



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria per l'Ambiente ed il Territorio

Analisi statistica e climatologica di dati di precipitazione
nevose a servizio della procedura di mappatura del pericolo
da valanga nella regione Abruzzo

Relatori
Prof. Giorgio Rosatti
Ing. Lorenzo Giovannini

Laureando
Gianluca Pelagatti

Correlatore
Ing. Marco Falocchi

Anno Accademico 2018 / 2019

Introduzione

Era il 18 gennaio 2017, l'ennesimo giorno di nevicata eccezionale nel Centro Italia. Ormai nevica ininterrottamente da un paio di settimane e, nelle ultime ore, si scatena una vera e propria bufera di neve sul versante orientale del Gran Sasso. Nella mattina un'altra serie di scosse sismiche scuote la terra e la popolazione, amplificando il disagio che si vive da giorni a causa dell'abbondante nevicata. La magnitudo intorno a 5 sulla scala *Richter* non fa danni ma spaventa tutti, compreso un gruppo di turisti in vacanza in un bellissimo hotel di Rigopiano.

Sperduto tra i boschi e lontano dal primo centro abitato, Farindola, le 40 persone, tra turisti e personale dell'hotel, si ritrovano isolate e senza la possibilità di ripartire, data la presenza di circa 3 m di neve sull'unica strada di collegamento. L'indomani mattina sarebbero arrivati i mezzi di soccorso della provincia a liberare la strada e riportarli a casa. L'indomani mattina dell'hotel non rimase nulla.

Quel tragico 18 gennaio, verso le ore 17, una grande valanga di neve si stacca dal pendio orientale del Gran Sasso e, seguendo un canalone ricoperto di una fitta vegetazione di alta montagna, si infrange sulla struttura, portando via tutto quello che incontra, inclusi sogni, speranze, vite [5].

A tre anni da quel giorno, ci si chiede ancora di chi fosse la colpa, a chi dare la responsabilità di quelle morti, chi deve risarcire i famigliari delle vittime. La valanga non è stata provocata per colpa di qualcuno, ma è risultato evidente a tutti che la struttura era costruita alla fine di un canalone del versante, potenziale percorso di fenomeni valanghivi.

In realtà, nessuno era in grado di affermare che in quel punto esisteva un pericolo così elevato, perché uno studio delle valanghe in Abruzzo non era stato ancora fatto. Solo a seguito di quella grande tragedia si è compreso il bisogno di modernizzare ed aggiornare le carte del pericolo dell'intero territorio abruzzese, considerando le variabili in funzione della storia, ma anche dell'orografia e delle condizioni climatiche, notevolmente influenzate dalle alte montagne e dalla vicinanza col mare [25].

Cosa sono le valanghe

I mass media utilizzano spesso il termine *slavina* per definire il fenomeno di distacco dal versante della montagna di una grande quantità di neve e di detriti. Non c'è differenza col termine di *valanga*, ma l'Associazione Interregionale Neve e Valanghe (AINEVA) [3] consiglia di utilizzare *valanga*. Si specifica che l'origine dei due termini sono nella lingua latina. Valanga deriva da *lavanchiae* e dal termine francese *aval*, che hanno prodotto l'attuale *avalanche*, da cui deriva l'italiano *valanga*. Il termine *slavina* deriva dall'alternativa definizione latina *labinae*, diffuso nelle regioni alpine.

Nelle valanghe vengono identificate tre zone principali: la *zona di distacco* è il luogo dove si origina il fenomeno, collocata in prossimità delle creste e dorsali, al di sopra del limite della vegetazione forestale o dove la neve, a seguito di nuove precipitazioni o del trasporto eolico, si accumula; nella *zona di scorrimento* la valanga raggiunge la sua massima velocità ed è caratterizzata da elevate pendenze e dalla quasi totale assenza di vegetazione arborea; la *zona di accumulo* è il luogo dove la massa nevosa rallenta progressivamente fino a fermarsi, come un fondovalle o il versante opposto di una vallata [7].

Obiettivo della ricerca

Attraverso l'analisi statistica di dati di precipitazione nevosa pluriennale, l'elaborato ha come obiettivo la determinazione delle *altezze di distacco* nell'innescò di valanghe nella regione Abruzzo, utile a comprendere l'intensità di un fenomeno in base alla massa di neve distaccata. Grazie a questo processo, si tende a favorire la procedura di mappatura del pericolo da valanga nelle aree più soggette al rischio.

L'analisi statistica è affiancata dallo studio climatologico nella regione al fine di determinare la forzante fisica e l'influenza orografica sulle precipitazioni, oltre che comprendere l'evoluzione in diverse zone degli effetti del cambiamento climatico [14].

A tal proposito, viene legato il parametro di altezza di distacco al *tempo di ritorno* T_r , cioè il tempo che intercorre tra due eventi con magnitudine m superiore ad un valore prefissato m_0 , ovvero l'inverso della probabilità di accadimento $Pr: T_r(m_0) = \frac{1}{Pr(m > m_0)}$;

quindi maggiore è la probabilità di accadimento di un evento, minore è il suo tempo di ritorno.

Sommario

La sperimentazione del metodo statistico viene favorita dall'utilizzo di un ricco database con circa 35 anni di registrazione di precipitazioni su tutto il territorio regionale. Seguendo le direttive utilizzate per le regioni alpine, si applica la procedura di indagine statistica tramite la dispersione per ogni stazione con la relazione delle variabili di quantità di neve con la quota di misurazione. Si ipotizza una regionalizzazione del territorio dapprima secondo una divisione puramente statistica, successivamente tramite la caratterizzazione del territorio, quindi l'influenza del sistema orografico.

Grazie all'analisi statistica del tipo GEV a tre parametri, si è in grado di legare la quantità di neve al suolo con il tempo di ritorno, dando una dimensione di *pericolosità* ai fenomeni atmosferici. Questo procedimento viene effettuato con quattro metodi differenti e confrontati tra loro con test di affidabilità.

Si effettua una ricerca sul campo climatico sia a scala regionale, che a scala sinottica. Con la caratterizzazione delle direzioni delle perturbazioni atmosferiche, si è in grado di comprendere l'origine della forzante fisica delle nevicate sulle varie stazioni. Quindi viene studiato anche un trend climatico, trovando notevoli differenze tra le diverse aree di regionalizzazione, oltre che tra le quote.

Data l'eterogeneità del territorio, è interessante comprendere il legame che c'è tra un determinato evento atmosferico di precipitazione nevosa e l'esposizione orografica delle stazioni. Viene ripetuta la statistica GEV specificando i dati per due classi di direzione della perturbazione: occidentale ed orientale, in modo da trovare una corrispondenza con l'effetto di esposizione e riparo relativo ad ogni sito.

Infine, viene proposta un'applicazione dei valori trovati con la mappatura del pericolo della zona di Villa Santa Lucia degli Abruzzi, grazie all'uso di software di simulazione e l'ipotesi dell'area di distacco.

*Non si può risolvere un problema
con la stessa mentalità che lo ha generato.*
A. Einstein

Indice

Elenco delle figure	7
Elenco delle tabelle	10
1 Inquadramento territoriale	13
1.1 Il clima in Abruzzo	14
1.2 Le valanghe in Abruzzo	17
1.2.1 Documentazione della normativa vigente	19
2 Analisi statistica	23
2.1 Descrizione dei metodi di stima dei parametri	25
3 Applicazione dell'analisi statistica	31
3.1 Raccolta dei dati disponibili	31
3.1.1 Insieme delle stazioni	33
3.1.2 Omogeneizzazione dei dati	34
3.1.3 Divisione delle stazioni in tre fasce di quota	38
3.2 Regionalizzazione	39
3.3 Divisione in aree omogenee	42
3.4 Analisi statistica GEV	44
3.4.1 Test di validità di Pearson	45
3.5 Curve di possibilità 'nivometrica'	47
4 Analisi climatologica	51
4.1 Classificazione a scala sinottica: i tipi di tempo	52
4.2 Risultati dell'indagine	54
4.2.1 Risultati statistici delle configurazioni meteorologiche	54
4.3 Analisi delle serie storiche	56
5 Analisi statistica con i tipi di tempo	65
5.1 Analisi del database	65
5.2 Statistica 'raggruppata' per tipo di tempo	66

5.2.1	Risultati della statistica per tipi di tempo	68
5.2.2	Confronto dei risultati	71
6	Mappatura del pericolo per la zona di Villa Santa Lucia	79
6.0.1	Normativa vigente	79
6.0.2	Cenni del software utilizzato	82
6.1	Simulazione della valanga di Villa Santa Lucia degli Abruzzi	83
6.1.1	Breve inquadramento territoriale	84
6.1.2	Definizione del distacco	85
6.1.3	Informazioni del Modello Digitale del Terreno	87
6.1.4	Risultati della simulazione	87
7	Osservazioni finali e conclusioni	91
A	Raccolta dei dati disponibili	93
A.1	Variabile H_G	94
A.2	Variabile ΔH_{3gg}	103
B	Modelli statistici	113
B.1	Divisione in aree omogenee	114
B.2	Risultati dell'analisi statistica	119
C	Risultati dell'analisi climatologica	129
C.1	Frequenze dei tipi di tempo	130
D	Classificazione della precipitazione per tipo di tempo	137
D.1	Somma di neve per tipi di tempo	138
D.2	Risultati dell'analisi statistica per tipi di tempo	141

Elenco delle figure

1.1	La regione Abruzzo nel centro Italia e alcuni siti di riferimento.	13
1.2	Esempi di precipitazione e temperatura media annuale, dal sito <i>climate-data.org</i>	16
1.3	Le valanghe sul versante di Rigopiano dal 1957 al 2013 [2] di Matteo Marini.	17
1.4	Mappatura dei fenomeni valanghivi dal 1957 al 2016 in diverse aree abruzzesi: in alto il Gran Sasso, in basso a sinistra la Majella, al centro l'Altopiano dell'Aremogna e a destra il Monte Velino.	18
1.5	Raccolta degli incidenti causati da valanghe dal 2013 al 2020 [20].	19
3.1	Distribuzione delle stazioni dal database del CETEMPS.	32
3.2	Le 73 stazioni considerate, divise per le quattro province.	33
3.3	Dispersione dei massimi stagionali medi per stazione.	40
3.4	Divisione delle stazioni tra zona A (blu) e B (giallo), per le variabili H_S (sopra) e ΔH_{3gg} (sotto).	41
3.5	Divisione del territorio in tre aree omogenee.	43
3.6	Esempio di fitting dei modelli rispetto alla frequenza cumulata.	44
3.7	Fasce di curve di possibilità nivometrica per la variabile H_S per le tre aree omogenee.	48
3.8	Fasce di curve di possibilità nivometrica per la variabile ΔH_{3gg} per le tre aree omogenee.	49
4.1	Le 8 direzioni codificate dai tipi di tempo.	53
4.2	Le 8 configurazioni dei tipi di tempo, Ing. Marco Falocchi.	53
4.3	Frequenza dei tipi di tempo nei mesi da ottobre ad aprile dal primo gennaio 1979 al 31 dicembre 2012.	55
4.4	Valori mediati globalmente.	56
4.5	Trend di H_S per fasce di quota.	57
4.6	Confronto dei trend storici tra le tre aree omogenee.	58
4.7	Trend storico per la divisione in aree e fasce di quota con la media mobile di 5 anni.	59
4.8	Confronto dei mesi per la stazione di Lanciano.	61

4.9	Confronto dei mesi per la stazione di Isola del Gran Sasso.	62
4.10	Confronto dei mesi per la stazione di Pietracamela.	63
5.1	Confronto dei giorni di manto nevoso $\Delta H3gg > 100\text{ cm}$ per ogni tipo di tempo.	66
5.2	Esempio di istogramma della raccolta dati $\Delta H3gg$ giornalieri in un mese.	67
5.3	Fasci di curve di possibilità nivometrica con tipi di tempo occidentale.	69
5.4	Fasci di curve di possibilità nivometrica con tipi di tempo orientale.	70
5.5	Le stazioni divise in aree con forte influenza del tipo di tempo.	72
5.6	Massimi stagionali $\Delta H3gg$ raggruppati e curve di possibilità nivometrica relative alla stazione di Penne.	73
5.7	Massimi stagionali $\Delta H3gg$ raggruppati e curve di possibilità nivometrica relative alla stazione di Pietracamela.	74
5.8	Massimi stagionali $\Delta H3gg$ raggruppati e curve di possibilità nivometrica relative alla stazione di Sant'Eufemia a Maiella.	75
5.9	Massimi stagionali $\Delta H3gg$ raggruppati e curve di possibilità nivometrica relative alla stazione di Montereale.	76
6.1	Classificazione della pericolosità (<i>hazard</i>) e matrice di Buwal.	80
6.2	Visione satellitare della zona di Villa Santa Lucia degli Abruzzi.	84
6.3	Confronto delle tre curve di possibilità, del sito di Villa Santa Lucia.	85
6.4	Confronto tra le tre curve di possibilità nivometrica, riferite all'area di distacco a quota 1600 m slm	86
6.5	La Carta di <i>OpenStreetMap</i> con i file input per il calcolo.	87
6.6	Mappatura del pericolo da valanga nella zona di Villa Santa Lucia degli Abruzzi.	89
B.1	Rette di regressione per la divisione statistica in zone A e B con le variabili H_S e $\Delta H3gg$	114
B.2	Andamento del <i>CV</i> rispetto alla quota, con i dati H_S (sinistra) e $\Delta H3gg$ (destra).	115
B.3	Altezza di neve rispetto alla quota per ogni stazione, nell'area Est per H_S e $\Delta H3gg$ con rette di regressione.	116
B.4	Altezza di neve rispetto alla quota per ogni stazione, nell'area Monti per H_S e $\Delta H3gg$ con rette di regressione.	117
B.5	Altezza di neve rispetto alla quota per ogni stazione, nell'area Ovest per H_S e $\Delta H3gg$ con rette di regressione.	118
B.6	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Est e Monti con i dati di H_S	119
B.7	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Ovest con i dati di H_S ed Est con $\Delta H3gg$	120
B.8	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Monti e Ovest con i dati di $\Delta H3gg$	121

B.9	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Est e Monti, con la variabile H_S	126
B.10	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Ovest ed Est, con la variabile H_S e $\Delta H3gg$ rispettivamente.	127
B.11	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Monti e Ovest, con la variabile $\Delta H3gg$	128
C.1	Frequenza dei tipi di tempo per ottobre e novembre.	130
C.2	Frequenza dei tipi di tempo per dicembre e gennaio.	131
C.3	Frequenza dei tipi di tempo per febbraio e marzo.	132
C.4	Frequenza dei tipi di tempo per aprile; neve pesata per tipo di tempo per ottobre.	133
C.5	Neve pesata per tipo di tempo per novembre e dicembre.	134
C.6	Neve pesata per tipo di tempo per gennaio e febbraio.	135
C.7	Neve pesata per tipo di tempo per marzo e aprile.	136
D.1	Somma del manto nevoso nelle stazioni dell'area Est in relazione alle perturbazioni giornaliere.	138
D.2	Somma del manto nevoso nelle stazioni dell'area Monti in relazione alle perturbazioni giornaliere.	139
D.3	Somma del manto nevoso nelle stazioni dell'area Ovest in relazione alle perturbazioni giornaliere.	140
D.4	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Est e Monti per le perturbazioni occidentali.	141
D.5	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Ovest per le perturbazioni occidentali ed Est con quelle orientali.	142
D.6	Distribuzioni delle cumulate di probabilità rispettivamente per le aree Monti e Ovest per le perturbazioni orientali.	143
D.7	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Est e Monti, con la variabile $\Delta H3gg$, filtrando la perturbazione occidentale.	148
D.8	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Ovest ed Est, con la variabile $\Delta H3gg$, filtrando la perturbazione occidentale ed orientale rispettivamente.	149
D.9	Curve di altezza neve in funzione del tempo di ritorno per Monti e Ovest, con la variabile $\Delta H3gg$, filtrando la perturbazione orientale.	150

Elenco delle tabelle

3.1	Stazioni utilizzate nell'analisi statistica, con le rispettive quote ed i parametri di neve registrati.	36
3.2	Valori di altezza massima stagionale di neve normalizzata per la stazione di Pietracamela.	37
3.3	Suddivisione delle stazioni in tre fasce altimetriche.	38
3.4	Altezza massima stagionale media, incremento massimo stagionale medio in tre giorni e relativi coefficienti di variazione per le tre aree omogenee.	42
3.5	Valore limite di χ^2 per i gradi di libertà, al variare dei livelli di probabilità α scelti.	46
4.1	H_S mediato per tutte le stazioni nelle tre decadi.	56
4.2	Parametri della divisione in quote.	57
4.3	Codici descrittivi della suddivisione in aree e quote.	58
5.1	Numero di stazioni per area influenzate dalle due direzioni.	71
6.1	Definizione delle tre zone di pericolosità secondo le linee guida di AINEVA [9].	81
6.2	Valori delle medie (q_2) e pendenze delle rette (m_2) per la stazione di Villa Santa Lucia.	86
6.3	Altezze ΔH_{3gg} relative a tre tempi di ritorno secondo le procedure AINEVA.	88
A.1	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di altezza di manto nevoso H_S dal 1979 al 1986.	95
A.2	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di altezza di manto nevoso H_S dal 1987 al 1994.	97
A.3	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di altezza di manto nevoso H_S dal 1995 al 2002.	99
A.4	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di altezza di manto nevoso H_S dal 2003 al 2010.	101
A.5	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di altezza di manto nevoso H_S nel 2011 e 2012.	102

A.6	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di accumulo di neve $\Delta H3gg$ dal 1979 al 1986.	104
A.7	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di accumulo di neve $\Delta H3gg$ dal 1987 al 1994.	106
A.8	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di accumulo di neve $\Delta H3gg$ dal 1995 al 2002.	108
A.9	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di accumulo di neve $\Delta H3gg$ dal 2003 al 2010.	110
A.10	Raccolta dei dati per tutte le stazioni con i massimi stagionali di accumulo di neve $\Delta H3gg$ nel 2011 e 2012.	111
B.1	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Est, con la variabile H_S	122
B.2	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Monti, con la variabile H_S	122
B.3	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Ovest, con la variabile H_S	123
B.4	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Est, con la variabile $\Delta H3gg$	123
B.5	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Monti, con la variabile $\Delta H3gg$	124
B.6	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Ovest, con la variabile $\Delta H3gg$	124
B.7	Presentazione dei tre parametri ottenuti con la statistica GEV.	125
D.1	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Est, per la perturbazione occidentale.	144
D.2	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Monti, per la perturbazione occidentale.	144
D.3	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Ovest, per la perturbazione occidentale.	145
D.4	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Est, per la perturbazione orientale.	145
D.5	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Monti, per la perturbazione orientale.	146
D.6	Risultati del test di Pearson per i quattro metodi, nell'area Ovest, per la perturbazione orientale.	146
D.7	Presentazione dei parametri ottenuti con la statistica GEV, con direzione della perturbazione occidentale (TTW) ed orientale (TTE).	147

*Quand la muntagn mett lu cappelle,
vinn li capr e accatt lu mantelle.*

Capitolo 1

Inquadramento territoriale

La regione Abruzzo è situata nella parte orientale del Centro Italia, confina con Marche, Lazio e Molise, ha un'area di $10\,831.84\text{ m}^2$ [26] ed è divisa nelle quattro Province di Pescara, Chieti, Teramo e L'Aquila (il capoluogo). Gli ultimi dati ISTAT riportano una popolazione di 1 306 000 abitanti, distribuiti in maniera omogenea in tutta la regione [27].



Figura 1.1. La regione Abruzzo nel centro Italia e alcuni siti di riferimento.

L'orografia del territorio è composta dalla costa adriatica a carattere sabbioso e dalle alte montagne appenniniche, tra cui i massicci del Gran Sasso (2914 m s.l.m.) e della Majella (2793 m s.l.m.). La vicinanza dei due sistemi risulta fondamentale per una completa descrizione dei fenomeni meteo-climatici ed ecologici, oltre che di grande attrazione turistica. Grazie al ricco ecosistema, in tutta la regione sono presenti ben tre parchi nazionali, un parco regionale e 38 aree protette, tra oasi, riserve regionali e riserve statali. Nel complesso il 36.3% del territorio è sottoposto a tutela ambientale. Nella regione dimora il 75% delle specie animali presenti in Europa ed è patria di alcune specie rare come l'aquila reale, il lupo abruzzese, il camoscio d'Abruzzo e l'orso marsicano. Si può parlare di un

vero e proprio sistema protezionistico di interesse europeo, dato che il complesso sistema di aree protette abruzzese prosegue a nord con il parco nazionale dei monti Sibillini nell'appennino umbro-marchigiano [26].

Per la sua posizione strategica, è un nodo importante di comunicazione, sia per via mare con i porti di Pescara, Giulianova e Ortona, sia per via aerea con l'Aeroporto d'Abruzzo di Pescara. Di maggior rilievo sono le autostrade statali e le ferrovie che attraversano la regione collegando tutti i centri abitati nelle varie province.

1.1 Il clima in Abruzzo

Il clima in Abruzzo è fortemente condizionato dalla vicinanza dei rilievi appenninici con la fascia costiera adriatica. Questa presenta un classico clima mediterraneo con estati calde e secche ed inverni miti e piovosi. Le temperature decrescono progressivamente con l'altitudine, mentre le precipitazioni aumentano con la quota. In inverno, nonostante la presenza mitigatrice del mare, possono verificarsi ondate di freddo provenienti dai Balcani, con nevicate anche lungo le coste.

Verso l'interno ovviamente il clima si fa via via più continentale fino a diventare quello tipico di montagna, specialmente nella provincia dell'Aquila. Qui le gelate sono frequenti, diffuse e intense, con il termometro che, in determinate conche di origine glaciale o carsico-alluvionale, come Campo Imperatore, Campo Felice e l'altopiano delle Cinque Miglia, può scendere facilmente al di sotto dei -25°C ; stessa cosa può accadere nella piana del Fucino, in presenza di neve ed ondate di freddo.

Come spesso accade, le precipitazioni risentono fortemente della presenza delle dorsali montuose, aumentando con la quota e risultando più abbondanti sui versanti esposti ad occidente, decrescendo invece verso est e sui versanti esposti ad oriente. Spesso infatti le coste adriatiche rimangono in ombra pluviometrica da ovest per l'effetto di sbarramento dell'Appennino. I minimi pluviometrici annui si riscontrano però in alcune vallate interne, notevolmente riparate dalle perturbazioni per l'azione di blocco proprio delle dorsali montuose. In inverno le precipitazioni sono spesso nevose dalle quote medio-basse in su e talvolta fin sulle coste in occasione dei venti gelidi orientali [12].

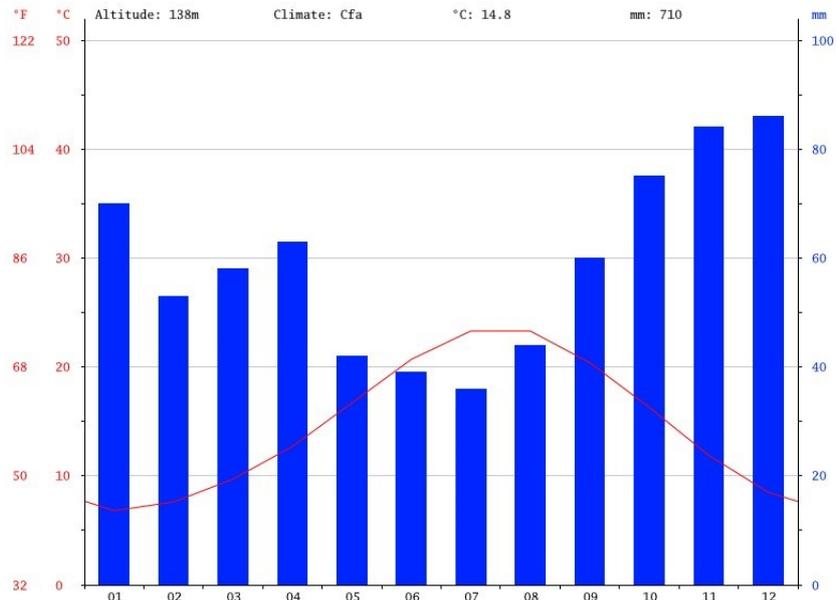
Per un completo inquadramento climatologico della regione, si propone un documento redatto dalla Regione Abruzzo utile alla legislazione e alla progettazione dei numerosi parchi eolici del territorio. Ai sensi dell'articolo 12 comma 10 del D.Lgs 387/03 che fornisce le direttive per la Valutazione di Impatto Ambientale dei parchi eolici, nel primo capitolo è descritto l'insieme dei fenomeni atmosferici a scala regionale, ovvero *La carta del vento della Regione Abruzzo* [6].

Lo studio viene introdotto con la presentazione del software utilizzato e la sensibilità della scala spaziale, per cogliere il dettaglio orografico; i modelli confrontati sono MWA (Mesoscale Wind Analysis), MM5 alla mesoscala e Phoneix, con la tecnica di *nesting*, scegliendo cinque domini con risoluzione via via più elevata.

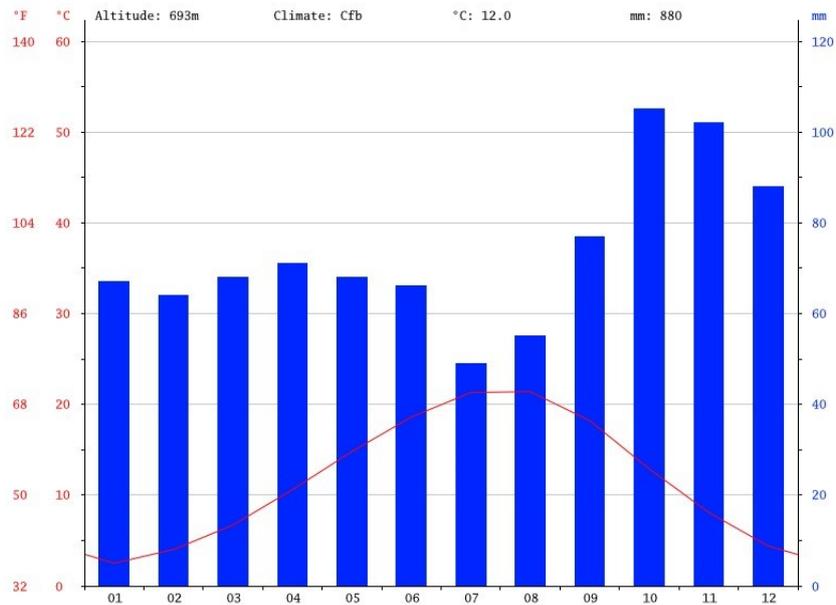
I risultati riguardano l'intensità del vento a diverse quote dal suolo, evidenziando l'effetto orografico dato dalla scabrezza del terreno. Chiaramente, i venti di maggiore intensità sono in mare aperto, e si incanalano nelle numerose valli trasversali la costa. Al contrario, i venti risultano meno intensi nelle valli interne riparate dalle montagne appenniniche.

Per meglio identificare l'effetto orografico sul clima dei singoli siti, si propone il confronto di due città molto diverse dal punto di vista ambientale, quindi climatico. Grazie alla rappresentazione dei parametri climatologici di precipitazione e temperatura medie annue, è possibile caratterizzare il clima tipico di Vasto (*Figura 1.2 (a)*) e L'Aquila (*Figura 1.2 (b)*).

Entrambe conservano la ciclicità stagionale, ma gli effetti ambientali giocano un ruolo fondamentale nell'influenza dei valori massimi e minimi stagionali. Infatti, Vasto è posta in zona costiera, soggetta ai forti venti orientali e con temperature elevate in estate, quindi con un clima mediterraneo; L'Aquila è situata nella valle del fiume Aterno, fortemente condizionata dalla vicinanza dei grandi rilievi appenninici, con temperature molto basse in inverno ed un clima tipicamente continentale.



(a) Vasto



(b) L'Aquila

Figura 1.2. Esempi di precipitazione e temperatura media annuale, dal sito *climate-data.org*.

1.2 Le valanghe in Abruzzo

Con la *Figura 1.3* si mostra il sito di Rigopiano lontano rispetto ai canali con eventi valanghivi mappati. Ma è comunque più evidente il canale di sviluppo della valanga formata il 18 gennaio 2017, partita dal Monte Sella ed arrestata nel cambio pendenza di valle.

Se ne deduce che la *storia* delle valanghe passate non dice tutto rispetto alla pericolosità di un sito. Infatti, è noto che difficilmente un evento così violento si ripropone in uno stesso canale in poco tempo. Tuttavia, l'analisi dei dati passati aiuta a caratterizzare le aree più soggette a fenomeni valanghivi, date le condizioni orografiche ed ambientali.

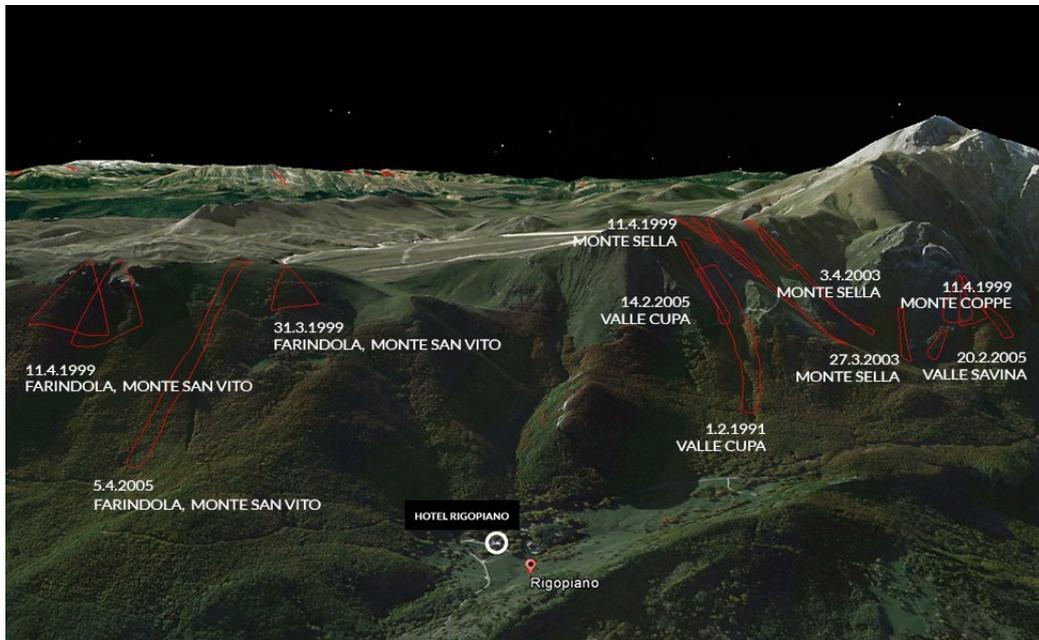


Figura 1.3. Le valanghe sul versante di Rigopiano dal 1957 al 2013 [2] di Matteo Marini.

Viene qui mostrata una mappa delle valanghe avvenute negli anni più recenti (dal 1957 al 2016), creata in GIS grazie alle informazioni fornite direttamente dalla regione Abruzzo [11] ed elaborate dalla Struttura di Missione per il Superamento delle Emergenze di Protezione Civile.

Nei riquadri della *Figura 1.4* sono riportati gli eventi dal 1957 nel territorio regionale, nelle quattro aree dei massicci maggiori, con diverse tonalità di azzurro per distinguere i decenni di accadimento.

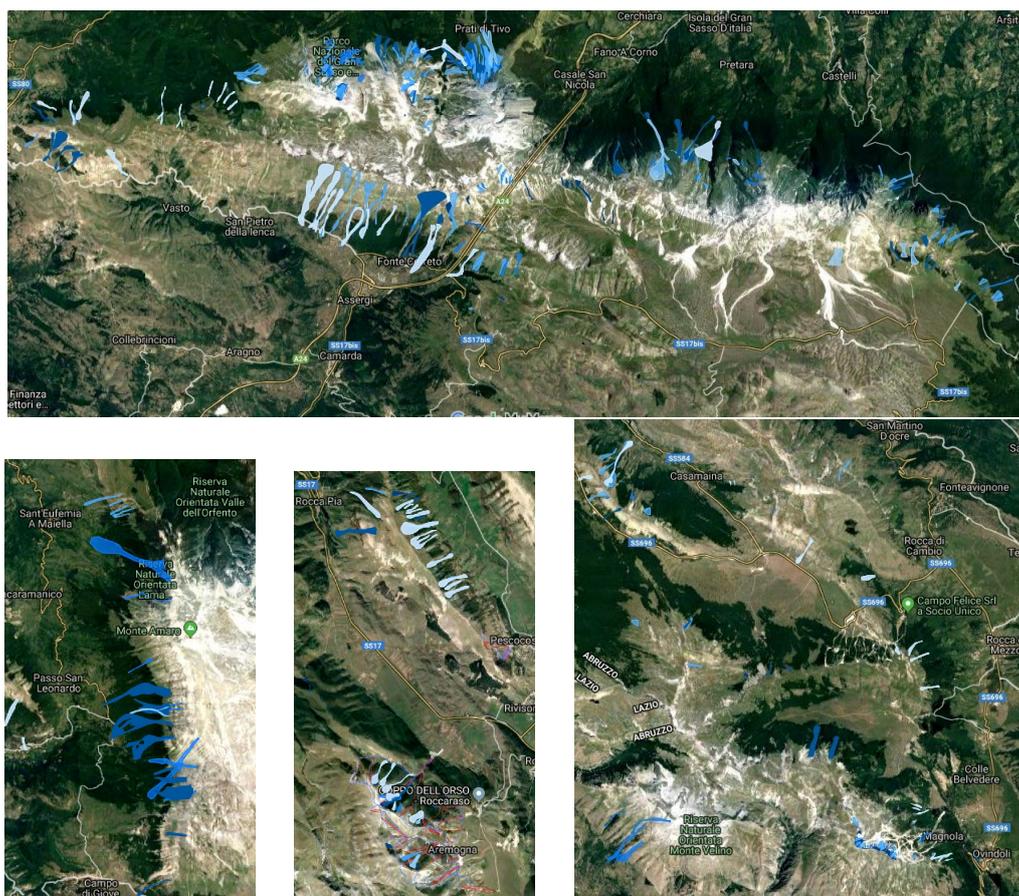


Figura 1.4. Mappatura dei fenomeni valanghivi dal 1957 al 2016 in diverse aree abruzzesi: in alto il Gran Sasso, in basso a sinistra la Majella, al centro l'Altopiano dell'Aremogna e a destra il Monte Velino.

Il Servizio Nazionale di Previsione Neve e Valanghe *Meteomont* raccoglie un database di incidenti causati da valanghe in tutta Italia, con particolare attività nelle regioni alpine. Negli ultimi anni, è aumentato l'interesse nella protezione di aree a rischio anche nell'Appennino, a seguito dell'incremento della frequenza dei fenomeni.

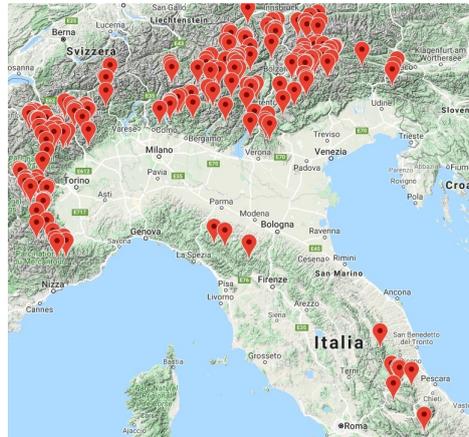


Figura 1.5. Raccolta degli incidenti causati da valanghe dal 2013 al 2020 [20].

Nella *Figura 1.5* si evidenzia la mappa in cui vengono registrati gli incidenti di maggior rilievo causati da valanghe, in cui si notano i numerosi casi sull'arco alpino, ma anche i più recenti eventi concentrati nell'Appennino Centrale.

1.2.1 Documentazione della normativa vigente

Dopo aver identificato l'insieme degli eventi maggiori sul territorio regionale, è utile riportare quelli che sono i più recenti documenti normativi vigenti. In particolare, si sottolinea che il documento ISPRA relativo ai dissesti idrogeologici non tratta dei fenomeni valanghivi, lasciando il compito all'associazione alpina AINEVA, ben più specifica in materia. Attualmente, la regione Abruzzo ha stipulato una *Convenzione tra Regione Abruzzo e Guide Alpine* tramite la Legge Regionale n.47/92 attiva dal 16 dicembre 2019, in cui si avvia una ricerca con l'indagine dei possibili siti di formazione e sviluppo di valanga.

Il 24 gennaio 2017, il Commissario dell'Autorità di Bacino della regione, Luciano Di Biase, dichiara che non c'è alcuna relazione tra il Piano Frane (PAI) e le valanghe. In particolare, si riportano le testuali parole:

Il PAI è uno strumento di pianificazione a vasta scala e sovraordinato, in continuo aggiornamento per il naturale evolversi dei fenomeni di dissesto idrogeomorfologici. È stato adottato nel 2005 ed approvato nel 2008; interessa un territorio di circa 8 500 km² e comprende 272 Comuni tra Abruzzo e Molise. Individua sul territorio di competenza una serie di processi geomorfologici riconducibili a fenomeni gravitativi di versante che interessano terreni e rocce cui è associato un determinato livello di pericolosità da frana. Il PAI non contempla, quindi, livelli di pericolosità correlati a processi valanghivi, fenomeni significativamente diversi dalle frane: pertanto non è lo strumento utile per le valutazioni

del rischio da valanga.

Per l'occasione, venne riportata la situazione idrogeologica del sito di Rigopiano:

La carta geomorfologica del PAI, in località Rigopiano, non riconosce alcun corpo di frana, ma unicamente una 'conoide alluvionale attiva'; una conoide alluvionale è un corpo sedimentario deposto da un corso d'acqua in corrispondenza dello sbocco di una valle. Tale elemento geomorfologico, pertanto, non è correlato a processi gravitativi e, per tale ragione, al simbolo di 'conoide alluvionale attiva' non è associato alcun livello di pericolosità. Resta fermo che la carta geomorfologica è una delle cartografie maggiormente significative ai fini della pianificazione territoriale.

Il 28 febbraio 2017 la Giunta regionale approva la *Carta di Localizzazione dei Pericoli di Valanghe* [16] specifica per la zona occidentale del massiccio del Gran Sasso. In particolare, vengono descritte le condizioni geologiche ed orografiche per un inquadramento territoriale, dato che lo studio viene effettuato in maniera diretta sul campo tramite pareri di esperti riguardo l'acclività dei pendii in quota. Sono presentate le carte degli storici e dei percorsi probabili in base alla pendenza ed alla scabrezza dei suoli:

- la Carta Storica delle Valanghe (CSV)
- la Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe (CLPV)
- i Piani delle Zone Esposte alle Valanghe (PZEV)
- la Carta del Pericolo di Valanghe (CPV)

Anche la zona di arresto è definita secondo la presa visione di esperti e delineata in funzione del cambio pendenza. Il documento si conclude con una relazione fotografica, in cui sono riconoscibili le aree di probabile distacco, i canali di sviluppo della valanga e le probabili aree di arresto.

*Quand lu maltemp ve da la marin,
pij lu sacc e va a lu mulin.
Quand ve da la muntagn
pij la zapp e va a guadagn.*

Capitolo 2

Analisi statistica

L'elaborazione dei dati avviene tramite la metodologia utilizzata nelle regioni alpine. Seguendo l'*Analisi statistica di variabili nivometriche sul territorio della Provincia Autonoma di Trento* [9], si ripetono le procedure di Barbolini et al. (2007) con due grandezze fisiche:

- H_S = altezza del manto nevoso al suolo giornaliero;
- ΔH_{3gg} = incremento di H_S su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa;

mentre le variabili casuali di cui si sono analizzati i campioni sono:

- massimo stagionale di H_S ;
- massimo stagionale di ΔH_{3gg} .

Con la procedura usuale si analizza la serie dei massimi stagionali relativa ad una singola stazione per ottenere una stima **puntuale** della funzione di probabilità, con i seguenti problemi:

- la numerosità N del campione deve essere adatta ai tempi di ritorno bassi;
- la posizione delle stazioni non coincide con le aree di distacco.

Per ovviare a queste problematiche, la procedura adottata è di accorpare la serie dei massimi stagionali di tutte le stazioni disponibili per ottenere una stima **regionale** della funzione di probabilità, con il campione ottenuto dall'accorpamento del tipo *bernoulliano*, ovvero interpretabile da funzioni di probabilità simili. Si dimostra che le analisi regionali forniscono stime più accurate di quelle ottenute da analisi puntuali e adeguate alla maggior parte delle applicazioni pratiche.

Per siti omogenei dal punto di vista nivometeorologico le leggi di distribuzione di probabilità di H_S e ΔH_{3gg} , adimensionalizzati con un opportuno valore indice, sono le stesse,

cioè il regime statistico delle precipitazioni è lo stesso a meno di un fattore scala. Per ogni j -esima stazione, vengono calcolati i coefficienti di variazione, Cv_j , come il rapporto tra valori medi e relativa deviazione standard; per poi trovare il coefficiente relativo alle zone $Cv(Cv_j)$, che per essere valido deve avere un valore inferiore a 0.4.

La funzione di probabilità cumulata parametrica utilizzata è la cosiddetta *Generalized Extreme Value*:

$$F(y) = e^{-\left(1+k\frac{y-u}{\alpha}\right)^{-1/k}} \quad (2.1)$$

di cui vengono stimati i tre coefficienti α , u e k , rispettivamente la scala, la posizione e la forma della funzione, con le metodologie statistiche più diffuse, illustrate nel *paragrafo 2.1*:

- il metodo dei momenti
- il metodo dei minimi quadrati
- il metodo della massima verosimiglianza

A queste si aggiunge la metodologia di stima definita *L-Moments*, derivante dal metodo dei momenti.

La stima dei valori di progetto di H_S e $\Delta H3gg$ per un dato tempo di ritorno T_r in un qualsiasi punto del territorio regionale è data dalle seguenti relazioni:

$$H_S(T_r, z) = y(T_r) \cdot \overline{H_S}(z) \quad \Delta H3gg(T_r, z) = y(T_r) \cdot \overline{\Delta H3gg}(z) \quad (2.2)$$

Infine, si determina una regressione lineare con la quota che diventa così la legge definitiva per il calcolo di H_S e $\Delta H3gg$ del tipo:

$$\overline{H_S}(z) = m_1 \cdot z + q_1 \quad \overline{\Delta H3gg}(z) = m_2 \cdot z + q_2 \quad (2.3)$$

Dopo un processo di omogeneizzazione, implementato seguendo le tecniche illustrate nel *paragrafo 3.1.2*, per ogni stazione si calcolano i valori medi della serie dei massimi stagionali di H_S e $\Delta H3gg$, scegliendo le stazioni con numerosità dei campioni pari ad almeno 10 stagioni. A seguito della dispersione che relaziona le grandezze con le quote sul livello del mare, la regressione lineare suggerisce di dividere il territorio regionale in zona A e zona B, rispettivamente le stazioni con scarti positivi e negativi rispetto la retta di regressione. Nel *paragrafo 3.2* vengono presentati i risultati analitici dello studio applicato al territorio. In genere, la variabilità verticale dei valori attesi mostra un andamento approssimativamente lineare con la quota, mentre quella orizzontale si concretizza con la variazione per zone dei coefficienti della legge lineare.

Come si vedrà in seguito, un sito con una quota differente dalla stazione di riferimento, segue la stessa legge matematica dell'eq. 2.2 in cui si inserisce il valor medio calcolato dalla retta di regressione dell'eq. 2.3 inerente all'area omogenea. I termini m_1 ed m_2 sono

i coefficienti angolari delle rette di regressione, mentre i termini q_1 e q_2 sono i valori medi delle due variabili della stazione di riferimento; la quota è considerata con z dove viene inserita la differenza tra il sito in esame e la stazione di riferimento.

Recentemente l'ingegner Federzoni propone un confronto delle tre metodologie con quella di regionalizzazione di M. Barbolini [17], con l'applicazione per le stazioni della Provincia Autonoma di Trento.

Ne risulta che il metodo di regionalizzazione è il più robusto per questo tipo di analisi, essendo sviluppato in maniera ottimale. In particolare, si ribadisce come un'analisi regionale consenta di estendere il campione dati distribuito sul territorio, a siti non strumentati, quali i luoghi in cui si ha distacco in alta quota della valanga. Infine, grazie all'utilizzo della tecnica della *finestra mobile* nel tempo, si afferma che la progettazione di opere di difesa necessita di continui aggiornamenti relativi al parametro di progetto di altezza neve. Lo stesso approccio è valido nella regione Friuli Venezia Giulia, avendo diviso l'area alpina in tre zone omogenee.

2.1 Descrizione dei metodi di stima dei parametri

Vengono utilizzati i tre metodi più diffusi di analisi statistica per definire la distribuzione di probabilità dei dati neve per le stazioni. La scelta della *Generalized Extreme Value* (eq. 2.1) comporta la ricerca dei tre parametri, attraverso un modello di regressione dei dati. Se il valore di k è nullo si ricade nel caso limite della distribuzione di *Gumbel*. Avendo definito la cumulata della funzione di distribuzione

$$F(y) = Pr[Y \leq y] \quad (2.4)$$

è possibile affermare che $F(y)$ risulta essere una funzione crescente di y compresa nell'intervallo $[0,1]$ per ogni y . Essa è inoltre continua ed è possibile definire la sua inversa $y(F)$, ovvero la funzione quantile di y . Definendo Pr come la probabilità, $y(Pr)$ risulta essere il quantile della *probabilità di non superamento*. Queste nozioni sono di fondamentale importanza poiché il più grande obiettivo dell'analisi di frequenza risiede nella stima accurata del quantile della distribuzione di alcune variabili.

Quindi restano ignoti i valori dei parametri della funzione di distribuzione, che dipendono in numero dal tipo di distribuzione scelto per rappresentare il quantile della funzione. Questi parametri sono solitamente stimati a partire dai dati osservati; vengono descritti dai *momenti* della distribuzione, con la media e i momenti di ordine superiore.

$$\mu = E(Y) \qquad \mu_r = E(Y - \mu)^r \quad (2.5)$$

con $r > 1$, $E(Y)$ si definisce valore atteso, calcolato come:

$$E(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} y dF(y) = \int_{-\infty}^{\infty} y f(y) dy \quad (2.6)$$

Metodo dei momenti [19]

Come anticipato nel paragrafo introduttivo, la forma della distribuzione di probabilità può essere descritta dai *momenti della distribuzione*, ovvero la media e i momenti di ordine superiore $\mu_r = E(Y - \mu)^r$. Mentre la media definisce il baricentro della distribuzione, la dispersione nel suo intorno può essere misurata con la *deviazione standard* $\sigma = \mu_2^{1/2} = [E(Y - \mu)^2]^{1/2}$, da cui il coefficiente di variazione $Cv = \sigma/\mu$, che esprime la dispersione della distribuzione adimensionalizzata con la media. Spesso viene utilizzato anche lo *skewness* γ per indicare l'asimmetria ed il *kurtosis* k , attraverso i momenti di ordine superiore $\mu_r/\mu_2^{r/2}$.

Quantità analoghe a queste possono essere calcolate da un campione di dati y_1, y_2, \dots, y_n . La *media campionaria* serve a stimare μ , così come i momenti di ordine superiore μ_r , ma non sono indistorti:

$$\bar{y} = n^{-1} \sum_{i=0}^n y_i \qquad m_r = n^{-1} \sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^r \qquad (2.7)$$

Al loro posto vengono spesso usati stimatori indistorti come σ^2 , μ_3 e $k_4 = \mu_4 - 3\mu_2^2$, rispettivamente:

$$s^2 = (n - 1)^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \qquad (2.8)$$

$$\hat{m}_3 = \frac{n^2}{(n - 1)(n - 2)} m_3 \qquad (2.9)$$

$$\hat{k}_4 = \frac{n^2}{(n - 2)(n - 3)} \left[\left(\frac{n + 1}{n - 1} \right) m_4 - 3m_2^2 \right] \qquad (2.10)$$

La deviazione standard campionaria $s = \sqrt{s^2}$ è uno stimatore di σ ma non è indistorto. Gli stimatori campionari del Cv , dello skewness e del kurtosis sono rispettivamente:

$$\hat{Cv} = s/\bar{y} \qquad g = \hat{m}_3/s^3 \qquad k = \hat{k}_4/s^4 + 3 \qquad (2.11)$$

Gli stimatori g e k possono essere molto distorti in quanto sono caratterizzati da limiti algebrici che dipendono dalla lunghezza del campione; da ciò consegue che, se la distribuzione è particolarmente asimmetrica, potrebbe essere impossibile calcolare la skewness da un campione di dimensioni fisse. Quindi l'inferenza di distribuzioni asimmetriche basata sui momenti campionari può essere estremamente poco affidabile.

Metodo dei minimi quadrati [17]

L'approssimazione ai minimi quadrati è una tecnica di ottimizzazione volta a determinare una funzione analitica che approssimi un insieme di dati senza necessariamente passare per i dati stessi. Una distribuzione di probabilità in teoria mira ad approssimare al meglio la distribuzione campionaria. In pratica tra le due curve esistono minime differenze che generano un vettore degli scarti.

L'obiettivo di questo metodo è di minimizzare la somma del quadrato degli scarti tra la probabilità di non superamento $Pr(Y \leq y; p_1, p_2, \dots, p_m)$ e la frequenza di non superamento campionaria $F(y)$.

$$RSS = \frac{1}{N} \sum_j^n (Pr(y_j; p_1, p_2, \dots, p_m) - F_j)^2 \quad (2.12)$$

Nel caso in esame i parametri p_1, p_2, \dots, p_m corrispondono ai tre parametri incogniti nella GEV (u, α e k), quindi viene minimizzata la funzione della somma del quadrato degli scarti:

$$\min[RSS] = \min \left[\sum_j^n (Pr(y_j; u, \alpha, k))^2 - F_j \right] \quad (2.13)$$

Metodo della massima verosimiglianza [17]

Ogni valore dei parametri p della funzione di probabilità definisce una diversa curva per la GEV che si adatta in modo diverso alle variabili investigate. L'obiettivo principale di una stima dei parametri del tipo della massima verosimiglianza è di adottare il modello associato al più alto grado di verosimiglianza.

Considerando una distribuzione del tipo y_1, \dots, y_n con valori indipendenti tra loro e caratterizzati da una funzione di densità di probabilità del tipo $f(y; p_0)$, è possibile definire la funzione della verosimiglianza come:

$$L(p) = \prod_i^n f(y_i; p) = e^{-\left(1 - k \frac{y_i - u}{\alpha}\right)^{1/k}} \quad (2.14)$$

L'estimatore di massima verosimiglianza, non è altro che il valore del parametro p che massimizza l'eq. 2.14 che descrive in modo appropriato l'andamento della variabile investigata.

Il criterio per stimare p è detto *criterio di massima verosimiglianza* e afferma che l'evento che si realizza ($p = p_0$) ha la massima probabilità di accadere e la stima del parametro p si ottiene massimizzando l'eq. 2.14 in funzione di p . Per consuetudine, viene utilizzata la funzione logaritmica

$$\ln[L] = -n \ln(\alpha) - (1 + 1/k) \sum_i^n \ln \left[1 + k \frac{y_i - u}{\alpha} \right] - \sum_i^n \ln \left[1 + k \frac{y_i - u}{\alpha} \right]^{1/k} \quad (2.15)$$

Metodo L-Moments [17]

Come alternativa nella descrizione della forma della distribuzione di probabilità si è scelto di utilizzare i momenti *L-Moments* che nascono come miglioramento dei momenti, introdotto per la prima volta in idrologia nel 1980 circa. La differenza nell'uso dei momenti pesati in probabilità risiede nella loro poca sensibilità a valori molto alti presenti nel campione, rendendone la determinazione molto meno aleatoria rispetto ai momenti ordinari.

I momenti pesati in probabilità per una variabile random Y , sono espressi dalla relazione generica definita da Greenwood et al. (1979).

$$M_{p,r,s} = E[Y^p(F(y))^r(1 - F(Y))^s] \quad (2.16)$$

In cui $F(Y)$ rappresenta la distribuzione cumulata della variabile investigata. I momenti particolari, figli di questa relazione, sono del tipo $\beta_r = M_{1,r,0}$; la relazione generale si scrive:

$$\lambda_{r+1} = (-1)^r \sum_{k=0}^r p^{*r,k} \alpha_k = \sum_{k=0}^r p^{*r,k} \beta_k \quad (2.17)$$

Questi momenti devono essere declinati per la distribuzione che si vuole impiegare e in base alle loro dimensioni è possibile osservare come variano la posizione, la scala e la forma della curva che cerca di rappresentare la frequenza cumulata della distribuzione.

I parametri della GEV in funzione dei momenti pesati sono:

$$\lambda_1 = u + \frac{\alpha(1 - \Gamma(1 + k))}{k} \quad (2.18)$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha((1 - 2^{-k})\Gamma(1 + k))}{k} \quad (2.19)$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_2}{\lambda_3} = \frac{2(1 - 3^{-k})}{(1 - 2^{-k})} - 3 \quad (2.20)$$

In cui la funzione Γ integra in t la variabile y :

$$\Gamma(y) = \int_{-\infty}^{\infty} t^{y-1} e^{-t} dt \quad (2.21)$$

Il parametro k è stimato dal sistema di equazioni con una soluzione implicita. Quindi si ipotizza da letteratura come

$$k = 7.8590 c + 2.9554 c^2 \quad c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3} \quad (2.22)$$

Mentre gli altri due parametri sono derivanti dal sistema con

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k})\Gamma(1 + k)} \quad (2.23)$$

$$u = \lambda_1 - \frac{\alpha(1 - \Gamma(1 + k))}{k} \quad (2.24)$$

Ottenuta la curva di crescita regionale attraverso l'impiego della GEV, è possibile ottenere il valore della variabile investigata riferito alla *j-esima* stazione grazie all'eq. 2.2.

Per i dettagli dell'applicazione del metodo si rimanda alla documentazione fornita da J. R. M. Hosking nelle sue pubblicazioni *Regional frequency analysis: an approach based on L-Moments* [22], in cui presenta l'approccio al problema nello specifico, e *Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments* [23], in cui si esprimono i passaggi analitici per l'indagine dei parametri incogniti.

*Quand sta lu levant
va 'ncul a tutt quant.*