

17 DISTRIBUZIONE DEGLI INNEVAMENTI SULLA MONTAGNA FRIULANA. ANALISI STATISTICA DELLE PRINCIPALI VARIABILI NIVOMETRICHE

Massimiliano BARBOLINI

Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Ambientale. Via Ferrata, 1 – 27100, Pavia

Francesco FERRO

FLOW-ING s.r.l.. P.za J.F. Kennedy, 27 – 19124 La Spezia

17.1 INTRODUZIONE

L'elaborazione statistica di un campione di misure di una variabile nivologica (altezza della neve al suolo, nevicata giornaliera, ecc.) ha lo scopo di definire, secondo una procedura efficiente, accurata e robusta¹, la forma della *funzione di probabilità* (FDP) della variabile medesima (anche detta *funzione di ripartizione*):

$$F = F(x) \quad [1]$$

ossia il legame tra la variabile (x) e la probabilità di non superamento (F), quest'ultima definita come segue:

$$F(x) = \Pr[X \leq x] \quad [2]$$

dove $\Pr[A]$ denota la probabilità dell'evento A .

La funzione di probabilità definisce la frequenza di accadimento dei possibili valori della variabile considerata. L'inversa della FDP:

$$x = x(F) \quad [3]$$

esprime il valore della variabile in funzione della sua probabilità di non superamento, ed è detta *funzione quantile*.

Poiché il tempo di ritorno T di un qualunque valore x della variabile (ovvero l'intervallo medio di tempo che intercorre tra due superamenti successivi del valore x) è legato alla corrispondente probabilità di non superamento dalla relazione:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)} \quad [4]$$

¹ La robustezza di un metodo di stima dei quantili è la proprietà per cui la "bontà" della stima (ovvero la sua accuratezza ed efficienza) si mantiene anche se le ipotesi su cui si basa il metodo si discostano leggermente dal vero.

Una stima è tanto più "accurata" quanto minore risulta la distorsione ovvero la tendenza a fornire stime consistentemente maggiori o minori del vero valore.

Una stima è tanto più "efficiente" quanto minore risulta la variabilità ovvero la deviazione casuale della stima dal valore reale.

la determinazione della funzione quantile equivale alla definizione del legame tra la variabile x ed il tempo di ritorno T :

$$x_T = x_T(T) \quad [5]$$

La conoscenza della relazione [5] permette di valutare l'intensità di eventi di data periodicità e risulta di grande importanza, soprattutto con riferimento ad eventi nivometrici "estremi" (ovvero rari), in quanto consente la predisposizione di adeguati strumenti preventivi.

Generalmente il legame tra una data variabile nivologica ed il tempo di ritorno viene individuato elaborando i suoi massimi annui misurati in una serie di anni, anche non consecutivi. Questa procedura è usualmente definita come elaborazione delle *serie dei massimi annui*. Inoltre, nella pratica comune, la stima della FDP di una variabile nivologica viene ottenuta elaborando un unico campione di dati misurati nel sito di interesse (o comunque in una stazione di rilevamento ritenuta significativa); questa procedura viene indicata come *stima puntuale*. Tale approccio comporta inevitabilmente due tipologie di problemi:

- a) i campioni di dati puntuali disponibili sono raramente di dimensione sufficiente da garantire stime affidabili dei quantili di interesse in applicazioni ingegneristiche (in generale vale la regola che un quantile con tempo di ritorno T può essere stimato in maniera affidabile da un campione di dimensione N solo se $T \leq N$ (Hosking e Wallis, 1997); questa condizione è raramente soddisfatta nella pratica poiché con riferimento ai campioni di dati nivologici nella migliore delle ipotesi risulta $N \leq 30$, mentre i tempi di ritorno di interesse risultano compresi approssimativamente nell'intervallo $100 \leq T \leq 300$);
- b) i campioni di dati puntuali disponibili sono generalmente misurati in stazioni di rilevamento la cui posizione non coincide con la zona di interesse (tipicamente le stazioni di rilevamento nivometeorologico risultano ubicate a quote inferiori rispetto alle zone di distacco delle valanghe).

Nel presente studio al fine di superare i due problemi menzionati viene fatto ricorso a procedure di *stima regionale* (Cunnane, 1989; Maione e Moisello, 1993; Hosking e Wallis, 1997). L'analisi regionale utilizza una "trasposizione" dell'informazione spaziale in un'informazione di tipo temporale: i dati relativi a numerose stazioni di rilevamento sono opportunamente combinati ed utilizzati per stimare le frequenze di accadimento degli eventi in ciascun sito (e più in generale su tutta la regione), una volta verificata l'ipotesi che le funzioni di probabilità relative ai differenti siti non siano troppo dissimili tra loro.

In effetti, dato un campione di M siti, ciascuno con N anni di registrazione, si può intuitivamente sperare che il campione di $M \cdot N$ dati ottenuto raggruppando opportunamente tutte le informazioni disponibili possa consentire una stima accurata del quantile con tempo di ritorno $T \leq M \cdot N$. In realtà un tale assunto non corrisponde al vero, in quanto nella regionalizzazione possono nascere problemi sia in virtù del fatto che le leggi di distribuzione relative ai differenti siti non risultano esattamente le medesime che per effetto del fatto che le misure non risultano rigorosamente statisticamente indipendenti (ovvero un certo grado di disomogeneità e di intercorrelazione tra i vari siti è inevitabile). Ciò nondimeno è ormai ampiamente dimostrato che analisi regionali condotte adeguatamente forniscono stime dei quantili delle variabili d'interesse caratterizzate da un

grado di accuratezza decisamente superiore a quello ottenibile mediante stime di tipo puntuale ed adeguato alla maggior parte delle applicazioni pratiche (Cunnane, 1989).

Con riferimento al territorio alpino e prealpino friulano, scopo principale del presente studio è l'effettuazione di un'analisi statistica di tipo regionale delle seguenti variabili nivometriche:

- altezza del manto nevoso al suolo (nel seguito indicata con *Hs*);
- incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa (nel seguito indicata con *DH3gg*).

Tali variabili rivestono una valenza fondamentale sia con riferimento alla progettazione degli interventi di difesa dalle valanghe (siano essi opere di difesa attiva in zona di distacco o opere di difesa passiva in zona di arresto) che con riferimento alle simulazioni dinamiche finalizzate alla mappatura delle aree a rischio². L'analisi statistica delle suddette variabili consente di caratterizzarne i valori di progetto in funzione del luogo (zona, quota) e del tempo di ritorno. L'utilizzo di tecniche di "regionalizzazione" consente inoltre di migliorare l'affidabilità dei risultati, sia con riferimento alle estrapolazioni temporali (ovvero per elevati tempi di ritorno) che spaziali (ovvero in siti non strumentati). La caratterizzazione della variabilità "spazio-temporale" delle condizioni di innevamento sul territorio oggetto di studio rappresenta anche un utile strumento conoscitivo con riferimento alla previsione del pericolo. Risulta infatti possibile: (i) correlare le condizioni nivometeorologiche relative a differenti zone del territorio in esame (ovvero stimare le condizioni nivometriche in varie zone a partire da una o più stazioni rappresentative); (ii) caratterizzare il grado di rarità delle situazioni nivometeorologiche che si verificheranno, e valutarne in prima approssimazione il grado di pericolo in termini di attività valanghiva.

Nel seguito sono presentate le analisi effettuate allo scopo di determinare i valori di progetto dall'altezza del manto nevoso al suolo (*Hs*). Elaborazioni del tutto analoghe sono state condotte anche con riferimento all'incremento dell'altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione (*DH3gg*); per ragioni di sintesi tali elaborazioni non vengono nel seguito discusse. In conclusione all'articolo si riportano comunque i risultati finali relativi sia ad *Hs* che a *DH3gg*.

17.2 BASE DI DATI

Nel presente studio sono stati elaborati dati relativi ad una rete di rilevamento nivometeorologico comprendente stazioni di tipo sia manuale che automatico.

La rete delle stazioni di rilevamento di tipo manuale è gestita dal Servizio territorio montano e manutenzioni della Regione autonoma Friuli Venezia Giulia con l'ausilio di

² *Hs* è il parametro nivometrico di progetto con riferimento al dimensionamento delle opere di difesa attiva nella zona di distacco (Direttive Elvetiche, 1990) e risulta inoltre una grandezza estremamente utile per il dimensionamento delle opere di difesa passiva in zona di arresto (Mears, 1981). *DH3gg* è invece il parametro nivometrico di progetto con riferimento al calcolo della dinamica delle valanghe finalizzato alla mappatura delle aree esposte al pericolo (Salm *et al.*, 1990; Burkard e Salm, 1992).

collaboratori esterni (Guardie Forestali, gestori di impianti di risalita o rifugi, privati) che giornalmente effettuano il rilevamento e la trasmissione dei dati alla centrale operativa di Udine. La rete è attualmente costituita da 16 stazioni, sebbene nel corso dell'ultimo trentennio abbiano operato, in modo discontinuo e/o parziale, un numero complessivo di 29 stazioni. Rilevamenti manuali dei parametri nivometrici di interesse nel presente studio sono stati compiuti anche su stazioni di pertinenza dell'ex Magistrato delle Acque. I dati disponibili relativi a tali stazioni (16) sono stati utilizzati per integrare i dati della rete di rilevamento regionale, soprattutto con riferimento alle aree meno coperte da quest'ultima. Nel complesso il numero di stazioni di rilevamento manuale considerate è pertanto risultato pari a 43 (vedi Figura 1).

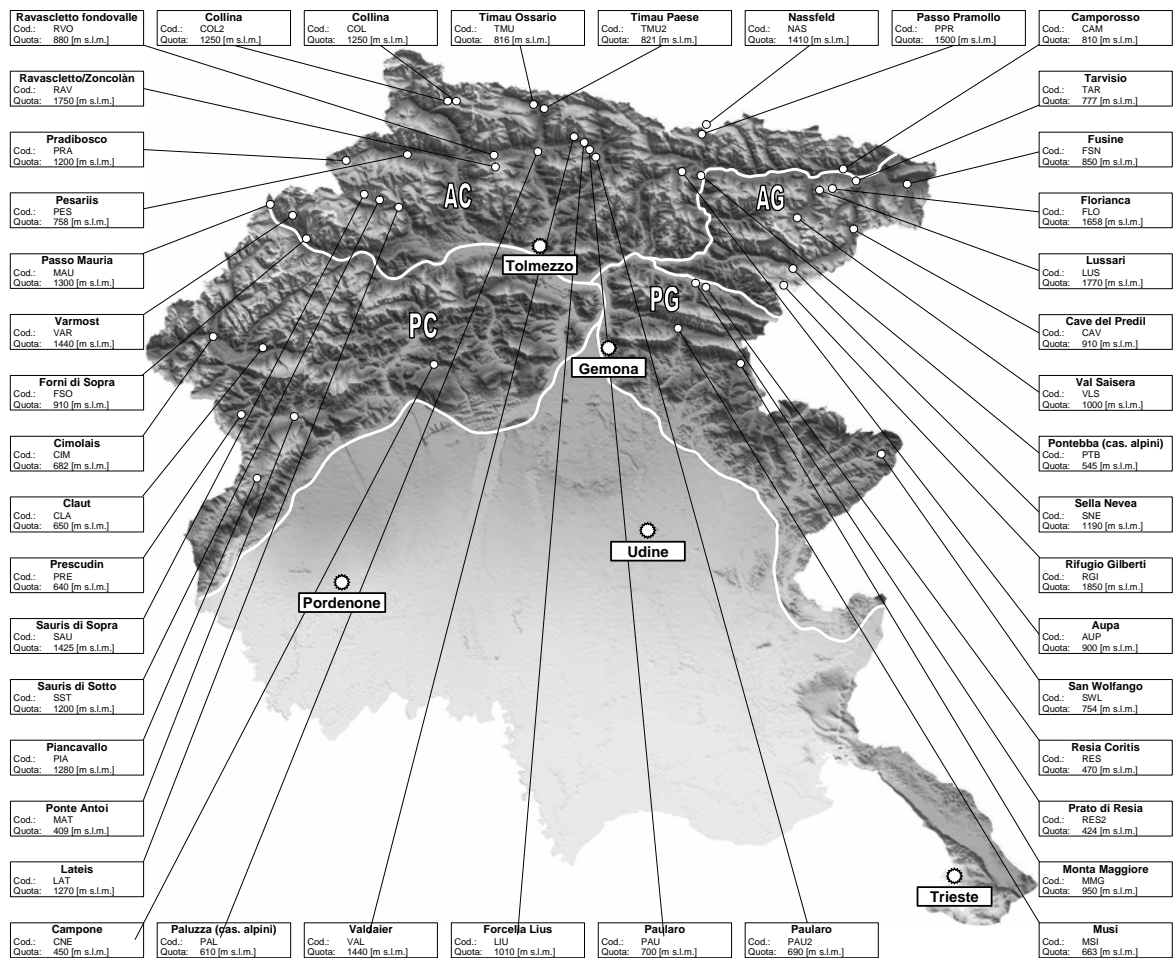


Fig. 1 - Distribuzione geografica delle stazioni manuali utilizzate nel presente studio. Sono indicate le quattro zone geografiche in cui viene classicamente suddivisa la montagna friulana (PC: Prealpi Carniche; AC: Alpi Carniche; AG: Alpi Giulie; PG: Prealpi Giulie).

Le stazioni di rilevamento di tipo automatico permettono l'acquisizione quotidiana dei dati nivometeorologici in modo autonomo e continuativo. I dati sono registrati in loco e trasmessi con cadenza temporale variabile da 30' a 300' alla Centrale operativa di Visco (UD) dell'OSMER FVG. Qui i dati vengono validati e posti in rete per la loro consultazione da parte degli addetti al settore Neve e Valanghe in Udine. Attualmente sul territorio montano friulano sono funzionanti 16 stazioni di tipo automatico gestite dal Servizio, di cui 5 installate contestualmente alle Universiadi svoltesi nel corso dell'inverno 2003 e

pertanto in opera solo da una stagione (2003/2004). I dati relativi alla rete automatica sono consultabili in rete, ma solo per gli utenti istituzionali e previa richiesta della password di accesso. Delle 16 stazioni automatiche in dotazione presso il Servizio territorio montano e manutenzioni, 8 sono state installate solo nel corso dell'ultima stagione, e pertanto presentano al più i dati di un solo inverno. Le rimanenti 8 stazioni hanno invece avuto garanzia di funzionamento (per il passaggio dalla trasmissione via radio alla trasmissione via GSM) a partire dalla stagione 1999-2000. Inoltre, in molti casi si sono avuti problemi nel funzionamento del nivometro; pertanto, per nessuna delle stazioni automatiche si ha di fatto a disposizione un numero di stagioni utili superiore a quattro.

Le analisi statistiche sono state quindi condotte sulla base dei dati nivometrici relativi alle sole stazioni di tipo manuale (Figura 1), di cui si riporta in Figura 2 la distribuzione con la quota ed in Figura 3 la distribuzione del numero di stagioni disponibili. Tali analisi sono state necessariamente precedute da adeguate attività di filtraggio e correzione dei dati. Attività, queste ultime, caratterizzate da un criterio operativo improntato al rendere minimo il numero di valutazioni soggettive introdotte. Si è infatti evitato di introdurre ricostruzioni arbitrarie (ad esempio basate su correlazioni) di periodi di intensa precipitazione o di intere stagioni invernali, preferendo piuttosto eliminare la stagione. Ciò è stato plausibile in virtù del tipo di analisi statistica affrontata che, essendo basata su tecniche di regionalizzazione, accorpa le informazioni relative a numerose stazioni di misura e, di conseguenza, riduce il problema della limitatezza delle serie storiche e rende meno cruciale l'esigenza di ricostruire in maniera arbitraria e poco accurata le informazioni mancanti.

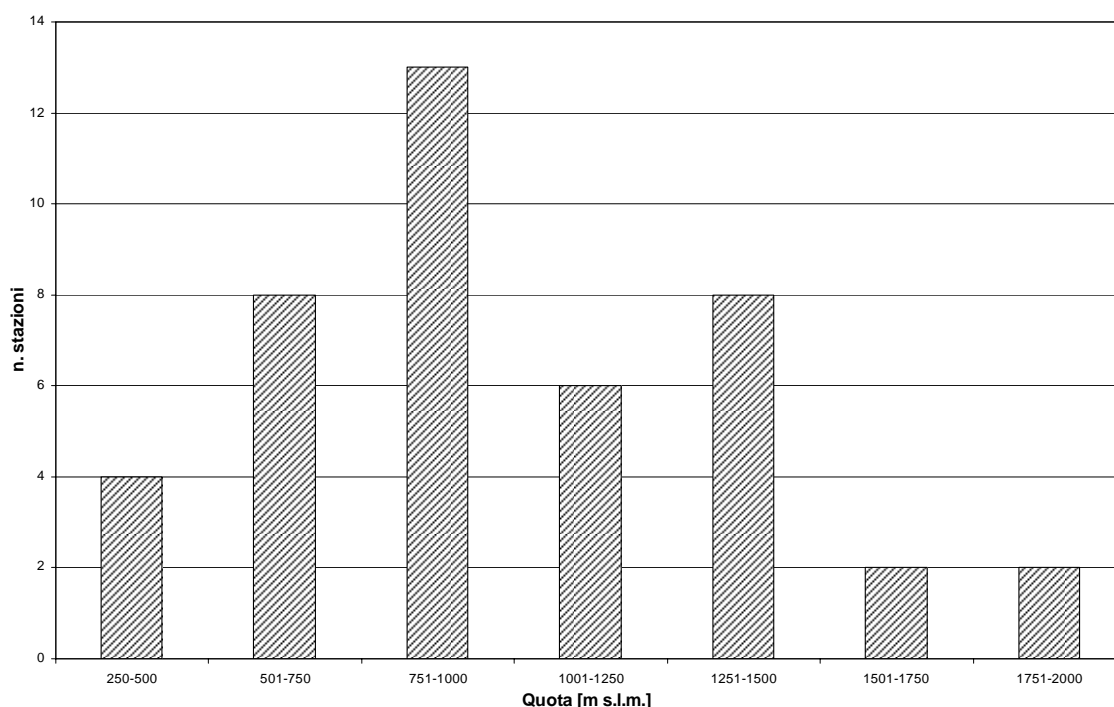


Fig. 2 - Distribuzione altimetrica delle stazioni manuali utilizzate.

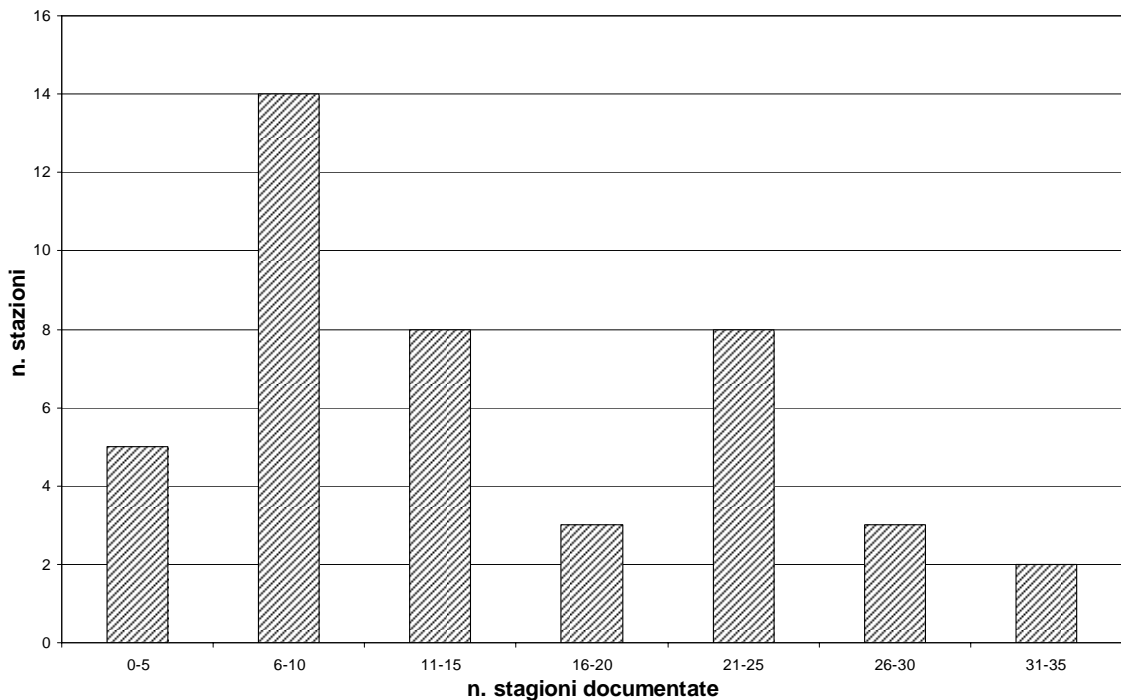


Fig. 3 – Distribuzione delle serie storiche disponibili per le stazioni manuali utilizzate

17.3 VARIABILITÀ SPAZIALE

L'analisi della variabilità spaziale del valore medio di H_s (nel seguito indicato con la dicitura $\overline{H_s}$) risulta essenziale complemento delle analisi inferenziali condotte al paragrafo successivo in quanto consente di caratterizzare la variabilità di $\overline{H_s}$ in funzione di posizione geografica e quota. Come meglio esposto nel seguito, detti valori sono necessari per scalare opportunamente le *curve di crescita regionale*, ovvero le curve che forniscono i valori adimensionali delle variabili in funzione del tempo di ritorno.

17.3.1 Dipendenza dalla quota

In Figura 4 è riportato l'andamento di $\overline{H_s}$ con la quota su tutto il territorio montano friulano. Appare evidente un generale incremento con la quota della grandezza nivometrica considerata, con un tasso medio di crescita pari a circa 15 cm ogni 100 metri di dislivello. Si può peraltro osservare che, almeno limitatamente all'intervallo di quote coperto dalle rilevazioni disponibili (approssimativamente 500-2000 m s.l.m.), la crescita appare "più che lineare", e ben rappresentata da una polinomiale del secondo ordine passante per l'origine avente equazione:

$$\overline{H_s} = 66.36 \times 10^{-6} \cdot z^2 + 17.53 \times 10^{-3} \cdot z \quad [6]$$

con z indicante la quota in m s.l.m., $\overline{H_s}$ in cm e coefficiente di correlazione $R^2 = 0,88$. Tale tipo di andamento non si ritiene peraltro possa garantire una buona rappresentazione dei valori di $\overline{H_s}$ a quote superiori ai 2000 m s.l.m., comportando sovrastime eccessive della variabile.

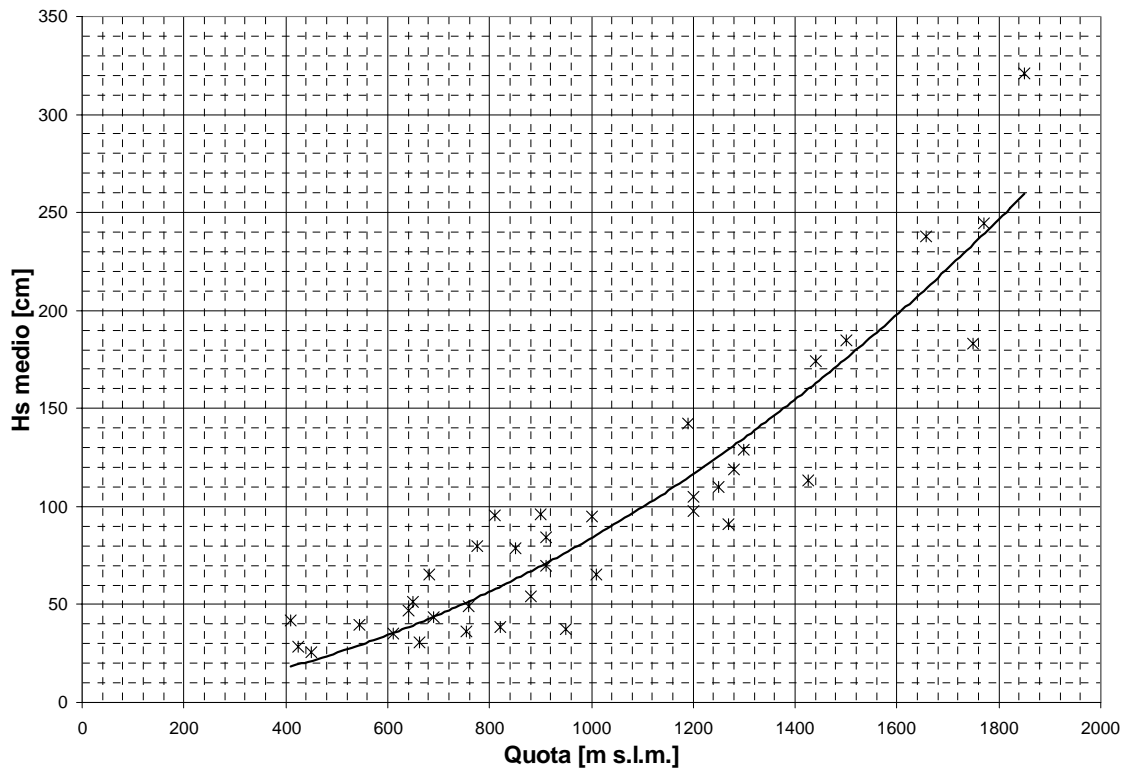


Fig.4 - Correlazione fra quota e \overline{Hs} . I punti rappresentano i dati campione (valori medi di Hs relativi alle stazioni di Figura 1), la linea l'interpolante di equazione [6].

17.3.2 Dipendenza dalla zona

Al fine di valutare l'eventuale dipendenza del valore medio del massimo stagionale di Hs (\overline{Hs}) dal fattore geografico (ossia di individuare l'esistenza di sottozone geografiche con differenze significative in termini di \overline{Hs}), si è calcolato, per ogni stazione, lo scarto percentuale del valore misurato rispetto al valore fornito dalla curva di interpolazione (Equazione [6]). I valori degli scarti percentuali sono successivamente stati posti su una cartina geografica rappresentante l'intera area di studio (Figura 5) al fine di verificare l'esistenza di zone con scarti appartenenti ad un ben definito intervallo di valori.

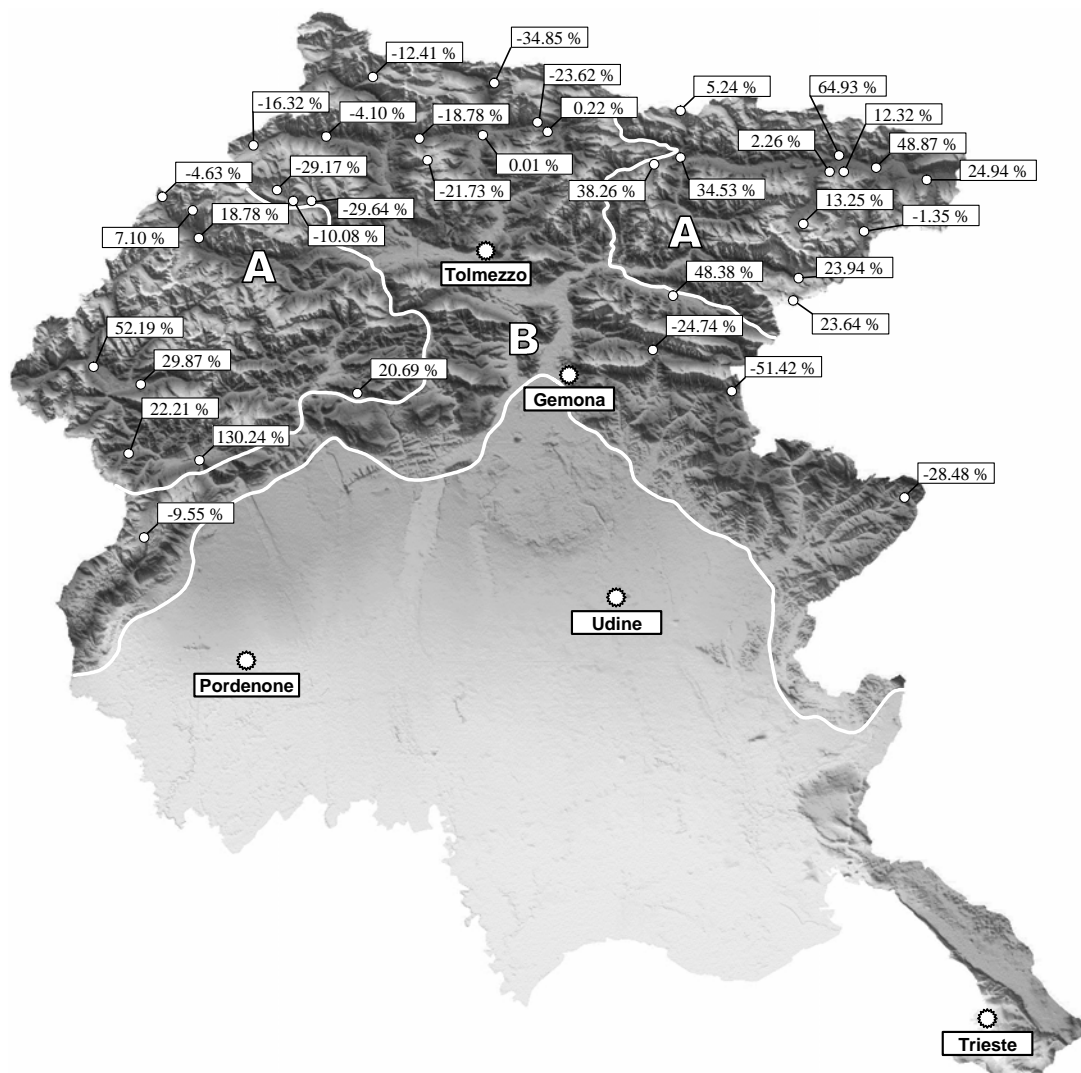


Fig. 5 - Distribuzione geografica degli scarti percentuali del valore misurato di $\overline{H_s}$ rispetto a quello calcolato mediante l'equazione [6]. Sono delimitate le due zone nivometriche (A e B) con valori significativamente differenti degli scarti.

L'analisi dei valori degli scarti percentuali riportati in Figura 5 indica la possibilità di suddividere il territorio montano friulano in due sottozone in cui la curva interpolante di Equazione [6] fornisce complessivamente sovrastime (scarti negativi) o sottostime (scarti positivi) del reale valore di $\overline{H_s}$. Ciò dimostra che le due sottozone presentano caratteristiche nivometriche significativamente differenti (in termini di innevamento medio); pertanto, se studiate separatamente, possono fornire curve di crescita di $\overline{H_s}$ con la quota più accurate (vedi Figura 6).

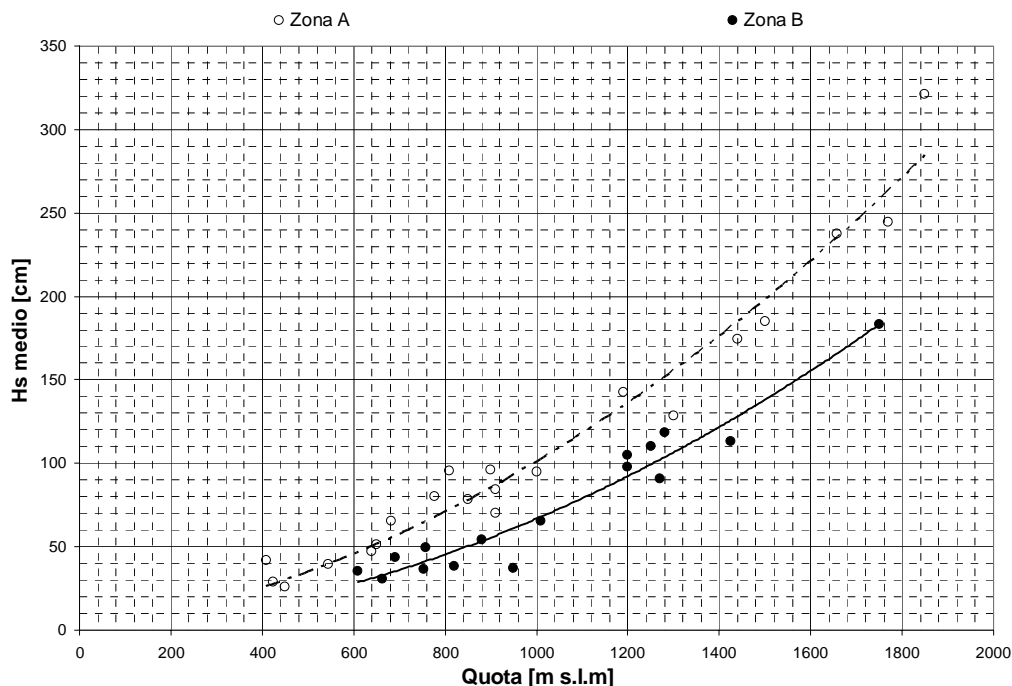


Fig. 6 - Correlazione fra quota e \overline{Hs} per le due zone con comportamento omogeneo di \overline{Hs} (Zona A e Zona B). Le due linee interpolanti si riferiscono rispettivamente alle equazioni [7] (linea tratteggiata) e [8] (linea continua).

Le due sottozone “nivometriche”, indicate in Figura 5 con le diciture A e B, risultano:

- Zona A:** la zona comprende le Prealpi Carniche, con: (i) un'estensione verso Nord ad includere il massiccio montuoso comprensivo del Crodon di Tiarfin (2413 m s.l.m.) e il M.te Bivera (2474 m s.l.m.); (ii) un restringimento ad Est-NordEst ad escludere i massicci del M.te Verzegnis (1914 m s.l.m.), M.te Piombada (1744 m s.l.m.), M.te Piciat (1615 m s.l.m.), M.te San Simeone (1505 m s.l.m.) e M.te Cuar (1478 m s.l.m.); (iii) un restringimento a Sud ad escludere i versanti meridionali del M.te Cavallo (2251 m s.l.m.), M.te Ciastelat (1641 m s.l.m.), M.te Fara (1342 m s.l.m.), M.te Jouf (1224 m s.l.m.) e M.te Ciaurlec (1148 m s.l.m.). Include inoltre le Alpi Giulie con estensioni verso Nord (M.te Scinauz, 1999 m s.l.m.), Nord-Ovest (M.te Cavallo di Pontebba, 2239 m s.l.m.) ed Ovest (Zuc dal Bor, 2195 m s.l.m.);
- Zona B:** la zona comprende le Alpi Carniche a meno delle porzioni incluse nella Zona A, le Prealpi Giulie e la porzione delle Prealpi Carniche esclusa dalla Zona A.

Si deve osservare che il grado di dettaglio della suddivisione nivometrica sopraesposta è commisurato alle potenzialità descrittive disponibili, legate al numero ed all'ubicazione delle stazioni di misura presenti sul territorio montano friulano. La suddivisione operata è inoltre tale che, per praticità d'uso dei risultati dello studio, i confini delle zone nivometriche sono stati fatti coincidere con limiti comunali. Alle Tabelle 1 e 2 sono elencati i comuni friulani appartenenti rispettivamente alle zone nivometriche “A” e “B”.

Tab. 1 – Elenco dei comuni alpini e prealpini friulani appartenenti alla zona nivometrica “A”

ID	Comune	Provincia	ID	Comune	Provincia
1	Andreis	PN	10	Dogna	UD
2	Barcis	PN	11	Forni di Sopra	UD
3	Cimolais	PN	12	Forni di Sotto	UD
4	Claut	PN	13	Malborghetto Valbruna	UD
5	Erto e Casso	PN	14	Moggio Udinese	UD
6	Frisanico	PN	15	Pontebba	UD
7	Tramonti di Sopra	PN	16	Tarvisio	UD
8	Tramonti di Sotto	PN	17	Resia	UD
9	Chiusaforte	UD	18	Resiutta	UD

Tab. 2 – Elenco dei comuni alpini e prealpini friulani appartenenti alla zona nivometrica “B”

ID	Comune	Provincia	ID	Comune	Provincia
1	Aviano	PN	33	Ligosullo	UD
2	Budoia	PN	34	Lusevera	UD
3	Caneva	PN	35	Magnano in Riviera	UD
4	Castelnovo del Friuli	PN	36	Montenars	UD
5	Cavasso Nuovo	PN	37	Nimis	UD
6	Clauzetto	PN	38	Ovaro	UD
7	Fanna	PN	39	Paluzza	UD
8	Maniago	PN	40	Paularo	UD
9	Medino	PN	41	Prato Carnico	UD
10	Montereale Valcellina	PN	42	Preone	UD
11	Pinzano al Tagliamento	PN	43	Prepotto	UD
12	Polcenigo	PN	44	Pulfero	UD
13	Travesio	PN	45	Ravascletto	UD
14	Vito d'Asio	PN	46	Raveo	UD
15	Amaro	UD	47	Rigolato	UD
16	Ampezzo	UD	48	San Leonardo	UD
17	Arta Terme	UD	49	San Pietro al Natisone	UD
18	Artegna	UD	50	Sauris	UD
19	Attimis	UD	51	Savogna	UD
20	Bordano	UD	52	Socchieve	UD
21	Cavazzo Carnico	UD	53	Stregna	UD
22	Cercivento	UD	54	Sutrio	UD
23	Cividale del Friuli	UD	55	Taipana	UD
24	Comeglians	UD	56	Tarcento	UD
25	Drenchia	UD	57	Tolmezzo	UD
26	Enemonzo	UD	58	Torreano	UD
27	Faedis	UD	59	Trasaghis	UD
28	Forgaria nel Friuli	UD	60	Treppo Carnico	UD
29	Forni Avoltri	UD	61	Venzona	UD
30	Gemona del Friuli	UD	62	Verzegnis	UD
31	Grimacco	UD	63	Villa Santina	UD
32	Lauco	UD	64	Zuglio	UD

Con riferimento alle due aree di cui sopra si sono ottenute le seguenti correlazioni $Quota - \overline{Hs}$ (vedi Figura 6), valide tra 500 e 2000 m s.l.m.:

Zona A:

$$\overline{Hs} = 61.86 \times 10^{-6} \cdot z^2 + 39.26 \times 10^{-3} \cdot z \quad (R^2 = 0.97) \quad [7]$$

Zona B:

$$\overline{Hs} = 50.56 \times 10^{-6} \cdot z^2 + 16.26 \times 10^{-3} \cdot z \quad (R^2 = 0.94) \quad [8]$$

con z in m s.l.m. e \overline{Hs} in cm.

Si è pertanto riscontrato un netto miglioramento rispetto all'analisi a scala regionale, con un incremento del coefficiente di correlazione ed una migliore distribuzione dei residui. In entrambi i casi è stata inoltre confermata, almeno limitatamente all'intervallo di quote disponibile, la dipendenza "più che lineare" di \overline{Hs} dalla quota.

17.4 ANALISI REGIONALE

17.4.1 Introduzione

In questa parte dello studio viene presentata l'analisi statistica "a scala regionale" della variabile Hs . Scopo di tale analisi è la caratterizzazione del legame tra la variabile di interesse ed il tempo di ritorno. Un approccio di tipo "regionale" all'analisi statistica dei dati di innevamento consente, rispetto alla classica statistica inferenziale "sito-specifica" (ovvero basata sull'elaborazione dei dati registrati da un'unica stazione di misura), di combinare i dati relativi a differenti stazioni di rilevamento nivo-meteorologico (una volta verificate, mediante opportuni test statistici, l'omogeneità). In questo modo si ottiene il vantaggio di estendere il campione di dati migliorando l'accuratezza della stima delle variabili nivometriche di progetto (soprattutto con riferimento ai tempi di ritorno di interesse nelle applicazioni pratiche finalizzate alla mappatura del pericolo o al dimensionamento delle opere di difesa, tipicamente non inferiori al secolo).

La procedura regionale consente inoltre di utilizzare, nell'analisi delle frequenze dei massimi annui, leggi di distribuzione di probabilità con un numero di parametri superiore a due (quali GEV o Wakeby), caratterizzate da migliori proprietà sia descrittive che predittive.

17.4.2 Metodologia

Nel seguito viene sinteticamente descritta la metodologia di analisi regionale utilizzata nello studio. Per l'analisi regionale di Hs (e $DH3gg$) si è fatto riferimento alla tecnica cosiddetta del "valore indice" (Kite, 1988; Cunnane, 1989; Maione e Moisello, 1993). Questa procedura, che è stata proposta originariamente con il nome di "metodo della piena indice" (*index flood procedure*) per elaborare le serie dei valori massimi annui delle portate di piena, può infatti essere estesa alla elaborazione di qualsiasi variabile casuale x , ovvero anche delle variabili nivologiche oggetto del presente studio.

Il metodo del "valore indice" ammette che i valori y_{ij} della variabile adimensionale ottenuta dividendo i valori x_{ij} rilevati in ciascuna delle M stazioni della regione "omogenea" per la media \bar{x}_j del proprio campione (di dimensione N_j):

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j} \quad \text{con} \quad \bar{x}_j = \sum_i x_{ij} / N_j \quad [9]$$

dove $i=1, \dots, N_j$ e $j=1, \dots, M$, abbiano la medesima distribuzione di probabilità, usualmente denominata “curva di crescita regionale”. In realtà un grado di disomogeneità relativamente limitato tra le stazioni di rilevamento che vengono accorpate nell’analisi regionale è ritenuto ammissibile. Il test più comune e semplice per verificare che il grado di disomogeneità delle stazioni sia accettabile è quello effettuabile sui coefficienti di variazione, CV: è sufficiente verificare che il $CV(CV_j) < 0,4$. Chiaramente 0,4 è il massimo limite ammissibile; quanto più piccolo risulta il CV dei CV del gruppo di stazioni considerate, tanto maggiore è il grado di omogeneità statistica delle stesse e tanto più efficiente risulta la procedura di regionalizzazione.

Per elaborare le serie adimensionali dei massimi annui delle grandezze nivometriche in un’ottica “regionale” (ossia per la definizione della curva di crescita regionale), nella letteratura specialistica (Cunnane, 1989) è consigliato l’impiego delle seguenti leggi di distribuzione di probabilità:

- la legge generale del massimo valore (*Generalised Extreme Value*, di solito indicata con la dicitura GEV), caratterizzata da tre parametri (posizione, u , scala, α , forma, k), la cui forma inversa (*quantile function*) ha la seguente espressione (Lu & Stedinger, 1992):

$$y(F) = u + \frac{\alpha}{k} \left[1 - (-\ln F)^k \right] \quad [10]$$

con F indicante la probabilità cumulata;

- la legge Wakeby (di solito indicata con la dicitura WAK), caratterizzata da 5 parametri (m, a, b, c, d), definita nella forma inversa nel seguente modo (Houghton, 1978):

$$y(F) = m + a \cdot \left[1 - (1 - F)^b \right] - c \cdot \left[1 - (1 - F)^{-d} \right] \quad [11]$$

Sono stati proposti diversi approcci per la stima (regionale) dei parametri della curva di crescita regionale. Nel seguito vengono riportati i due metodi di maggior impiego nella pratica.

- Approccio *station year*. I valori adimensionali y_{ij} vengono raggruppati in un unico campione di dimensione:

$$N = \sum_{j=1}^M N_j \quad [12]$$

Al campione unico si applicano le procedure standard di stima parametrica (metodo dei momenti ordinari, massima verosimiglianza, momenti pesati in probabilità, Greenwood *et al.*, 1979; Landwehr *et al.*, 1979a,b).

- Approccio basato sulle medie regionali dei momenti pesati in probabilità (*regional averaging of probability weighted moments, RAPWM*). Utilizzando tale procedura vengono stimati i momenti pesati in probabilità (PWM) per ogni serie adimensionale di valori x_{ij} relativa a ciascun sito ($M_{(k)j}$). I momenti $\overline{M}_{(k)}$ della distribuzione a scala regionale (cioè della curva di crescita regionale) si

ottengono come media pesata dei momenti relativi alle serie di ogni stazione, dove i pesi sono funzione del numero di osservazioni di ogni serie:

$$\overline{M}^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^M M_{(k)j} \cdot N_j}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad [13]$$

dove j indicizza la stazione e k l'ordine del PWM. Noti i momenti pesati in probabilità della curva di crescita regionale, la determinazione dei suoi parametri è facilmente ottenibile mediante semplici relazioni algebriche.

Nel presente lavoro si è optato per l'utilizzo della legge Wakeby, caratterizzata da maggiore robustezza rispetto alla GEV, e per l'adozione del metodo *regional averaging of moments*, meno affetto, rispetto all'approccio di tipo *station year*, dagli errori legati alla possibile correlazione tra i dati registrati delle diverse stazioni di misura nel corso dei medesimi anni (Cunnane, 1989). Nel seguito la procedura di analisi regionale adottata nel presente studio sarà indicata con la dicitura "WAK/RAPWM".

Determinata la curva di crescita regionale, $y=y(F)$ il valore $x_j(T)$ alla j -esima stazione si ottiene semplicemente dalla relazione:

$$x_j(T) = y(T) \cdot \overline{x}_j \quad [14]$$

Il metodo del "valore indice" ben si presta anche per il calcolo di $x(T)$ in siti non strumentati, quale risultano tipicamente le zone di distacco delle valanghe. In questi casi il valore medio della variabile (\overline{x}) da introdurre nella [14] è ottenibile mediante analisi regressive sui parametri morfometrici della zona di distacco (quali ad esempio quota ed esposizione). I coefficienti della regressione vengono calcolati a partire dai valori \overline{x}_j rilevati nei siti monitorati della regione.

Nel contesto delle analisi condotte la quota si è dimostrata una variabile estremamente significativa al fine di spiegare le differenze tra i valori medi delle variabili nivometriche registrate in stazioni di misura differenti.

17.4.3 Curve di crescita regionali

L'analisi condotta sui coefficienti di variazione dei campioni di H_s ha evidenziato che il criterio di omogeneità: $CV(CV) < 0,4$, risulta già verificato alla scala di tutto il territorio montano friulano (infatti risulta $CV(CV) = 0,19$). Ciò dimostra che, a meno di un fattore di scala locale (ovvero il valore medio di H_s), la variazione inter-stagionale della variabile H_s ha comportamenti non eccessivamente dissimili tra le varie stazioni distribuite sul territorio montano friulano. Rappresentando i CV delle singole stazioni in funzione della loro quota si osserva peraltro una dipendenza abbastanza significativa (Figura 7), con un attenuamento generale del CV al crescere della quota (ragionevole conseguenza di un comportamento più stabile in termini di variabilità inter-stagionale alle quote più elevate). Al fine di considerare campioni di dati caratterizzati da un maggiore grado di omogeneità si è pertanto ritenuto sensato dividere il campione complessivo in due classi distinte, in dipendenza dell'ubicazione altimetrica delle stazioni:

- Classe 1: stazioni poste a quote inferiori ai 1000 m s.l.m.

- Classe 2: stazioni poste a quote superiori ai 1000 m s.l.m.

I CV medi relativi alle due classi così definite sono risultati significativamente differenti, e il grado di omogeneità delle stesse notevolmente accresciuto rispetto al campione regionale (con un CV(CV) pari a circa 0.12 per le stazioni appartenenti ad entrambe le classi 1 e 2, ed una riduzione di circa il 40% rispetto alla regione complessiva).

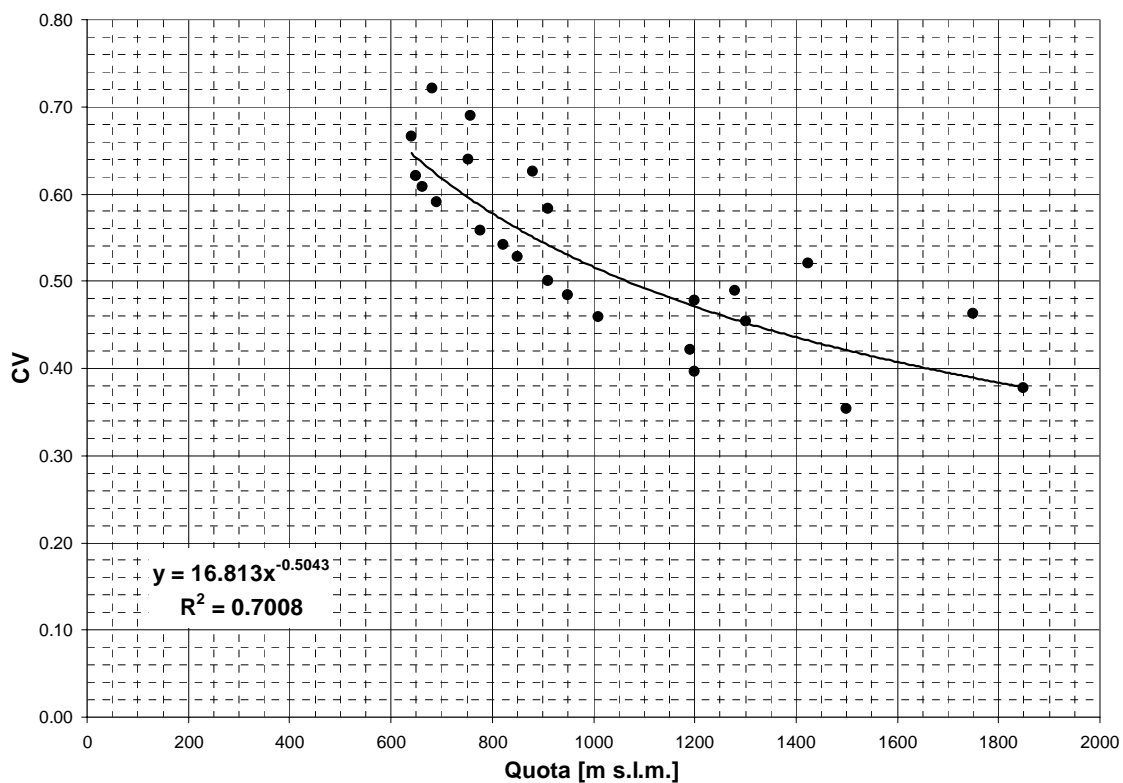


Fig. 7 - Correlazione dei CV con la quota. I punti rappresentano i dati campione, la linea l'interpolante la cui equazione è riportata in figura.

In Figura 8 sono rappresentate le *Curve di Crescita Regionale* relative ad H_s , rispettivamente a quote inferiori e superiori a 1000 m s.l.m. e valide su tutto il territorio montano friulano.

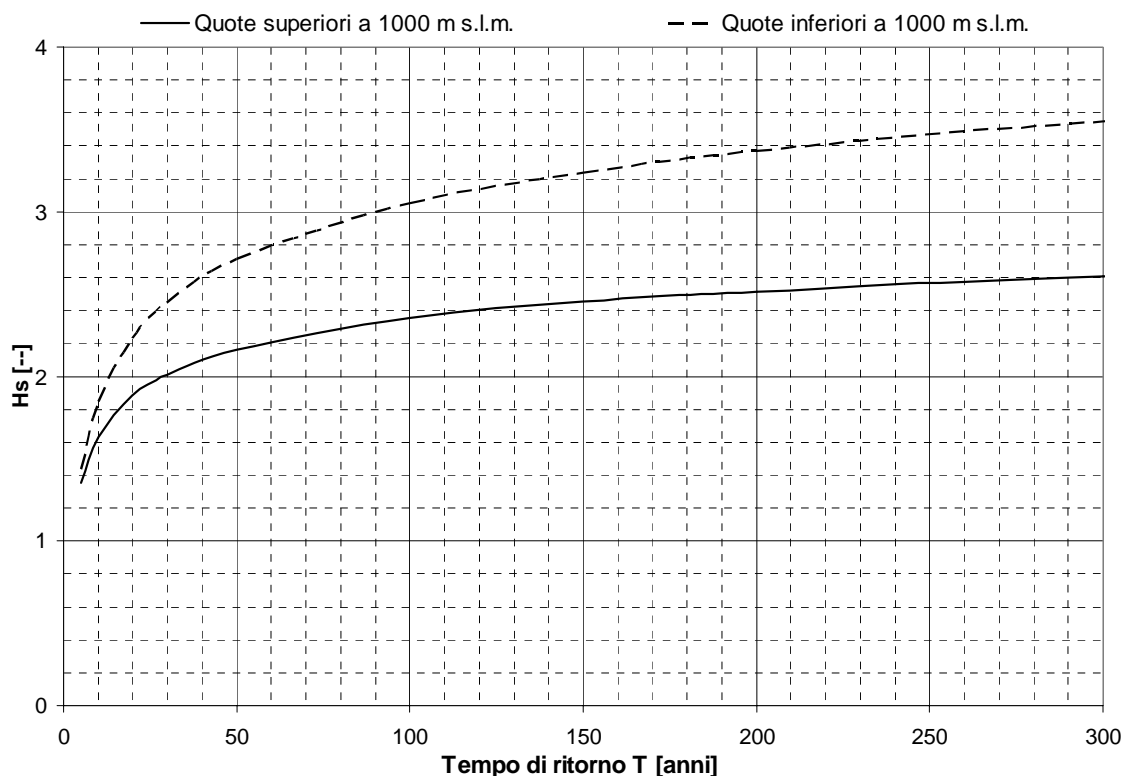


Fig. 8 - Curve di crescita regionale di H_s , valide per l'intero territorio montano friulano. Legge di ripartizione utilizzata: Wakeby (WAK; Equazione [11]). Metodo di stima dei parametri: media regionale dei momenti pesati in probabilità (RAPWM).

Valori dei parametri per quote inferiori a 1000 m s.l.m.:

$a = 0.23755$; $b = 8.89633$; $c = -8.38180$; $d = -0.08329$; $m = 0.14204$.

Valori dei parametri per quote superiori a 1000 m s.l.m.:

$a = 0.24708$; $b = 4.97077$; $c = -3.23468$; $d = -0.17566$; $m = 0.31099$.

17.5 VALORI DI PROGETTO

Le curve di crescita regionale definite al paragrafo precedente (vedi Figura 8) descrivono la dipendenza della variabile nivometrica (H_s) adimensionale dal tempo di ritorno, e sono valide, a meno delle differenziazione relativa all'intervallo di quota, per l'intero territorio montano friulano. Qualora si voglia valutare l'andamento di H_s in una specifica posizione della regione, la relativa curva di crescita regionale va opportunamente scalata con riferimento alla posizione scelta. Il fattore di scala è rappresentato dal valore medio di H_s nel punto di interesse (vedi equazione [14]). Naturalmente per i siti strumentati tale valore è direttamente disponibile e potrebbe essere utilizzato per ottenere l'andamento locale di H_s con T . D'altro canto poiché si sono trovate relazioni regressive dei valori medi di H_s con la quota estremamente significative, almeno all'interno di opportune sottoregioni geografiche (vedi equazioni [7] e [8]), si è preferito utilizzare direttamente tali relazioni per ottenere gli opportuni fattori di scala. In effetti, sebbene in tale maniera con riferimento ai siti strumentati si possa perdere in accuratezza (in ogni caso in maniera contenuta), la valenza notevolmente più generale dello studio così condotto giustifica ampiamente tale scelta.

I valori di progetto delle due variabili nivometriche analizzate (H_s e $DH3gg$), ovvero i valori attesi per fissata zona geografica, quota e tempo di ritorno, sono presentati alle Tabelle 3 e 4.

Appare importante mettere in evidenza che i dati elaborati nel presente studio sono relativi a stazioni ubicate approssimativamente tra i 500 ed i 2000 m s.l.m. La stima delle

variabili nivometriche considerate (*Hs* e *DH3gg*) può quindi essere ritenuta accurata con riferimento esclusivo a tale intervallo di quote; i valori a quote superiori ai 2000 m s.l.m. hanno quindi valore puramente indicativo. Un'analisi più approfondita del comportamento a quote elevate dovrà essere necessariamente preceduta da una adeguata raccolta di dati.

Tab. 3 - Altezze del manto nevoso al suolo (*Hs*) sul territorio montano friulano per prefissate quote e tempi di ritorno (tecnica di regionalizzazione di tipo "index-flood", metodo di stima della curva di crescita regionale di tipo WAK/RAPWM).

		Tempi di ritorno [anni]								
		5	10	20	30	50	100	150	200	300
ZONA A	Quota [m s.l.m.]									
		500	50	64	77	84	93	105	111	115
	600	65	82	98	107	118	132	140	145	152
	700	81	102	122	132	145	162	171	177	186
	800	99	124	147	160	175	194	204	211	221
	900	119	148	174	189	206	228	240	248	259
	1000	140	173	203	220	240	264	278	287	299
	1100	163	200	235	253	275	303	318	328	342
	1200	187	229	268	289	313	344	360	371	386
	1300	213	260	303	326	353	386	405	417	433
	1400	241	293	340	365	395	432	451	465	482
	1500	270	328	379	407	439	479	500	515	534
	1600	301	364	420	450	485	529	551	567	587
	1700	333	402	463	496	534	580	605	621	643
	1800	367	442	508	544	584	634	661	678	702
	1900	402	484	555	593	637	690	719	737	762
	2000	440	527	604	645	692	749	779	799	825
	2100	456	547	627	670	718	778	809	829	857
	2200	473	567	650	694	745	806	839	860	889
	2300	489	587	674	719	772	835	869	891	921
	2400	506	607	697	744	798	864	899	922	953
	2500	523	628	720	768	825	893	929	953	984
ZONA B	500	30	38	46	51	56	63	67	69	73
	600	40	50	60	66	73	81	86	89	94
	700	51	64	76	83	91	102	107	111	117
	800	63	79	94	102	112	124	131	135	141
	900	77	96	113	123	134	148	156	161	168
	1000	92	114	134	145	158	174	183	189	197
	1100	109	134	157	169	184	202	212	219	228
	1200	127	155	181	195	211	232	243	250	261
	1300	146	178	207	223	241	264	276	284	295
	1400	166	202	235	252	272	298	311	320	332
	1500	188	228	264	283	306	333	348	358	371
	1600	211	256	295	316	341	371	387	398	412
	1700	236	284	328	351	378	411	428	440	455
	1800	261	315	362	387	416	452	471	483	500
	1900	288	347	398	426	457	495	516	529	547
	2000	317	380	436	465	500	541	563	577	596
2100	327	393	451	481	516	559	582	597	616	
2200	338	406	465	497	533	577	601	616	637	
2300	348	418	480	512	550	596	620	636	657	
2400	359	431	495	528	567	614	639	655	677	
2500	369	444	509	544	584	632	658	675	697	

Tab. 4 - Incremento di altezza del manto nevoso su tre giorni consecutivi (*DH3gg*) sul territorio montano friulano per prefissate quote e tempi di ritorno (tecnica di regionalizzazione di tipo "index-flood", metodo di stima della curva di crescita regionale di tipo WAK/RAPWM).

		Tempi di ritorno [anni]								
		5	10	20	30	50	100	150	200	300
	Quota [m s.l.m.]									
	ZONA A	500	38	46	54	59	64	72	76	79
600		46	55	65	70	77	86	91	95	100
700		53	65	76	82	90	100	107	111	117
800		61	74	86	94	103	115	122	127	134
900		69	83	97	105	116	129	137	142	150
1000		76	92	108	117	128	144	152	158	167
1100		84	102	119	129	141	158	167	174	184
1200		92	111	130	141	154	172	183	190	200
1300		99	120	140	152	167	187	198	206	217
1400		107	129	151	164	180	201	213	222	234
1500		115	138	162	176	193	215	228	237	250
1600		122	148	173	187	205	230	244	253	267
1700		130	157	184	199	218	244	259	269	284
1800		138	166	194	211	231	258	274	285	300
1900		145	175	205	222	244	273	289	301	317
2000		153	185	216	234	257	287	304	317	334
2100		160	194	227	246	270	301	320	332	350
2200	168	203	238	258	282	316	335	348	367	
2300	176	212	248	269	295	330	350	364	384	
2400	183	222	259	281	308	344	365	380	401	
2500	191	231	270	293	321	359	381	396	417	
ZONA B	500	30	36	43	46	51	57	60	62	66
	600	36	44	51	55	61	68	72	75	79
	700	42	51	60	65	71	79	84	87	92
	800	48	58	68	74	81	90	96	100	105
	900	54	66	77	83	91	102	108	112	118
	1000	60	73	85	92	101	113	120	125	132
	1100	66	80	94	102	111	124	132	137	145
	1200	72	87	102	111	121	136	144	150	158
	1300	78	95	111	120	132	147	156	162	171
	1400	84	102	119	129	142	158	168	175	184
	1500	90	109	128	138	152	170	180	187	197
	1600	96	116	136	148	162	181	192	200	210
	1700	102	124	145	157	172	192	204	212	224
	1800	108	131	153	166	182	203	216	224	237
	1900	114	138	162	175	192	215	228	237	250
	2000	120	146	170	185	202	226	240	249	263
	2100	126	153	179	194	213	237	252	262	276
2200	132	160	187	203	223	249	264	274	289	
2300	138	167	196	212	233	260	276	287	302	
2400	144	175	204	222	243	271	288	299	316	
2500	151	182	213	231	253	283	300	312	329	