostrato una diminuzione significativa negli ultimi 6 decenni nelle Alpi, più pronunciata durante la primavera che durante l'inverno, con neve sempre più umida e variabile. Nelle Alpi orientali la riduzione della neve negli ultimi 30 anni (1991-2020) è evidente soprattutto nel mese di marzo con una diminuzione importata della risorsa nivale (SWE) (Valt, 2023).

Anche sulle Alpi orientali è stata osservata una diminuzione della precipitazione nevosa nel mese di febbraio in quota e nei mesi di gennaio e marzo a bassa quota (Valt, 2024) con forti ripercussioni sugli spessori della neve al suolo.

Bozzoli et al. (2024) hanno analizzato 46

serie storiche di dati di neve fresca (HN) dell'Arco alpino nel periodo 1920-2020 evidenziando una forte diminuzione della precipitazione nevosa specie negli ultimi 40 anni. Determinante è stato il ruolo che ha avuto l'aumento della temperatura dell'aria come fattore principale del cambiamento di fase neve/pioggia, poiché non sono state osservate variazioni significative dei quantitativi di precipitazione invernale (pioggia + neve fusa).

Sulle Alpi meridionali, nel periodo 1961-2025 la quota di affidabilità della neve naturale (Beniston, 1997) è aumentata di 233 m per ogni aumento di 1 °C della temperatura media dell'aria (Valt et al., 2022). Nelle ultime stagioni invernali si è attestata intorno ai 2000 m, rispetto ai 1750 m del periodo 1991-2020.

Quindi, anche in accordo con le conclusioni di Bozzoli et al. (2024), è da ipotizzare un aumento degli episodi di pioggia in inverno ed in particolare di eventi di pioggia sul manto nevoso.

Nel presente lavoro viene analizzata la problematica della neve su pioggia (Rain on Snow, ROS), alcuni effetti relativi al manto nevoso e al distacco di valanghe, l'andamento degli eventi negli ultimi 20 anni e il cambiamento di regime neve fresca/pioggia per alcune stazioni campione.

PIOGGIA SU NEVE (RAIN ON SNOW)

La pioggia su neve (ROS) si verifica nei periodi in cui le precipitazioni liquide cadono su un manto nevoso preesistente, sia che questo accada sulle Alpi che nelle zone polari.

La pioggia innesca processi di fusione del manto nevoso in zone dove la neve rimarrebbe stabile e fredda, determinando un inizio precoce dell'ablazione e, secondo Choen et al. (2015), questo porterebbe ad una maggior esposizione del suolo al sole e all'aria calda che a sua volta, in alcune zone alpine, determina terreni più asciutti in estate con ampie complicazioni ambientali ed ecologiche.

L'aumento delle temperature osservato nella Svizzera nord orientale nel periodo 1960-2015 (Beniston & Stoffel, 2016), ha

contribuito direttamente all'aumento di eventi di pioggia su neve del 40% alle basse quote e del 200% alle quote elevate. Sempre secondo Beniston & Stoffel i risultati di un semplice modello di neve basato sulla temperatura dell'aria dimostrano che il numero di eventi di ROS potrebbe aumentare di quasi il 50% con temperature di 2-4 °C più calde di quelle attuali, per poi diminuire quando le temperature superano i 4 °C, questo perché verrebbe addirittura a mancare.

La probabilità di un maggior numero di eventi ROS suggerisce che i rischi di inondazione in un clima futuro potrebbero effettivamente peggiorare prima di migliorare. Questi cambiamenti previsti nelle variabili climatiche avranno un forte impatto sui processi idrometeorologici, tra cui l'accumulo di neve al suolo e le dinamiche di fusione del manto nevoso. Si prevedono dei cambiamenti nell'intensità e nella distribuzione delle precipitazioni con un innalzamento del limite pioggia/neve.

Nell'emisfero settentrionale, si prevede che i ROS diventino più intensi con inverni più caldi, che determinerebbero il passaggio dalle precipitazioni solide a quelle liquide, aumentando il rischio di inondazioni (es. Musselman et al, 2018).

Le proiezioni future per le regioni montuose indicano un aumento complessivo dei ROS nella parte centrale della stagione invernale (da novembre a marzo) poiché una maggior quantità di precipitazione cadrà sotto forma di pioggia invece che di neve (li Jeong e Sushama, 2017); al contrario ma anche di conseguenza, si prevede una diminuzione dei ROS, ad inizio e fine inverno, a diretta conseguenza della diminuzione del periodo con neve al suolo.

Tuttavia, secondo Sezen et al. (2020) non è ancora del tutto chiaro come i cambiamenti climatici influenzeranno il ROS, a causa della loro natura complessa.

GLI EFFETTI SULLA DEL MANTO NEVOSO

Gli effetti della pioggia sulla neve sono in generale ancora poco noti.

In ambiente artico questi episodi determi-

nano la formazione di una crosta di ghiaccio che può avere gravi conseguenze per la fauna selvatica, le infrastrutture e le comunità (percorsi ghiacciati per le motoslitte). In Scandinavia e nel Canada settentrionale ad esempio, le renne e i caribù sono in sofferenza alimentare per l'aumento degli eventi di pioggia che poi rigela sulla neve. Nel 2003, nell'isola di Banks nell'artico canadese, più di 20.000 buoi muschiati sono morti perché non riuscivano a rompere la crosta di ghiaccio per procurarsi il cibo. In situazioni più miti, la pioggia non determina direttamente la fusione del manto nevoso.

In generale l'impatto della pioggia modifica la forma dei grani in superficie e quindi l'albedo che si abbassa, con aumento dell'assorbimento di energia della neve e può aumentare lo SWE del manto nevoso. Se il manto nevoso ha già temperature vicine alla fusione ($T=0^{\circ}\text{C}$) la pioggia accelera la fusione della neve, mentre se il manto nevoso è freddo ($T<0^{\circ}\text{C}$), si formano croste di ghiaccio, lenti e colonne di ghiaccio (Foto 1).

Il manto nevoso non si comporta come un mezzo di assorbimento uniforme della pioggia. Infatti l'acqua penetra nel manto cercando i percorsi a minor resistenza utilizzando l'attrazione capillare per attraversare la neve, formando quelli che si chiamano "flow fingers", ovvero percorsi di flusso preferenziali (colonne di ghiac-

cio). L'acqua riscalda la neve quel tanto che basta per farsi strada, facilitando così il passaggio di tutta l'altra acqua piovana, senza bisogno di riscaldare in modo uniforme il manto nevoso.

Una questione molto importante e in fase di studio è come considerare gli eventi di pioggia su neve nel contesto del bilancio energetico del manto nevoso che controlla la quantità complessiva di fusione della neve e la sua dinamica (Brandt et al. 2022). Sebbene il calore fornito dalla pioggia sia una fonte piuttosto secondaria per la fusione - di solito il 10% del bilancio energetico totale a lungo termine (Li et al., 2019) - l'apporto di calore è più importante per la fusione a breve termine (Hotovy e Jenicek, 2020). Il calore della pioggia può contribuire a più del 25% dell'energia totale accessibile per la fusione della neve durante i giorni di pioggia intensa, accelerandola e di conseguenza aumentando i deflussi. Inoltre, secondo Mark et al. (1998) e Garvermann et al. (2014), gli episodi piovosi sono spesso associati ad un evento aggiuntivo di calore turbolento (sensibile e latente); anche la radiazione a onde lunghe può accelerare la fusione (Sezen et al. 2020).

I ROS sono anche un importante fattore scatenante delle valanghe nei climi marittimi, in quanto la pioggia indebolisce i legami fra i vari grani di neve riducendo la resistenza strutturale del manto nevoso (Conway et al., 1988; Conway & Raymond,

1993; Heywood, 1988, Singh et al., 1997).

Gli eventi di pioggia modificano la stabilità del manto nevoso superficiale aumentando l'instabilità specie in presenza di spessori nella norma (se c'è poca neve al suolo, gli effetti sono meno evidenti). In ambiente artico abbiamo documentate situazioni di grandi valanghe spontanee conseguenti a pioggia su neve in Groenlandia nell'aprile del 2016 (Abermann et al., 2019), nel 2021-2022 e nelle Svalbard nel gennaio 2010 e marzo 2011 (Eckerstrofen & Christiansen, 2011; Vickers et al. 2024).

Dal punto di vista idrologico, le alluvioni associate ad eventi di pioggia su neve, come l'alluvione del 1966 nel Bellunese, hanno una lunga storia di danni materiali, inondazioni e perdite di vite umane (Musselman et al. 2018). Tuttavia la fusione e le piogge contribuiscono simultaneamente al deflusso ed è difficile distinguere i 2 eventi sebbene alcuni studi (Wayand et al., 2015) abbiano tentato di quantificare i contributi separatamente. Con il modello di simulazione SnowPack, nella sua elaborazione dei valori di SWE puntuali, in alcuni episodi è stato possibile distinguere il contributo della pioggia sulla neve e quello della fusione contemporanea.

Singh et al. (1997) hanno indagato sui meccanismi responsabili dell'elevato deflusso durante gli episodi di intense precipitazioni sulla neve e hanno osservato che si verifica un elevato flusso a causa del maggior

Foto 2 - Valanghe di medie dimensioni dopo un evento di pioggia su neve con interessamento di una pista da sci (chiusa al momento dell'evento).



Figura 1: Alpi meridionali. Numero di giornate da dicembre a febbraio (DJF) con osservazione di venti di pioggia sulla neve.

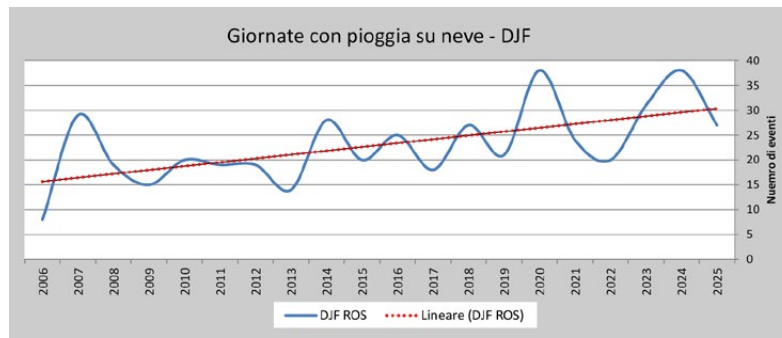


Figura 2: Alpi meridionali. Andamento degli eventi di pioggia su neve nella fascia altimetrica fra i 1500 e i 1800 m di quota.

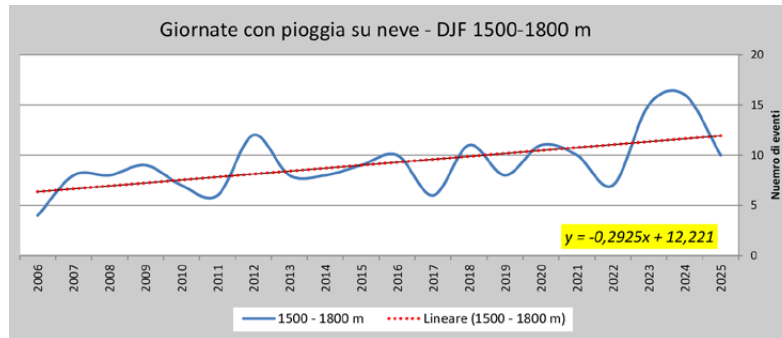


Figura 3: Alpi meridionali. Andamento degli eventi di pioggia su neve nella fascia altimetrica fra i 1800 e i 2200 m di quota.

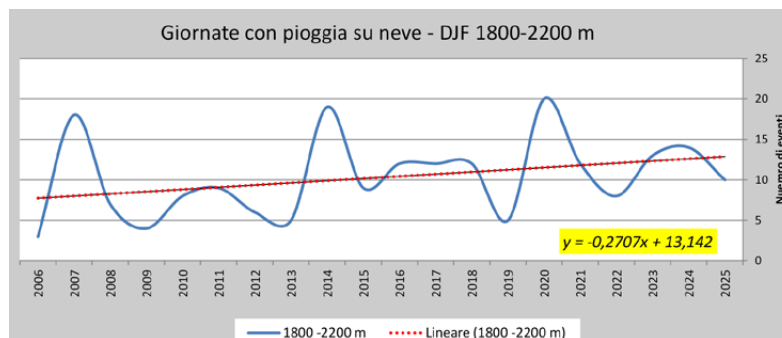
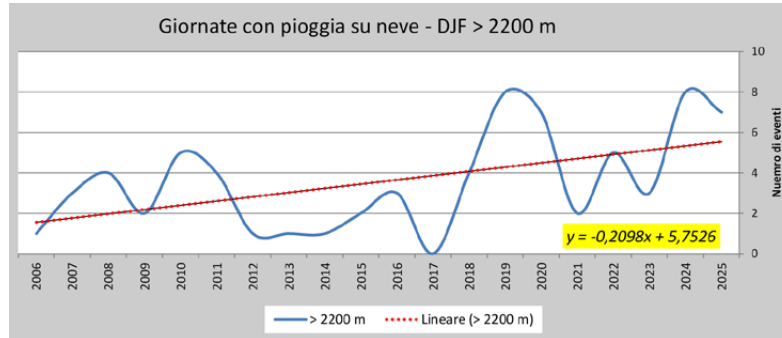


Figura 4: Alpi meridionali. Andamento degli eventi di pioggia su neve osservati nelle stazioni oltre i 2200 m di quota.



movimento di acqua liquida attraverso il manto nevoso ormai saturo (a velocità fino a 6 m/h) rispetto alla percolazione della fusione nelle nevi a cielo sereno (velocità tipiche inferiori a 1 m/h). Il maggior deflusso avviene a seguito del metamorfismo della microstruttura del manto nevoso e della formazione di percorsi di flusso preferenziali nei manti nevosi saturi. Secondo Wever et al., (2016) questi flussi preferenziali e la posizione di ristagno dell'acqua all'interno del manto nevoso possono influenzare la formazione delle valanghe di neve bagnata (Foto 2).

PIOGGIA SU NEVE SULLE ALPI ITALIANE

Area di studio e dati utilizzati

L'area oggetto di indagine per studiare la frequenza degli eventi di pioggia su neve è il versante meridionale delle Alpi monitorato dai Servizi valanghe associati in AINEVA (www.aineva.it), dalle Alpi Marittime a ovest fino alle Alpi Giulie ad oriente. Ogni Servizio valanghe gestisce una propria rete manuale di monitoraggio giornaliero del manto nevoso tradizionale (Cagnati, 2003) dove un tecnico specializzato, ogni giorno

alla mattina, effettua delle misure e delle osservazioni riassunte in un modulo codificato denominato (MOD 1 AINEVA). I campi neve hanno una distribuzione altimetrica e spaziale nel territorio di competenza che varia da Servizio a Servizio in funzione di ogni singola organizzazione. I dati, archiviati a livello locale, confluiscono anche nel data base di AINEVA dove sono condivisi fra tutti i Servizi.

Per distinguere gli eventi di pioggia su neve, sia in presenza di neve fresca che in assenza di precipitazione tipicamente nevosa, sono state utilizzate diverse osservazioni nei campi neve.

Nelle osservazioni meteorologiche definite come "condizioni del tempo" - sigla WW - la pioggia è ben codificata per segnalare la sua intensità: da "pioggia debole intermittente" a "rovescio di pioggia" con ben 7 classi alle quali si aggiunge il "rovescio di neve mista a pioggia" nella sezione "nevicata". Inoltre, nelle osservazioni dei "dati nivometrici", per i campi HS e HN, sussiste una codificazione per indicare la pioggia su neve anche in assenza di misurazione di neve fresca (HN) e quando la neve fresca è stata interessata da pioggia.

Discriminando nel database tutti questi episodi, che spesso sono ridondati come segnalazione ma coerenti, è stato possibile identificare le giornate con pioggia sulla neve a livello di Arco alpino italiano. Sono stati analizzati i dati dal 2006 al 2025 (20 stagioni invernali), utilizzando una base di oltre 200 stazioni distribuite fra i 155 m e i 3325 m di quota, per oltre 800.000 osservazioni giornaliere.

Primi risultati

Nel database di AINEVA (2006-2025) sono state ricercate tutte le giornate in cui l'osservatore ha segnalato la pioggia nelle precedenti 24 ore, sia come evento meteorologico (Campo WW) sia sulla neve (HS, HN). Le giornate con pioggia, relative ad ogni singola stazione, sono state raggruppate in 4 fasce altimetriche: al di sotto dei 1500 m, fra i 1500 e 1800 m di quota, fra 1800 e 2200 e sopra i 2200 m.

Si è deciso di analizzare gli episodi sopra i 1500 m di quota per ricercare un eventuale segnale di trend dove si ritiene che l'eventuale variazione di regime neve/pioggia

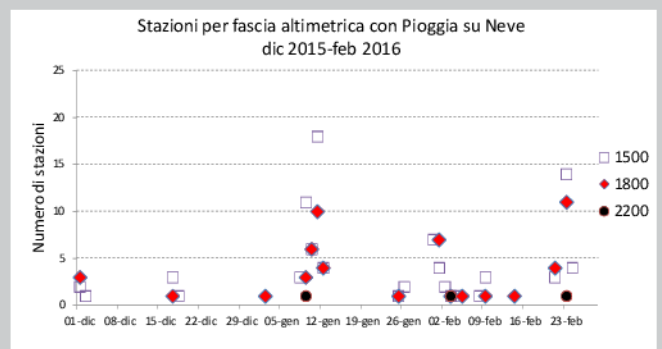
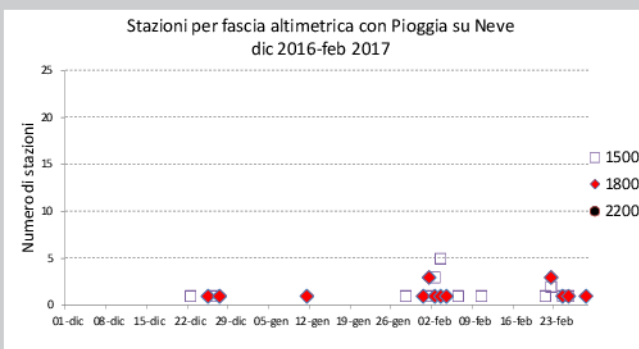
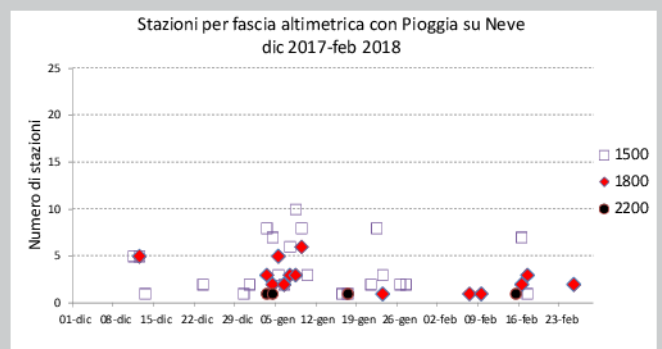
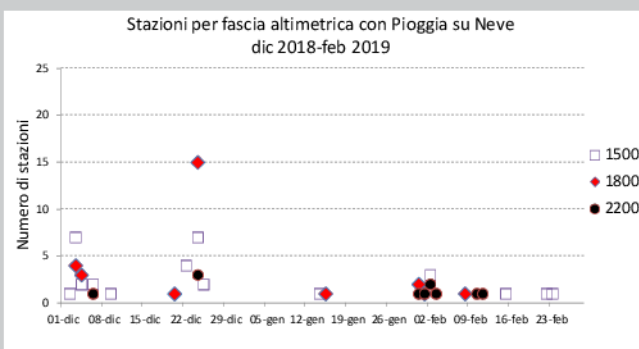
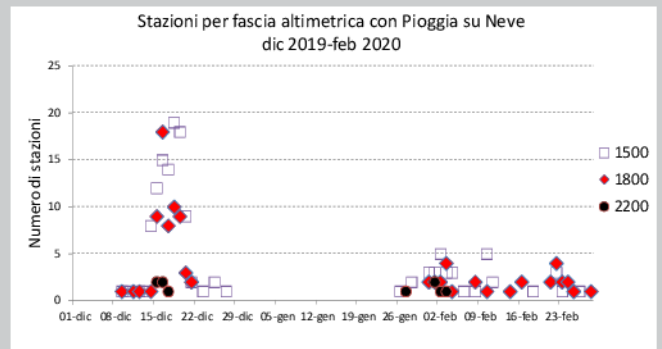
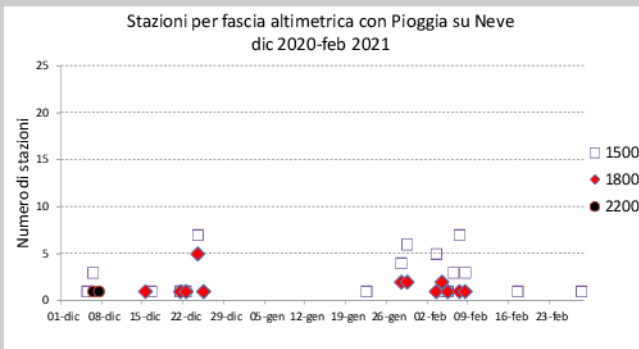
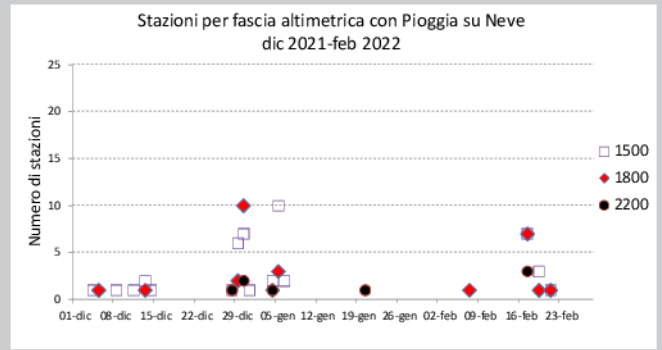
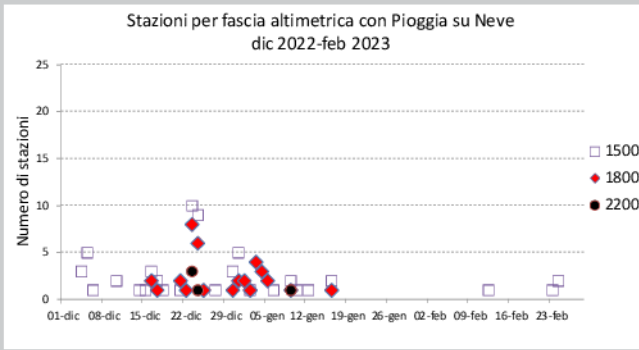
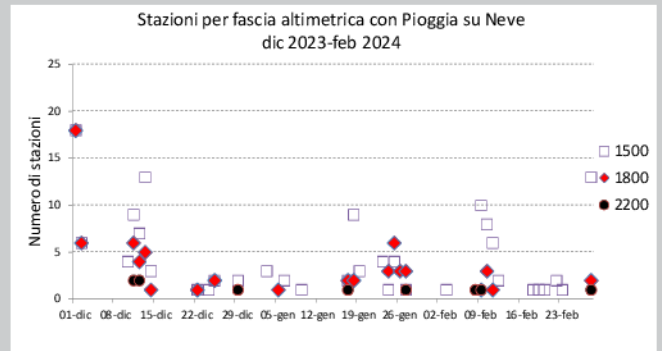
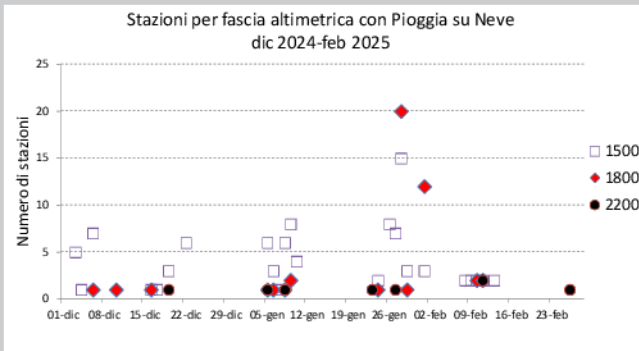


Figura 5: Alpi meridionali. Episodi di pioggia su neve osservati presso le diverse stazioni AINEVA sulle Alpi meridionali da dicembre a febbraio suddivise per fasce altimetriche. Sull'asse delle ordinate il numero di stazioni con pioggia su neve.



Per capire come varia il rapporto neve/pioggia, sono stati indagati gli episodi di pioggia (senza neve fresca) e di neve fresca (anche con pioggia) per alcune stazioni delle Dolomiti ubicate a diverse quote e precisamente:

- ▶ Cima Pradazzo – Passo Valles, 2200 m
- ▶ Arabba, 1630 m
- ▶ Cortina d'Ampezzo, 1200 m
- ▶ Falcade, 1150 m
- ▶ Auronzo di Cadore, 850 m
- ▶ Cencenighe Agordino, 750 m.

Per queste stazioni sono a disposizione i dati giornalieri di neve fresca e i dati di pioggia delle precedenti 24 ore, rilevati alle ore 8:00 del mattino.

Sono stati presi in considerazione tutti i valori di precipitazione piovosa, anche inferiori a 1 mm. I pluviometri delle stazioni automatiche utilizzate sono di tipo riscaldato e quindi in inverno sottostimano la quantità di precipitazione, pur indicando la precipitazione: per questo sono stati presi tutti i valori.

In alcuni casi, nei mesi di gennaio e febbraio, si è osservata la mancanza di dati di precipitazione (in genere pochi mm) anche in presenza di neve fresca. Questo ha portato, in alcune stazioni, ad avere più neviccate che eventi di precipitazione: questo è un tipico problema di misurazione della precipitazione in climi freddi assai noto.

Per ogni stazione sono stati calcolati i giorni con neve fresca e rapportati ai giorni totali del mese con precipitazione. Avendo a disposizione 30 e più anni di dati, le elaborazioni sono state estrapolate per i decenni 1996-2005, 2006-2015 e 2016-2025. In questo modo è possibile osservare l'andamento del rapporto neve/eventi di precipitazione.

Nella Fig. 7 si nota come in alcuni casi le neviccate monitorate siano state superiori ai valori misurati dal pluviometro, quindi con una percentuale superiore al 100%, come a Falcade nel mese di febbraio del decennio 1996-2005 o ad Arabba. In generale l'andamento del decennio 2016-2025 evidenzia una diminuzione degli eventi nevosi rispetto al decennio precedente 2006-2015. Il decennio 2006-2015 sembra in effetti più nevoso anche del 1996-2005 anche se la consistenza dei dati di input in alcuni casi,

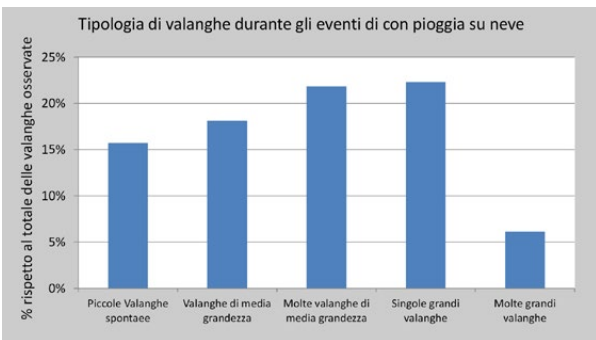


Foto 3 - Valanghe di medie dimensioni dopo un evento di pioggia su neve con interessamento di una via di comunicazione (chiusa al momento dell'evento).

Figura 6: Alpi meridionali. Tipologia di valanghe osservate in seguito ad una precipitazione con neve al suolo. Gli istogrammi rappresentano la percentuale di tipologia di valanga con episodi di pioggia su neve rispetto agli eventi senza pioggia segnalata.segnalata.

possa essere più evidente. I risultati sono stati raggruppati per singolo evento giornaliero in relazione alla fascia altimetrica più elevata e per numero di stazioni con pioggia per giorno.

Nella Fig. 1 è riportato il numero di giornate con pioggia segnalata oltre i 1500 m di quota per il periodo dicembre-febbraio. I risultati evidenziano un trend positivo con una certa oscillazione fra stagioni con più eventi e altre meno.

Anche l'analisi per singola fascia altimetrica (Fig. 2, 3, 4) evidenzia un trend positivo, maggiore nella fascia 1500-1800 e minore oltre i 2200 m di quota.

Nella Fig. 5 viene presentato, per singola stagione invernale nel periodo 2016-2025, il numero di stazioni con episodi di pioggia su neve da dicembre a febbraio suddivise per fasce altimetriche; in questa collezione di figure è possibile distinguere i vari eventi apprezzandone anche l'intensità (numero più elevato di osservazioni per fascia altimetrica). Ad esempio la stagione invernale 2023-2024 è stata caratterizzata da frequenti episodi di pioggia fino in quota. Nella stagione precedente gli episodi si sono verificati per la maggior parte nella prima metà dell'inverno.

Attività valanghiva e pioggia su neve

L'osservazione dell'attività valanghiva dal campo di osservazione manuale è sempre molto difficile durante le precipitazioni per la poca visibilità. Quindi analizzando i dati di "valanghe osservate" durante le precipitazioni nevose e di pioggia su neve, c'è una netta dominanza di "attività non rilevabile", associata spesso a "visibilità cattiva- meno di 1000 m sull'orizzonte".

Pertanto sono stati utilizzati i dati delle valanghe osservate di tutta la stagione invernale e per tutte le quote per valutare una corrispondenza con le tipologie di eventi. L'indagine è stata condotta sul periodo 2006-2025, che ha evidenziato che il 17% delle segnalazioni di valanghe avviene durante gli episodi di neve su pioggia (Foto 3). E' interessante notare che oltre il 22% delle segnalazioni riguardano la casistica di "molte valanghe di medie dimensioni" e "singole grandi valanghe". Queste percentuali, maggiori rispetto al dato generale, fanno supporre che in caso di pioggia su neve, la possibilità di valanghe di medie e grandi dimensioni sia maggiore (Fig.6).

VARIAZIONE DEL REGIME NEVE PIOGGIA NELLE DOLOMITI

L'aumento degli episodi di pioggia sulla neve, a parità di quantità di precipitazione finale, indica che piove di più in montagna a scapito della nevicata; del resto le analisi condotte da Bozzoli et al. (2024) sulla quantità di neve fresca, da Matiu et al. (2020) sulla neve al suolo e da Valt (2024) sullo SWE, sono fra loro in accordo.

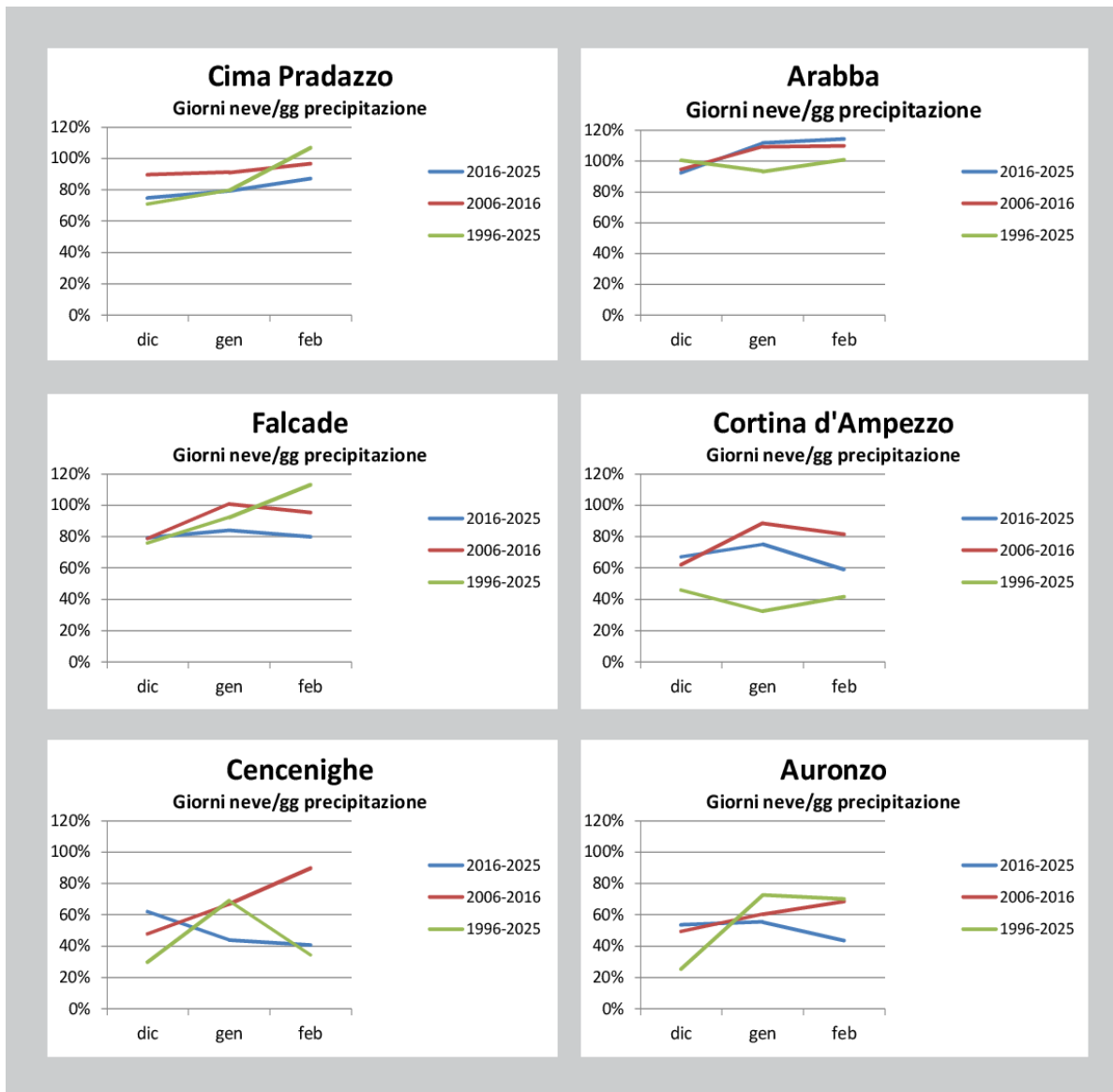


Figura 7: Alpi meridionali-Dolomiti. Percentuale di nevicate rispetto al totale degli eventi mensili di precipitazione, suddivisi per decenni e per stazioni della montagna veneta. Nel decennio recente (2006-2015) la percentuale si è fortemente abbassata specie a bassa quota e nel mese di febbraio.

come per Cortina, lascia dei dubbi. Durante l'ultimo decennio le stazioni in quota, Cima Pradazzo e Arabba, nel mese di febbraio hanno una percentuale più elevata di neve dei due mesi precedenti mentre per le altre stazioni, più a bassa quota, gli eventi di pioggia diventano molto più frequenti rispetto ai mesi precedenti.

Per quanto riguarda le giornate effettive medie di precipitazioni nevose e di pioggia, si osserva una diminuzione delle giornate con precipitazioni del 25% e del 33% delle giornate di neve (Fig. 8) nel decennio recente rispetto al precedente.

Precipitazioni in Dolomiti

Per le stazioni indagate delle Dolomiti, il trend di precipitazione cumulato dei mesi di dicembre-gennaio e febbraio, calcolato sul periodo 1996-2025, è positivo (Fig. 9). Per il mese di gennaio, il trend è contenuto

in tutte le stazioni mentre per dicembre e febbraio è molto più elevato.

Andamento dello zero termico nella libera atmosfera

Utilizzando i dati giornalieri di precipitazione di Arabba (1630 m) dei mesi DJF, è stato selezionato il valore di quota dello zero termico (Z.T.) rilevato nella libera atmosfera dalla stazione di radiosondaggio di Udine Rivolto (<https://www.meteonetwork.it/radiosondaggi/attuale.php?dett=16045>) per il periodo 1996-2025.

L'analisi condotta ha evidenziato un innalzamento della quota dello Z.T. in occasione delle nevicate in tutti e 3 i mesi invernali. La Fig. 10 illustra gli andamenti dei mesi di dicembre, gennaio e febbraio nei tre decenni. La quota dello zero termico si abbassa molto nei mesi di gennaio e febbraio per il periodo 1996-2005 e 2006-2015 mentre,

nel periodo recente, la quota si innalza da dicembre a gennaio per poi avere una lieve flessione. Se nel mese di dicembre la quota rimane pressoché stazionaria nei tre periodi, nel mese di gennaio si innalza progressivamente di 100 e 140 m circa, mentre a febbraio si innalza di ben 85 e 342 m per una differenza fra il 1996-2005 e 2016-2025 di quasi 430 m di quota.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state analizzate le osservazioni e misure effettuate in più di 200 campi nivometrici dell'arco alpino meridionale durante le ultime 20 stagioni invernali, per ricercare se gli episodi di pioggia su neve sono più frequenti. Molti studi evidenziano che i quantitativi di precipitazione, come mm di pioggia equivalente durante l'inverno (DJF), non sono variati di molto

Figura 8: Alpi meridionali-Dolomiti. Numero di giornate con pioggia o con neve per decennio (valore medio) per alcune stazioni della montagna veneta

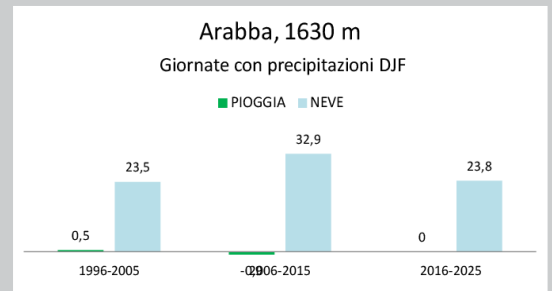
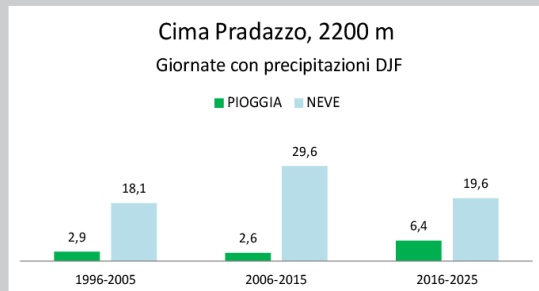


Figura 9: Alpi meridionali-Dolomiti. Valore medio della precipitazione in mm nel periodo DJF. Il trend è positivo anche se la media per decennio, evidenzia una leggera diminuzione nel periodo recente.

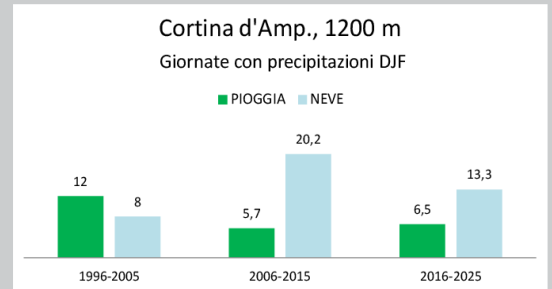
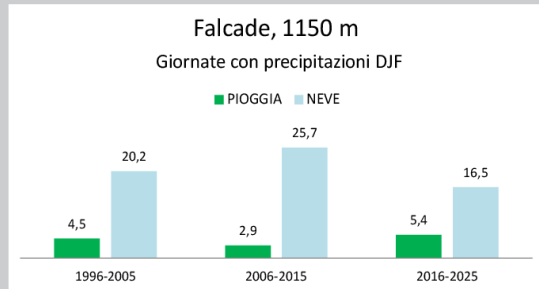
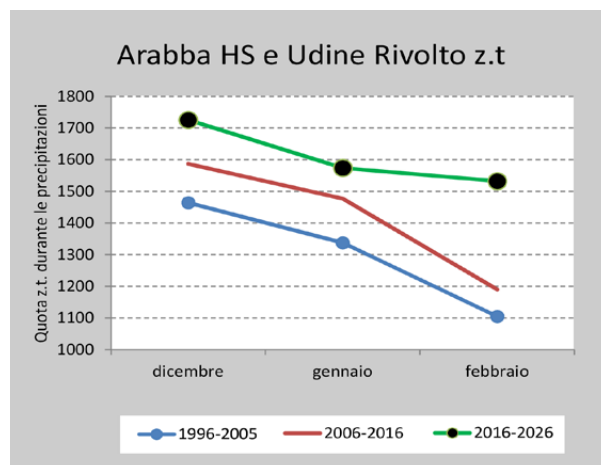
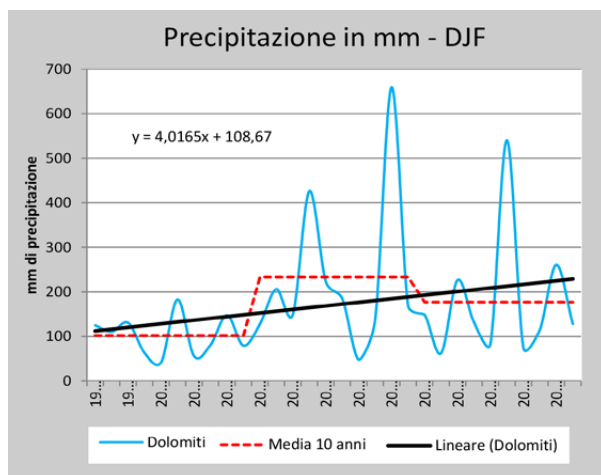
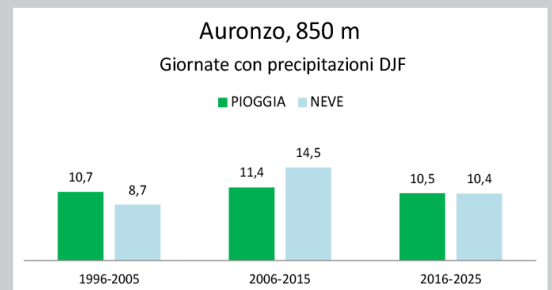
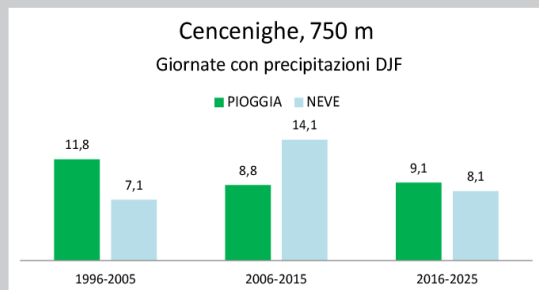


Figura 10: Alpi meridionali orientali- Udine Rivolto. Andamento dello zero termico (Z.T.) alle ore 12:00 nelle giornate delle precipitazioni nei mesi di DJF. Nel decennio recente la quota nei mesi di gennaio e febbraio è più elevata che a dicembre. L'innalzamento della quota è di oltre 420 m a febbraio fra il 1996-2005 e il 2016-2025.



mentre la quantità di neve fresca caduta, la quantità di neve al suolo e di riserva nivale (SWE) sono in contrazione, specie negli ultimi 40 anni. Analizzando alcune osservazioni effettuate presso i campi nivometrici, come la qualità del tempo meteorologico e gli episodi segnalati di neve al suolo (HS) o con neve fresca (HN), è stato possibile individuare una prima tendenza. Negli ultimi 20 anni, gli episodi di pioggia su neve sono aumentati e confermano un trend positivo, sia nella fascia altimetrica più soggetta ai cambiamenti climatici attuali - 1500-1800 m di quota - che alle quote superiori (1800-2200 e oltre i 2200 m). Il trend positivo si evidenzia in tutti e tre i mesi invernali (dicembre, gennaio e febbraio). Inoltre analizzando la quantità di campi nivometrici che riportano giornalmente la pioggia su neve, si osserva una maggior spazialità degli episodi. L'analisi dell'attività valanghiva naturale in corrispondenza di eventi di pioggia su neve è stata condotta sull'intera stagione invernale, esaminando i dati di tutte le stazioni poste a diverse quote per avere un dato più solido che indichi eventuali interazioni.

I valori elaborati evidenziano una possibile maggior frequenza di molte valanghe di medie dimensioni e singole grandi valanghe in occasione di questi eventi. Un'indagine condotta in alcune stazioni delle Dolomiti Venete, evidenzia un calo del 25% delle giornate con precipitazioni nel periodo DJF nel decennio 2016-2025 rispetto al precedente e del 33% di quelle nevose, soprattutto nel mese di febbraio alle quote medio basse. La quota dello zero termico durante le precipitazioni si è innalzata di ben 240 m a gennaio negli ultimi 30 anni e di oltre 420 m nel mese di febbraio, condizionando e innalzando in modo deciso il limite neve/pioggia, almeno nelle Alpi meridionali orientali.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato realizzato grazie al lavoro degli osservatori nivologici che, presso dighe e campi neve, hanno rilevato i dati per la compilazione del modello 1 AINEVA. A loro va il più sincero ringraziamento.

BIBLIOGRAFIA

- ▶ Abermann, J., Eckerstorfer, M., Malnes, E., Ulf Hansen, B., (2019). A large wet snow avalanche cycle in West Greenland quantified using remote sensing and in situ observations *Natural Hazards* (2019) 97:517–534 <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03655-8>
- ▶ Beniston, M. (1997). Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcings. In: *Climatic change at high elevation sites*. Berlin, Germany: Springer, pp. 49–68.
- ▶ Beniston M., Stoffel M., (2016). Rain-on-snow events, floods and climate change in the Alps: Events may increase with warming up to 4 °C and decrease thereafter, *Sci Total Environ* . 2016 Nov 15:571:228-36. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.146
- ▶ Bozzoli, M., Crespi, A., Matiu, M., Majone, B., Giovannini, L., Zardi, D., Brugnara, Y., Bozzo, A., Berro, D. C., Mercalli, L., & Bertoldi, G. (2024). Long-term snowfall trends and variability in the Alps. *International Journal of Climatology*, 44(13), 4571–4591. <https://doi.org/10.1002/joc.8597>
- ▶ Brandt, W.T., et al., (2022). A review of the hydrologic response mechanisms during mountain rain-on-snow. *Frontiers in Earth Science*, 10, 791760. doi:10.3389/feart.2022.791760
- ▶ Cagnati A. (2003). Sistemi di misura e metodi di osservazione nivometeorologici. AINEVA, Trento, 186 pp.
- ▶ Cohen, J., Ye, H., & Jones, J. (2015). Trends and variability in rain-on-snow events. *Geophysical Research Letters*, 42, 7115–7122. <https://doi.org/10.1002/2015GL065320>
- ▶ Conway, H., Breyfogle, S., Wilbour, C.R., (1988). Observations relating to wet snow stability. *International Snow Science Workshop, ISSW'88 Commission*, Whistler, B.C., Canada.
- ▶ Conway, H., & Raymond, C. F. (1993). Snow stability during rain. *Journal of Glaciology*, 39(133), 635–642. <https://doi.org/10.1017/S0022143000016531>
- ▶ 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>
- ▶ Eckerstorfer M, Christiansen HH (2011) Meteorology, topography and snowpack conditions causing two extreme mid-winter slush and wet slab avalanche periods in high arctic maritime svalbard. *Permafrost Periglacial Process*. <https://doi.org/10.1002/ppp.7344>
- ▶ Garvelmann, J., Pohl, S., and Weiler, M., (2014). Variability of observed energy fluxes during rain-on-snow and clear sky snowmelt in a mid-latitude mountain environment. *Journal of Hydrometeorology*, 15 (3), 1220–1237. doi:10.1175/JHM-D-13-0187.1
- ▶ Heywood, L., (1988). Rain on snow avalanche events—Some observations. *Proceedings of the International Snow Science Workshop*.
- ▶ Hotovy, O. and Jenicek, M., (2020). The impact of changing subcanopy radiation on snowmelt in a disturbed coniferous forest. *Hydrological Processes*, 34 (26), 5298–5314. doi:10.1002/hyp.13936
- ▶ Il Jeong, D. and Sushama, L., (2017). Rain-on-snow events over North America based on two Canadian regional climate models. *Climate Dynamics*, 50 (1–2), 303–316. doi:10.1007/s00382-017-3609-x
- ▶ Li, D., et al., (2019). The role of rain-on-snow in flooding over the conterminous United States. *Water Resources Research*, 55 (11), 8492– 8513. doi:10.1029/2019WR024950
- ▶ 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-15-1343-2021>
- ▶ Marks, D., et al., (1998). The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: a case study of the 1996 Pacific Northwest flood. *Hydrological Processes*, 12 (10–11), 1569–1587. doi:10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11<1569::AID-HYP682>3.0.CO;2-L
- ▶ Marty, C., Rohrer, M.B., Huss, M. & Stähli, M. (2023). Multi-decadal observations in the Alps reveal less and wetter snow, with increasing variability. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1165861. Available from: <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1165861>
- ▶ Marty, C., Tilg, A. M. & Jonas, T. (2017). Recent evidence of largescale receding snow water equivalents in the European Alps. *Journal of Hydrometeorology*, 18(4), 1021–1031. Available from: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0188.1>
- ▶ Musselman, K. N., Lehner, F., Ikeda, K., Clark, M. P., Prein, A. F., Liu, C., et al. (2018). Projected increases and shifts in rain-on-snow flood risk over western North America. *Nature Climate Change*, 8(9), 808.
- ▶ Notarnicola C. (2022). Overall negative trends for snow cover extent and duration in global mountain regions over 1982–2020. *Scientific Reports* | (2022) 12:13731. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16743-w>
- ▶ Valt M. (2024). Agordo. Conferenza
- ▶ Sezen, C., et al., (2020). Investigation of rain-on-snow floods under climate change. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10, 4
- ▶ Singh, P., Spitzbart, G., Hübl, H., & Weinmeister, H. W. (1997). Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: A field study. *Journal of Hydrology*, 202(1-4), 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00004-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00004-8) ISSW'88 Comm., Whistler, B.C., Canada.
- ▶ Valt M., Cianfarra, P. Valt, M. (2022). Neve e Clima sulla Alpi Italiane, *Neve e Valanghe* n. 96, pag.2-15.
- ▶ Vickers H, Saloranta T, Køltzow M, van Pelt WJJ and Malnes E (2024) An analysis of winter rain-on-snow climatology in Svalbard. *Front. Earth Sci.* 12:1342731. doi: 10.3389/feart.2024.1342731
- ▶ Wayand, N. E., Lundquist, J. D., & Clark, M. P. (2015). Modeling the influence of hypsometry, vegetation, and storm energy on snowmelt contributions to basins during rain-on-snow floods. *Water Resources Research*, 51, 8551–8569. <https://doi.org/10.1002/2014WR016576>
- ▶ Wever, N., Würzer, S., Fierz, C., and Lehning, M. (2016). Simulating ice layer formation under the presence of preferential flow in layered snowpacks, *The Cryosphere*, 10, 2731–2744, doi:10.5194/tc-10- 2731-2016, 2016b Würzer, S., et al., 2016. Influence of initial snowpack properties on runoff formation during rain-on-snow events. *Journal of Hydrometeorology*, 17 (6), 1801–1815. doi:10.1175/JHM-D-15-0181.1