

P.Z.E.V.

Piano delle Zone esposte a valanga

Oggetto:

ANALISI CLIMATICA E NIVOMETEOROLOGICA

Committente:

Infrastrutture Milano Cortina 2020-2026 S.p.A.
 Sede Legale Piazzale Luigi Sturzo n. 31 - 00144 Roma
 Unità Locali: Via Fabio Filzi, 22 Palazzo Pirelli - 20124
 Milano | Alexander Girardi Hall - 320043 Cortina
 d'Ampezzo
 C.F. 16406341004 - n. REA. RM - 1655339

Elaborato

R_02

Tipo elaborato

Relazione descrittiva

Determina

27

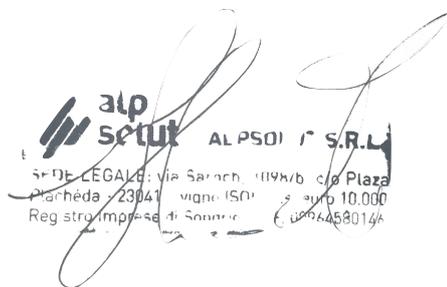
CUP

C11C22006460007

Professionisti:

Dott. Fabiano Monti

Ing. Luca Dellarole



ALPSOLUT S.R.L.
 Sede Legale: via Saroch 1098/B, 23041 Livigno (SO) Italy
 Piazza Parheda - 23041 Livigno (SO) Italy C.F. 00964580146
 Registro Imprese di Sondrio n. 00964580146



ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROV. DI VARESE
 n. 3890
 LUCA DELLAROLE

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	17/02/2025	Aggiornamento dell'analisi climatica e nivo-meteorologica	L. Dellarole	F. Monti	L. Dellarole

1. Premessa	3
2. Analisi climatica e nivometeorologica	4
2.1. Valutazione climatica dell'area di Livigno	4
2.2. Analisi Nivometrica	12
2.3. Analisi della ventosità	19

1. Premessa

Il presente elaborato si basa e riprende il documento consegnato al Comune di Livigno nel 2020, redatto dalla medesima società, e costituisce parte integrante dello studio DEI PIANI DI ZONA ESPOSTA A VALANGHE (P.Z.E.V) per i siti valanghivi 469 – Freita e 470 – Rin di Val Fin / Gerus.

La serie storica impiegata in tale elaborato risulta ancora valida, in quanto negli anni successivi non si sono verificati eventi di particolare rilevanza che possano comprometterne l'accuratezza e l'efficacia. Inoltre, in questo modo è preservata la coerenza dell'elaborato con quanto già recepito all'interno del Piano di Governo del Territorio comunale.

2. Analisi climatica e nivometeorologica

La presente relazione analizza in maniera approfondita gli aspetti climatici e nivometeorologici del territorio comunale di Livigno, al fine di definire in modo preciso le caratteristiche nivologiche dell'area. Lo studio si propone di verificare l'adeguatezza dei parametri nivometrici impiegati come input per le simulazioni della dinamica delle valanghe e per la valutazione dell'efficacia delle opere paravalanghe.

L'indagine delle condizioni climatiche della valle di Livigno è particolarmente rilevante, in quanto il territorio si colloca in una zona di confine tra il tipico clima sud-alpino e quello nord-alpino. Tale configurazione geografica determina una variabilità degli eventi nevosi, che possono essere innescati sia da perturbazioni provenienti dai quadranti meridionali sia da quelle in arrivo dai quadranti nord-occidentali.

Successivamente alla caratterizzazione climatica, è stata condotta un'analisi dettagliata dei dati raccolti dalle stazioni di rilevamento, finalizzata a individuare i parametri essenziali da utilizzare nel processo di valutazione delle opere di difesa e nelle simulazioni della dinamica delle valanghe.

2.1. Valutazione climatica dell'area di Livigno

L'obiettivo delle analisi consiste nel caratterizzare le condizioni di innevamento del territorio di Livigno, identificando le principali caratteristiche del manto nevoso e i parametri critici ad esso associati. Lo studio è stato realizzato grazie alla collaborazione con il WSL Istituto per la Ricerca Neve e Valanghe SLF di Davos (CH) e con il Centro ARPA di Bormio, i quali hanno fornito le serie storiche dei dati nivometeorologici provenienti dalle stazioni di rilevamento manuale dislocate attorno all'area di Livigno. In figura 1 e in tabella 3 sono illustrate e riassunte le informazioni generali relative alle stazioni nivometeorologiche coinvolte.

I parametri analizzati comprendono:

- Altezza di neve al suolo (HS)
- Differenza di altezza di neve al suolo in tre giorni consecutivi (DHS3gg)

Dataset e Metodologia

Sono disponibili dati provenienti da un totale di 13 stazioni, di cui 11 situate in territorio svizzero e 2 in territorio italiano (San Rocco e Cancano)(Fig. 1). Tra le stazioni svizzere, 2 (Buffalora e Pontresina) appartengono alla rete di rilevamento manuale gestita dall'Ufficio Federale di Meteorologia e Climatologia (Meteo Svizzera), mentre le restanti sono sotto la gestione del WSL Istituto per la Ricerca Neve e Valanghe SLF di Davos (CH). Le stazioni italiane, invece, sono gestite dal Centro Nivometeorologico di Bormio (SO).

Le serie storiche disponibili presentano una notevole quantità di dati, con periodi di osservazione che variano tra 34 e 77 stagioni invernali. L'ubicazione altimetrica delle stazioni è compresa tra 1415 m e 2255 m s.l.m.; la maggior parte (8 stazioni) è concentrata tra i 1500 m e i 2000 m s.l.m., mentre le rimanenti sono collocate a quote superiori a 2000 m s.l.m. (Fig. 2)

Per la stazione di Livigno (San Rocco), i dati sono stati acquisiti da rilevazioni effettuate in due differenti siti, a seconda degli anni di registrazione. Al fine di ottenere un unico punto di riferimento, le misurazioni sono state calibrate correggendo il gradiente di altezza di neve in funzione della quota e riportate all'altitudine di San Rocco.

L'approfondimento climatico è stato condotto considerando due scenari:

1. Macro-area unica: comprendente tutte le stazioni.
2. Suddivisione in due micro-aree: con le stazioni suddivise in base alla zona (Nord e Sud).

La mappa (Fig. 1) e la tabella 1 evidenziano la differenziazione delle stazioni: quelle appartenenti all'area Nord sono indicate in rosso, mentre quelle dell'area Sud in blu. Per ciascuna stazione, i dati sono stati filtrati per isolare esclusivamente i massimi annuali, al fine di concentrarsi sugli eventi di innevamento più significativi.



Figura 1: mappa del territorio di Livigno ed individuazione delle stazioni di rilevamento; suddivise secondo le due sotto-aree descritte nel seguito.

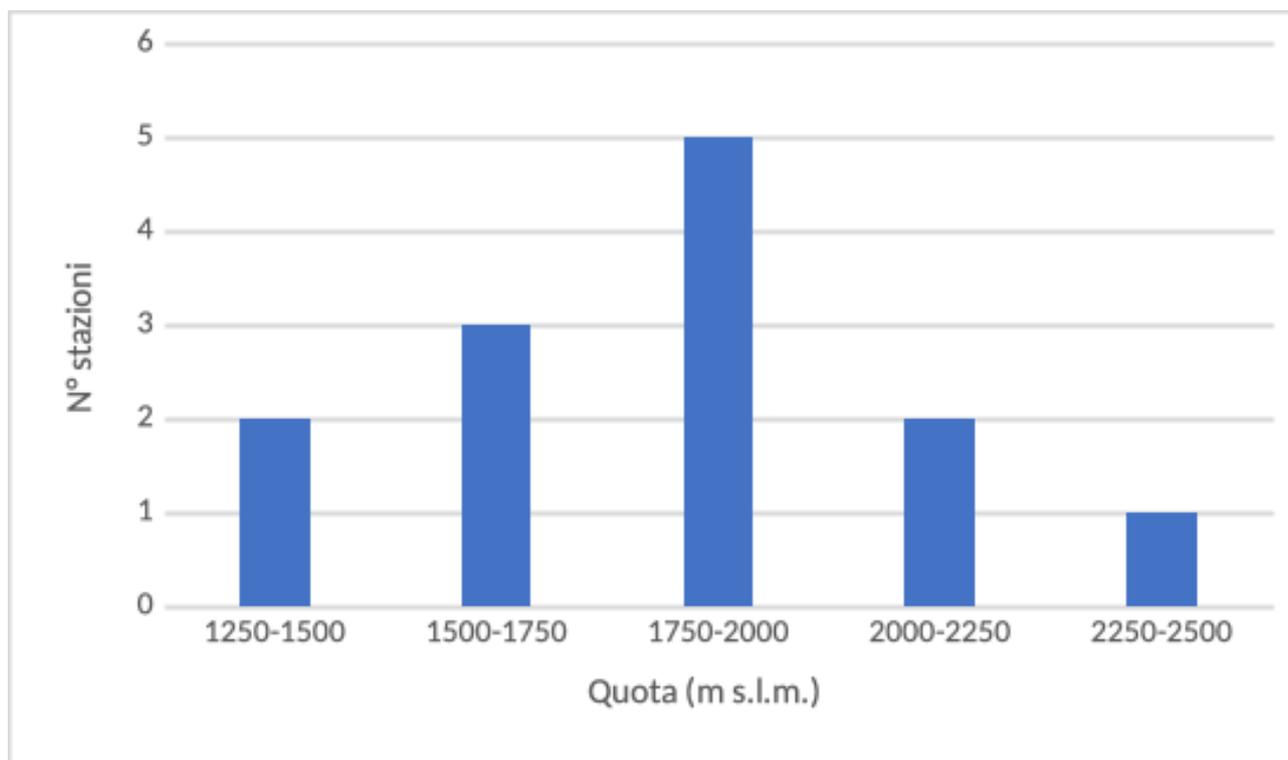


Figura 2: distribuzione altimetrica delle stazioni di rilevamento.

Codice stazione	Denominazione	Quota [m]	Anni di osservazione	Serie storica
7AG	Alp Grüm	2090	67	1953/54 – 2018/19
7BP	Berninapass	2255	67	1953/54 – 2018/19
7CA	Cavaglia	1690	75	1945/46 – 2018/19
7DI	Bernina Diavolezza	2090	75	1945/46 – 2018/19
7LD	La Drossa	1710	68	1950/51 – 2018/19
7SD	Samedan	1750	76	1950/51 – 2018/19
7ST	Sta.Maria	1415	70	1950/51 – 2018/19
7ZN	Zernez	1475	67	1953/54 – 2018/19
7ZU	Zuoz	1710	77	1943/44 – 2018/19
BUF	Buffalora	1970	54	1963/64 – 2018/19
CAN5	Cancano	1950	34	1984/85 – 2018/19
PON	Pontresina	1840	68	1950/51 – 2018/19
SRO	San Rocco	1875	49	1968/69 – 2017/18

Tabella 1: riassunto delle informazioni generali delle stazioni analizzate.

Unica macro-area

Per ciascuna stazione è stata calcolata la mediana dei valori massimi annuali relativi a due parametri:

- Altezza della neve al suolo (HS)
- Differenza di altezza della neve in tre giorni consecutivi (DHS3gg)

Successivamente, l'andamento di tali mediane è stato analizzato in funzione della quota altimetrica delle stazioni.

Risultati:

HS: L'analisi del trend della mediana di HS rispetto alla quota ha evidenziato una correlazione con un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0,6913$ (Fig. 4).

DHS3gg: L'elaborazione dei dati relativi a DHS3gg ha mostrato una correlazione con un coefficiente di determinazione pari a $R^2 = 0,5858$ (Fig. 5).

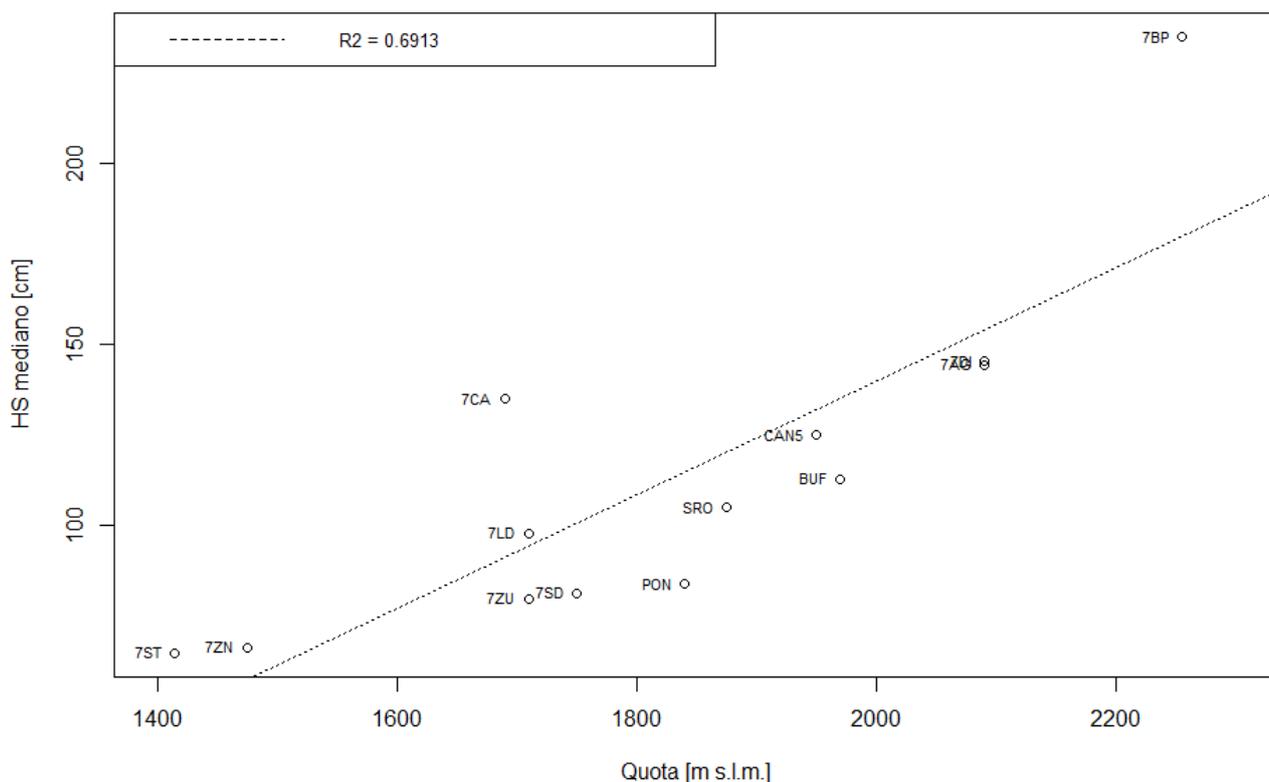


Figura 4: retta di regressione di HS con la quota, per tutte le stazioni, scenario unica area.

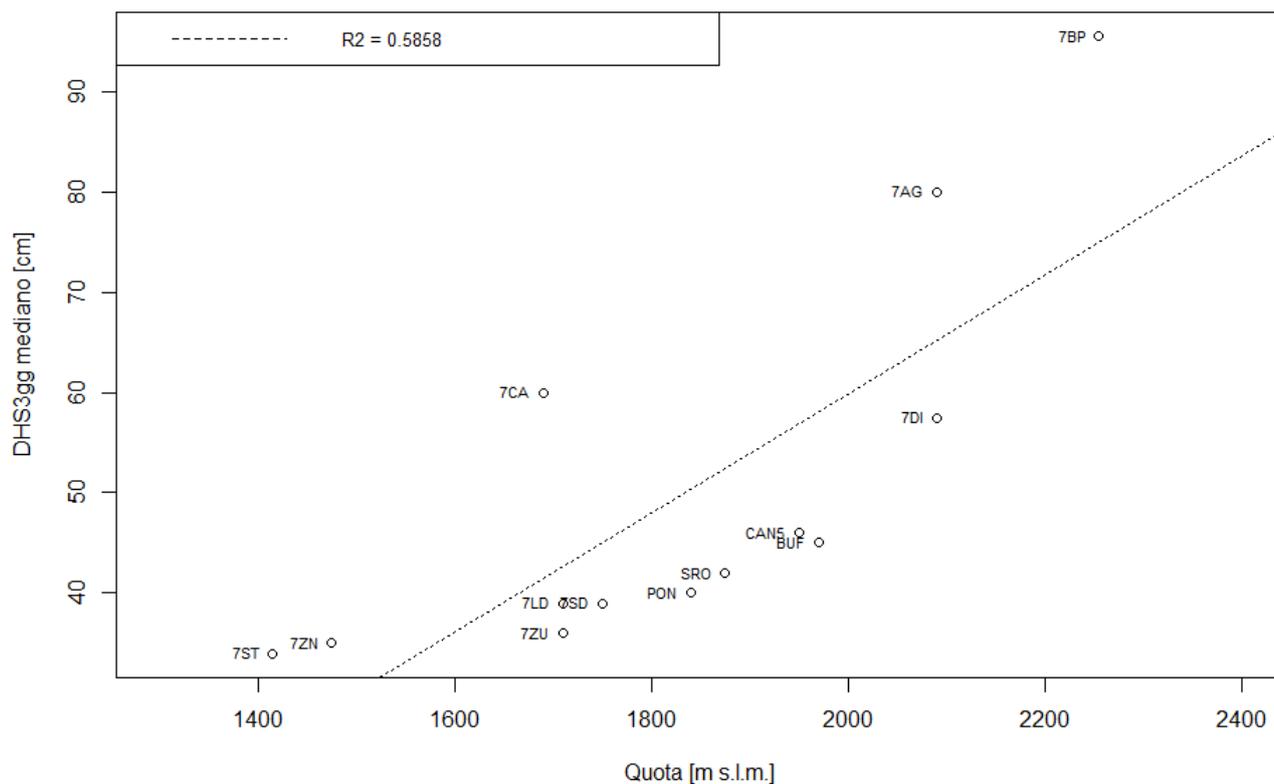


Figura 5: retta di regressione di DHS3gg rispetto alla quota, per tutte le stazioni, scenario unica area.

Due Micro-Aree

Il secondo approccio prevede la suddivisione del territorio di Livigno in due sotto-aree, ottenendo così due rette di interpolazione che consentono un miglioramento dei coefficienti di correlazione rispetto all'analisi condotta sull'area unica.

Risultati dei Coefficienti di Correlazione

Altezza della neve al suolo (HS) (Fig. 6):

- Micro-area Nord: $R^2 = 0,8211$
- Micro-area Sud: $R^2 = 0,6113$

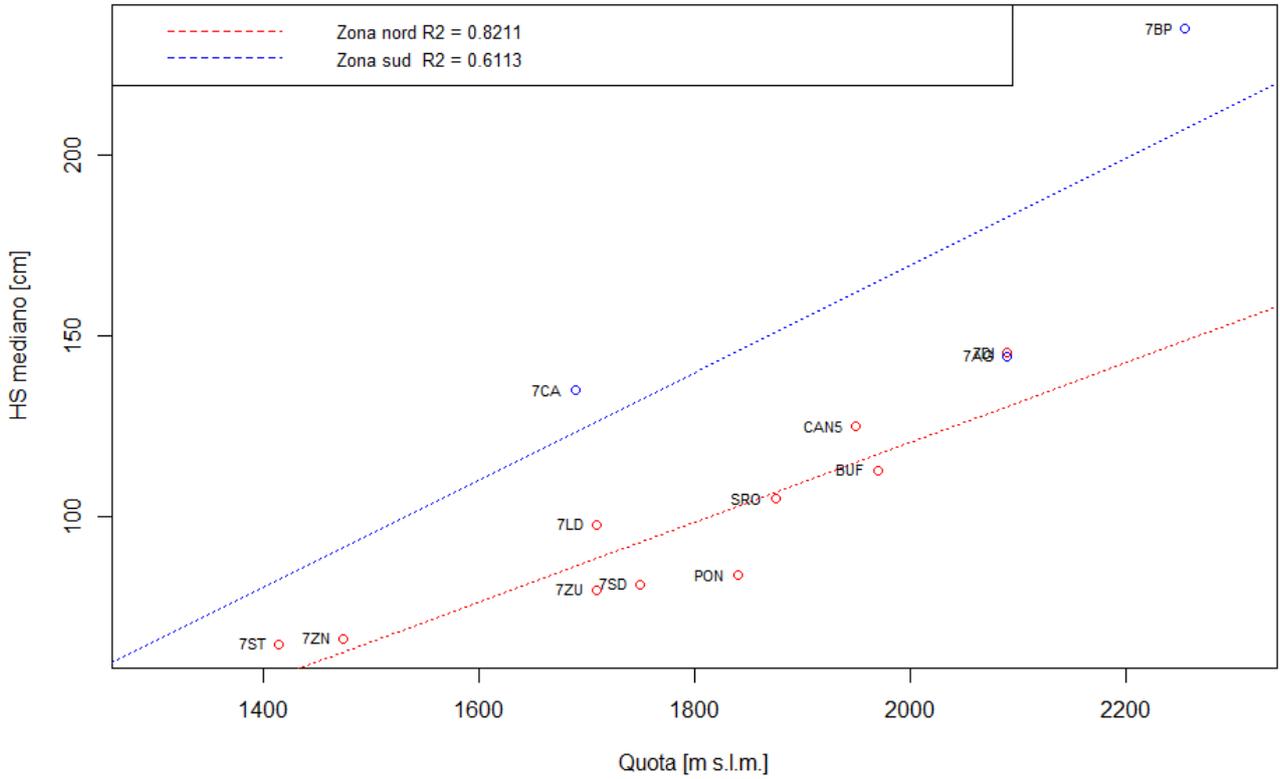


Figura 6: retta di regressione di HS con la quota, scenario due micro-aree.

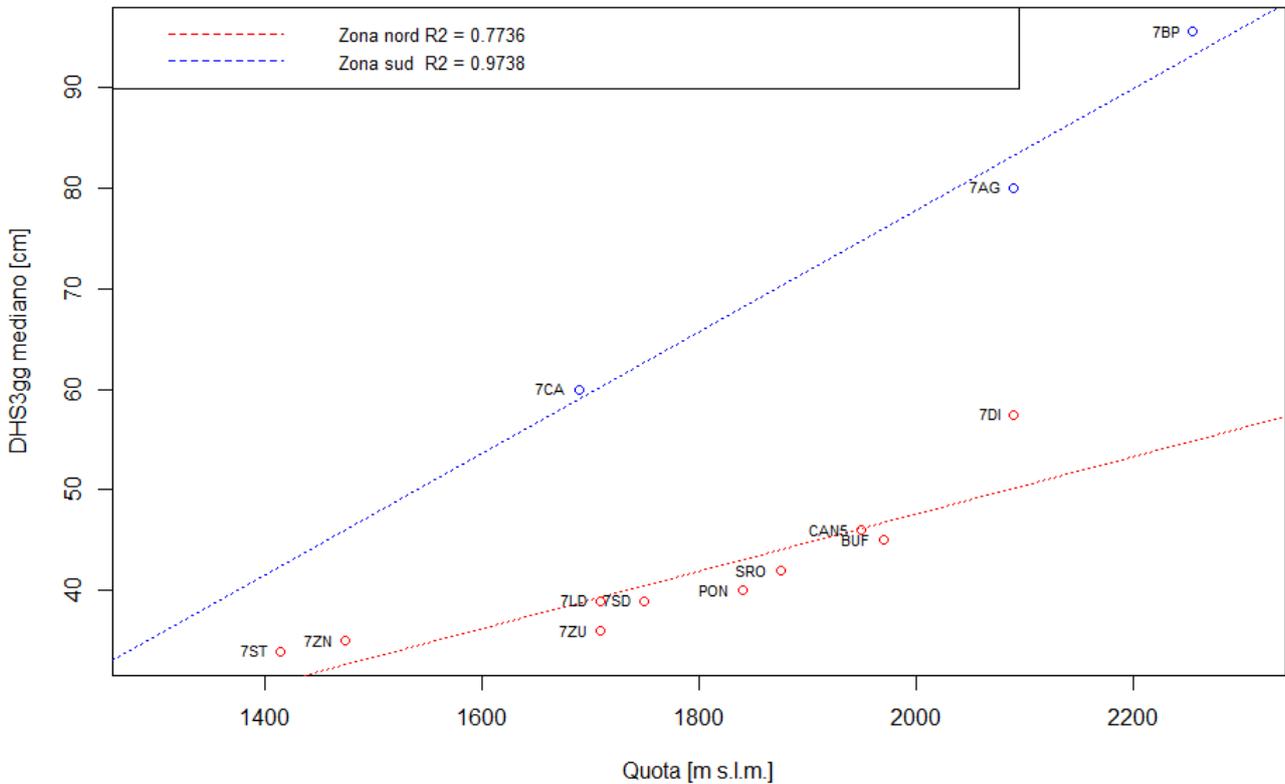


Figura 7: retta di regressione di DHS3gg con la quota, scenario due micro-aree.

Differenza di altezza di neve in tre giorni consecutivi (DHS3gg) (Fig. 7):

- Micro-area Nord: $R^2 = 0,7736$
- Micro-area Sud: $R^2 = 0,9738$

L'analisi evidenzia un gradiente più marcato per la sotto-area Sud. Tuttavia, si deve considerare che in quest'ultima sono presenti soltanto 3 stazioni, di cui una (7BP - Ospizio Bernina) risulta fortemente esposta all'attività eolica, rendendola meno rappresentativa delle reali condizioni di innevamento.

Conclusioni sull'Approccio

Per le considerazioni sopra esposte, si è deciso di considerare il territorio di Livigno come un'unica area. Tale scelta è supportata dalla mancanza di basi solide per giustificare una separazione in due sotto-aree climatiche. L'approccio basato su due sotto-aree comporterebbe una sovrastima dei parametri nivometeorologici, in contrasto con le osservazioni locali disponibili.

Infine, l'analisi delle correlazioni di HS e DHS3gg con la quota, condotta nell'ambito dello scenario dell'area unica, ha fornito i seguenti gradienti:

- Gradiente di HS: 15,7 cm ogni 100 metri
- Gradiente di DHS3gg: 5,9 cm ogni 100 metri

Nei grafici seguenti (Fig. 8-9) sono illustrati i boxplot* dei massimi annuali di HS e DHS3gg per ciascuna stazione, ordinate in funzione dell'ubicazione altimetrica.

* I boxplot (o diagrammi a scatola) sono strumenti grafici utilizzati per rappresentare sinteticamente la distribuzione di un insieme di dati. In particolare, un boxplot evidenzia:

- La mediana: la linea centrale all'interno della scatola, che rappresenta il valore centrale della distribuzione.
- Il range interquartile: la "scatola" stessa, che si estende dal primo al terzo quartile, e indica dove si concentra la metà centrale dei dati.
- I "whiskers": le linee che si estendono dalla scatola fino ai valori minimo e massimo, escludendo eventuali outlier.
- Gli outlier: valori che si discostano significativamente dalla maggior parte dei dati, spesso rappresentati come punti isolati.

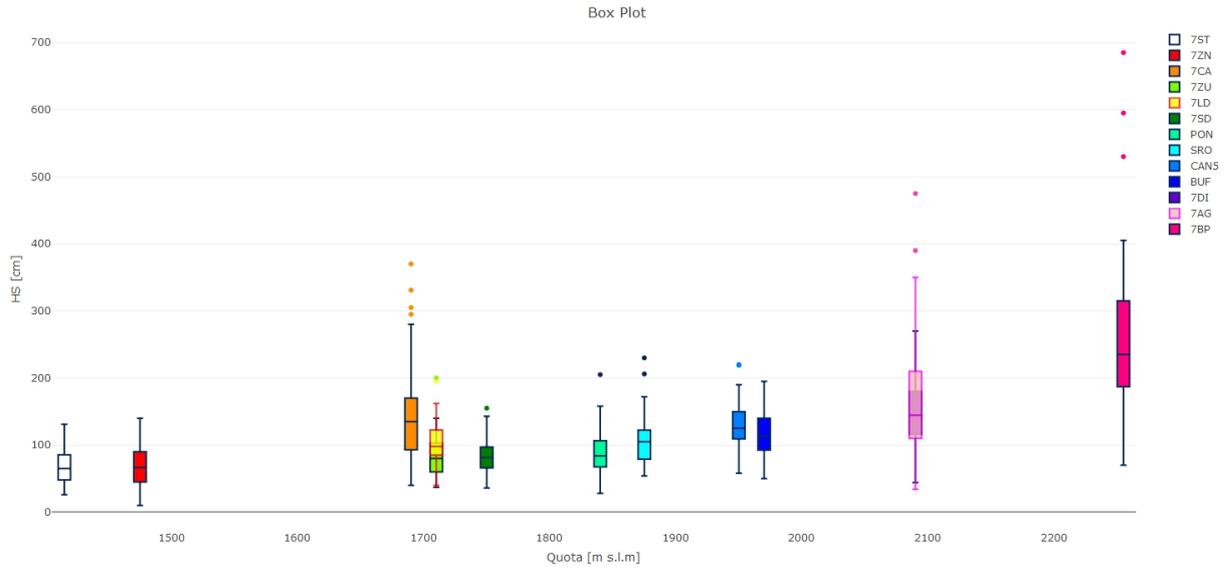


Figura 8: boxplot dei valori di HS per ogni stazione, rappresentate per quota altimetrica.

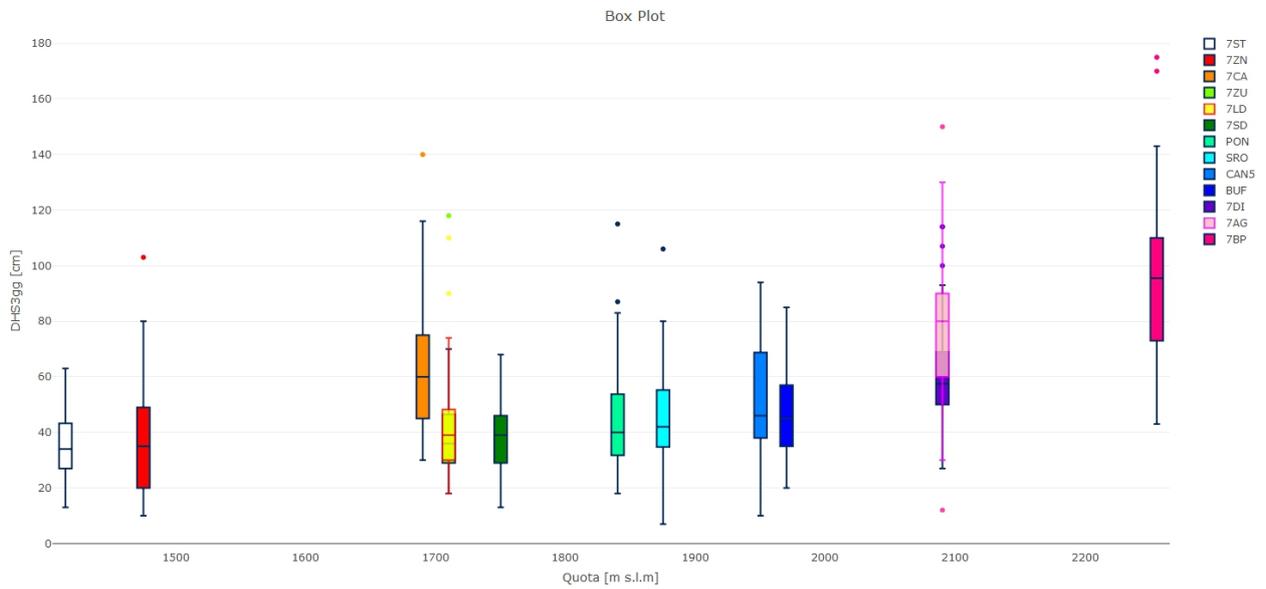


Figura 9: boxplot dei valori di DHS3gg per ogni stazione rappresentate per quota altimetrica.

2.2. Analisi Nivometrica

In questo capitolo si illustra l'elaborazione statistica dei parametri nivologici, nello specifico l'altezza della neve al suolo (HS) e la differenza di altezza in tre giorni consecutivi (DHS3gg), adottando due differenti approcci. L'obiettivo è definire le altezze di neve al suolo rapportate ai tempi di ritorno, informazioni fondamentali per:

- La valutazione delle opere di difesa lungo i siti valanghivi.
- Le simulazioni della dinamica delle valanghe.

Le analisi sono state condotte utilizzando la serie dei massimi annuali relativi alle misurazioni disponibili, che coprono un arco temporale compreso tra 34 e 77 stagioni invernali.

Metodo della Regionalizzazione

Il primo approccio, noto come Analisi Regionale, si basa sul "metodo del valore indice". Questo metodo consente di:

- Analizzare in maniera congiunta i dati provenienti da più stazioni.
- Definire una curva di crescita regionale che racchiude l'intero campione di dati.
- Utilizzare tale curva come funzione base per determinare i valori della variabile casuale per quote e/o siti specifici.

Verifica dell'Omogeneità dei Dati

Come primo step, è stata effettuata una verifica dei dati (massimi annuali) per ciascuna stazione mediante l'analisi del coefficiente di variazione (CV). L'approccio presuppone che i campioni delle serie adimensionali di ciascuna stazione seguano la medesima distribuzione di probabilità. Per limitare il grado di disomogeneità tra le stazioni, il valore di CV deve essere inferiore a 0,4. I valori ottenuti sono:

- CV di HS: 0,19
- CV di DHS3gg: 0,16

Determinazione della Curva di Crescita Regionale

I parametri della curva di crescita regionale, espressa dalla funzione $y = y(F)$, sono stati determinati utilizzando l'approccio dei momenti pesati in probabilità (PWM). L'elaborazione della serie adimensionale dei massimi annuali di HS e DHS3gg è stata eseguita tramite l'impiego della legge generale dei valori estremi (Generalised Extreme Value, GEV). Le formulazioni della GEV sono essenziali per calcolare i valori delle grandezze nivologiche in funzione di specifici tempi di ritorno.

La variabile casuale, riferita a una determinata quota e tempo di ritorno, si ottiene dalla seguente formula:

$$X_j(T) = y(T) \cdot \bar{X}_j$$

dove:

$y(T)$ rappresenta la variabile ridotta relativa al tempo di ritorno scelto.

\bar{X}_j è il valore mediano della variabile riferito alla quota di riferimento individuata.

Nel presente studio, la quota altimetrica di riferimento è stata fissata a 2000 m s.l.m.

In figura [Fig. 10] è riportata la Curva di Crescita Regionale ottenuta per DHS3gg.

Questa metodologia permette di sviluppare un approccio regionale robusto, fornendo una base affidabile per l'interpolazione dei parametri nivologici a quote e siti specifici.

Curva di crescita regionale

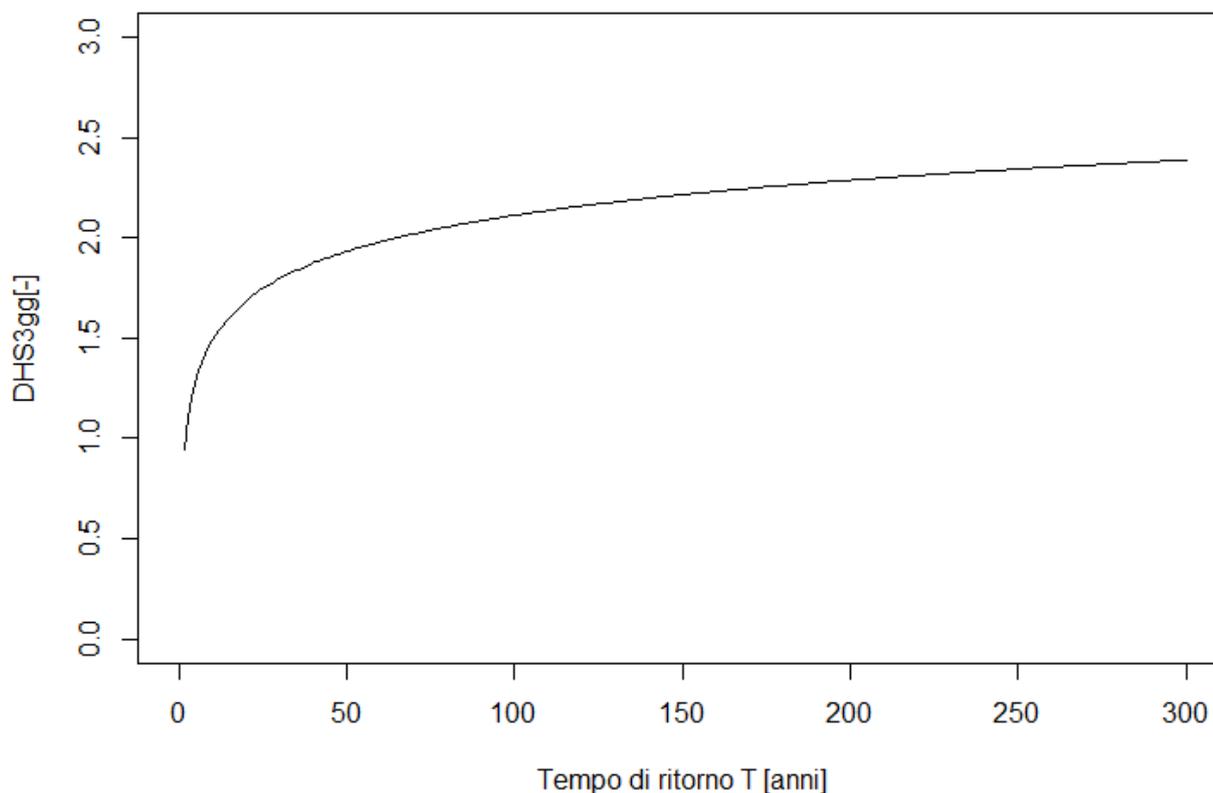


Figura 10: curva di crescita regionale per DHS3gg, definita tramite la legge di ripartizione GEV, metodo di stima dei parametri: momenti pesati in probabilità (PWM).

Metodo di Gumbel Puntuale e Mediato

Il secondo approccio si basa sulla prima legge asintotica del massimo valore (o di Gumbel) applicata a ciascuna serie temporale di ogni stazione di rilevamento. In questo caso, i dati di ingresso sono costituiti dai massimi annuali misurati per ciascuna stazione, e tramite il metodo di Gumbel vengono determinati i parametri nivologici associati ai tempi di ritorno di interesse.

Procedura Analitica

1. Determinazione Puntuale per Stazione:

Ad ogni stazione viene applicata la legge di Gumbel per ricavare, a partire dai massimi annuali, i valori nivologici relativi a specifici tempi di ritorno (ad es. TR = 3, 10, 30, 60, 100, 300 anni).

2. Media dei Valori:

I valori nivologici ottenuti per ciascuna stazione, mediante il metodo di Gumbel, sono successivamente mediati. Tale media viene effettuata separando gli scenari in funzione del tempo di ritorno, al fine di fornire una stima rappresentativa dei parametri nivologici per l'intera area di studio.

3. Correzione in Funzione della Quota:

Gli output derivanti dalla legge di Gumbel sono stati corretti in funzione della quota e riportati all'altitudine di riferimento di 2000 m s.l.m. Le correzioni sono state eseguite utilizzando i seguenti gradienti altimetrici:

HS: 15,7 cm ogni 100 m

DHS3gg:

- Gradiente 1 = 5,7 cm ogni 100 m
- Gradiente 2 = 5,0 cm ogni 100 m

Il gradiente per HS è stato definito in base alle valutazioni espresse nel capitolo 2.1. (scenario "unica area"), mentre per DHS3gg sono stati utilizzati due gradienti: il primo corrisponde alle stime del medesimo capitolo, mentre il secondo segue le indicazioni riportate nelle Linee Guida Svizzere (Salm et al., 1990) e nelle Linee Guida AINEVA.

HS a 2000 m

Codice stazione	Nome stazione	Quota (m)	N° stagioni documentate	TR = 3	TR = 10	TR = 30	TR = 60	TR = 100	TR = 300
7AG	Alp Grüm	2090	66	171	256	327	371	403	472
7BP	Berninapass	2255	66	238	355	453	514	558	654
7CA	Cavaglia	1690	74	210	279	337	372	399	455
7DI	Bernina Diavolezza	2090	74	152	206	252	281	302	346
7LD	La Drossa	1710	69	156	188	214	230	242	267

Codice stazione	Nome stazione	Quota (m)	N° stagioni documentate	TR = 3	TR = 10	TR = 30	TR = 60	TR = 100	TR = 300
7SD	Samedan	1750	70	130	158	182	197	207	231
7ST	Sta.Maria	1415	69	167	196	220	235	246	269
7ZN	Zernez	1475	66	157	190	217	234	246	273
7ZU	Zuoz	1710	76	136	165	190	205	216	240
BUF	Buffalora	1970	56	128	162	191	209	222	251
CANV2	Cancano	1950	35	149	190	224	245	261	295
PON	Pontresina	1840	69	122	156	185	203	216	244
SRO	San Rocco	1875	49	135	175	208	228	244	276
	Gumbel mediato			158	206	246	271	289	329

Tabella 2: rappresentazione di HS in funzione del tempo di ritorno, per ogni stazione e valore mediato su tutte le stazioni.

DHS3gg 2000 m Gradiente 5,7 cm / 100 m

Codice stazione	Nome stazione	Quota (m)	N° stagioni documentate	TR = 3	TR = 10	TR = 30	TR = 60	TR = 100	TR = 300
7AG	Alp Grüm	2090	66	78	105	127	141	151	173
7BP	Berninapass	2255	66	86	117	142	158	170	194
7CA	Cavaglia	1690	74	86	108	126	138	146	164
7DI	Bernina Diavolezza	2090	74	59	79	95	106	113	129
7LD	La Drossa	1710	69	63	81	95	104	111	125
7SD	Samedan	1750	70	56	69	79	86	91	101
7ST	Sta.Maria	1415	69	75	90	102	110	116	128
7ZN	Zernez	1475	66	73	93	110	120	128	144
7ZU	Zuoz	1710	76	61	77	91	100	106	120
BUF	Buffalora	1970	56	53	70	85	93	100	114
CANV2	Cancano	1950	35	61	82	100	111	119	137
PON	Pontresina	1840	69	59	77	93	103	110	125

Codice stazione	Nome stazione	Quota (m)	N° stagioni documentate	TR = 3	TR = 10	TR = 30	TR = 60	TR = 100	TR = 300
SRO	San Rocco	1875	49	58	78	95	106	113	130
	Gumbel mediato (Grad1)			67	87	103	114	121	137
	Analisi regionale			67	91	109	121	129	146

Tabella 3: rappresentazione di DHS3gg, in funzione del tempo di ritorno, riassunto delle analisi statistiche tramite i due metodi (analisi regionale e metodo di Gumbel mediato, gradiente di DHS3gg con la quota pari a 5,7 cm / 100 m).

DHS3gg 2000 m Gradiente 5,0 cm / 100 m

Codice stazione	Nome stazione	Quota (m)	N° stagioni documentate	TR = 3	TR = 10	TR = 30	TR = 60	TR = 100	TR = 300
7AG	Alp Grüm	2090	66	79	105	128	142	152	174
7BP	Berninapass	2255	66	89	119	145	160	172	197
7CA	Cavaglia	1690	74	83	105	124	135	143	161
7DI	Bernina Diavolezza	2090	74	60	80	96	106	114	130
7LD	La Drossa	1710	69	60	78	92	101	108	122
7SD	Samedan	1750	70	54	66	77	83	88	99
7ST	Sta.Maria	1415	69	69	84	97	105	110	123
7ZN	Zernez	1475	66	68	88	105	115	123	139
7ZU	Zuoz	1710	76	58	75	89	97	104	117
BUF	Buffalora	1970	56	53	70	84	93	99	113
CANV2	Cancano	1950	35	60	82	99	111	119	136
PON	Pontresina	1840	69	57	76	92	101	108	124
SRO	San Rocco	1875	49	57	77	94	104	112	129
	Gumbel mediato (Grad2)			65	85	102	112	119	136
	Analisi regionale			67	91	109	121	129	146

Tabella 4: rappresentazione di DHS3gg, in funzione del tempo di ritorno, riassunto delle analisi statistiche tramite i due metodi (analisi regionale e metodo di Gumbel mediato, gradiente di DHS3gg con la quota pari a 5,0 cm / 100 m).

I risultati ottenuti con il metodo di Gumbel mediato sono presentati nelle tabelle seguenti:

HS a 2000 m:

La tabella 2 riporta, per ciascuna stazione, i valori di HS a 2000m relativi ai diversi tempi di ritorno, insieme alle informazioni relative alla quota, al numero di stagioni documentate e ai valori mediati ottenuti.

DHS3gg a 2000 m:

Sono state rappresentate due tabelle:

La tabella 3 confronta i risultati dell'analisi regionale con quelli ottenuti con il metodo di Gumbel mediato, applicando un gradiente di DHS3gg pari a 5,7 cm ogni 100 m.

La tabella 4 che riporta i valori calcolati utilizzando il gradiente di 5,0 cm ogni 100 m, in linea con le indicazioni delle Linee Guida.

Come si evince dai dati, la differenza tra i due metodi aumenta all'aumentare del tempo di ritorno, con una differenza massima pari a 10–11 cm per un tempo di ritorno di 300 anni.

Scelta del Metodo

A seguito di approfonditi scambi di pareri con i tecnici del WSL Istituto per la Ricerca Neve e Valanghe SLF di Davos (CH), si è deciso di adottare il metodo di Gumbel mediato. Tale scelta si basa su:

- Una maggiore robustezza e minor incertezza dei risultati ottenuti rispetto all'analisi regionale.
- Le differenze tra l'applicazione dei due gradienti per DHS3gg (5,7 cm/100 m vs. 5,0 cm/100 m) sono state riscontrate essere molto contenute (1–2 cm), per cui si è optato per il gradiente indicato dalle Linee Guida (5,0 cm/100 m).

I parametri nivologici così definiti costituiscono la base per le valutazioni relative alle opere di difesa lungo i siti valanghivi e per le simulazioni della dinamica delle valanghe.

L'ultimo grafico del capitolo (Fig. 11) riporta le stime degli errori relativi al parametro DHS3gg, suddivise in funzione del tempo di ritorno per tutte le stazioni analizzate, fornendo così un quadro completo dell'accuratezza delle stime ottenute con il metodo di Gumbel mediato.

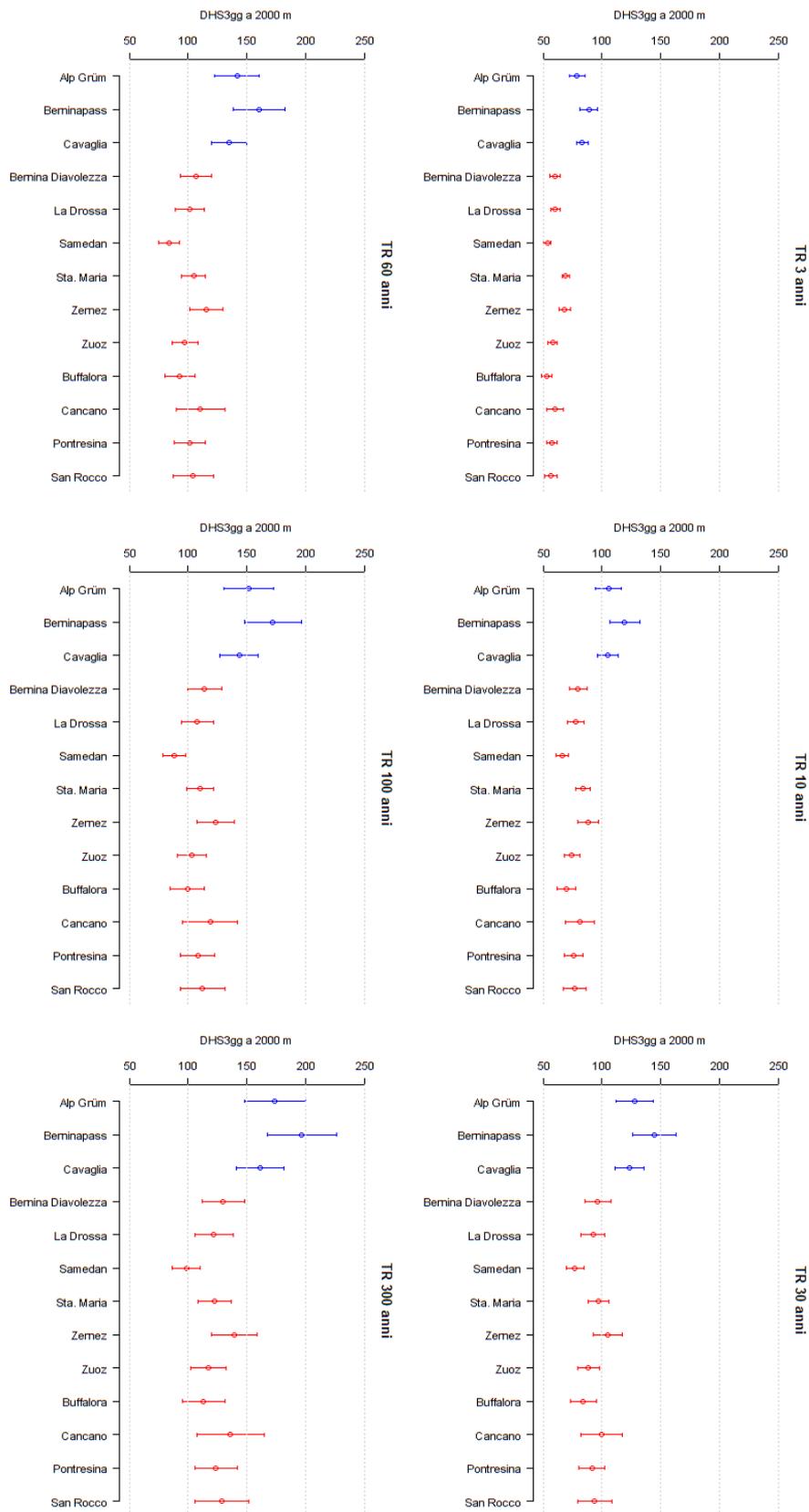


Figura 11: stime degli errori di DHS3gg suddivise in funzione del tempo di ritorno per tutte le stazioni analizzate.

2.3. Analisi della ventosità

Le stazioni di rilevamento non forniscono dati continui relativi alla velocità e alla direzione del vento, ad eccezione degli anni più recenti. Di conseguenza, non è stato possibile ricostruire serie storiche complete e significative per tali variabili, né eseguire analisi di dettaglio.

Per ovviare a tale limitazione, si è deciso di valutare la conformazione specifica di ciascun sito, integrando in maniera qualitativa informazioni relative alla quota, all'esposizione e alle osservazioni dirette. In base a tali elementi, viene determinato se includere o meno il sovraccarico di neve derivante dall'azione eolica.

Queste considerazioni sono state poi integrate nelle analisi delle simulazioni della dinamica delle valanghe e nella caratterizzazione dei singoli siti valanghivi.