

# **LINEE GUIDA METODOLOGICHE PER LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE ESPOSTE AL PERICOLO DI VALANGHE**

**A cura di:**



**Massimiliano Barbolini e Luigi Natale**

Università degli Studi di Pavia – Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale



**Giorgio Tecilla**

Responsabile Tecnico AINEVA

**Marco Cordola**

ARPA Piemonte – Area Previsione e Monitoraggio Ambientale

**Ringraziamenti.** La realizzazione del presente lavoro è stata possibile grazie al sostegno ed alla collaborazione di tutti gli uffici provinciali e regionali aderenti all'AINEVA. Un ringraziamento particolare va a Francesco Sommovilla del Centro Valanghe di Arabba (ARPA Veneto) e a Paolo Stefanelli e Enrico Filaferro dell'Ufficio Valanghe di Udine (Regione Friuli Venezia Giulia) per il loro apporto costruttivo e per il contributo critico alla strutturazione del documento. Si desidera inoltre ringraziare Matteo Pagliardi del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università degli Studi di Pavia per il prezioso supporto tecnico. Un sentito ringraziamento va anche al Comune di Isola di Fonda (BG) per avere consentito l'utilizzo e la pubblicazione di documentazione di sua proprietà.

## Premessa

*In questo rapporto sono esposti i risultati conclusivi di una convenzione di ricerca stipulata tra il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università degli Studi di Pavia e AINEVA. La collaborazione tra le due istituzioni ha avuto inizio nell'anno 2000, quando in AINEVA era in corso un approfondito confronto sul tema della pianificazione urbanistica del territorio esposto a valanghe sull'arco alpino italiano.*

*I due documenti: "Linee di indirizzo per la gestione del pericolo di valanghe nella pianificazione territoriale" e "Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe", approvati dall'Assemblea AINEVA rispettivamente il 23 febbraio 2001 e il 19 giugno 2002, hanno rappresentato i primi, importanti, risultati di tale confronto. Tali documenti sono presentati nella Parte 1 del presente rapporto.*

*A questi due documenti di indirizzo normativo, che hanno definito le direttrici da seguire nelle diverse fasi ed alle diverse scale della pianificazione urbanistica e territoriale, è seguita la redazione delle "Linee guida metodologiche per la perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanghe" che sviluppano invece gli aspetti di natura tecnico-ingegneristica connessi con la stesura dei "Piani delle Zone Esposte alle Valanghe" (P.Z.E.V.). Con riferimento a tali aspetti, nella Parte 2 del rapporto sono delineate e sinteticamente descritte le differenti attività di studio che concorrono alla redazione dei P.Z.E.V, mentre nella Parte 3 sono fornite in maggior dettaglio indicazioni metodologiche relativamente all'esecuzione di tali attività di studio.*

*I criteri illustrati rappresentano una proposta di metodologia che AINEVA indica come un possibile riferimento per la gestione delle problematiche urbanistiche nelle aree interessate da fenomeni valanghivi. I diversi documenti esposti vanno quindi interpretati come un primo tentativo di elaborazione di un quadro di riferimento metodologico e normativo rivolto agli amministratori ed ai tecnici impegnati nel settore. I contenuti del documento sono pertanto suscettibili di modifiche, integrazioni e sviluppi in funzione di nuovi, auspicabili, contributi scientifici e dei contesti normativi e amministrativi in cui i criteri e le metodologie proposte potranno trovare applicazione.*

# INDICE GENERALE

## PARTE 1

### Valanghe e pianificazione territoriale: documenti di indirizzo normativo

1.1	Linee di indirizzo per la gestione del pericolo di valanghe nella pianificazione territoriale .....	3
1.1.1	Finalità.....	3
1.1.2	Pericolo di valanghe.....	3
1.1.3	Documentazione dei fenomeni valanghivi e livelli di approfondimento.....	3
1.1.4	Piani urbanistici di inquadramento a scala territoriale e utilizzo del dato storico.....	4
1.1.5	Piani urbanistici a scala locale.....	4
1.1.6	Valutazione dei fenomeni valanghivi nella progettazione di manufatti e infrastrutture.....	5
1.1.7	Aggiornamento.....	5
1.1.8	Documenti di indirizzo metodologico.....	6
1.2	Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe .....	6
1.2.1	Finalità.....	6
1.2.2	Definizione dei gradi di esposizione al pericolo di valanghe.....	7
1.2.2.1	<i>Generalità</i> .....	7
1.2.2.2	<i>Zona rossa (zona ad elevata pericolosità)</i> .....	8
1.2.2.3	<i>Zona blu (zona a moderata pericolosità)</i> .....	8
1.2.2.4	<i>Zona gialla (zona a bassa pericolosità)</i> .....	9
1.2.2.5	<i>Disposizione delle zone di pericolo</i> .....	9
1.2.2.6	<i>Aggiornamento delle perimetrazioni: criteri generali</i> .....	9
1.2.3	Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza dei fenomeni valanghivi .....	11
1.2.3.1	<i>Generalità</i> .....	11
1.2.3.2	<i>Zona rossa (zona ad elevata pericolosità)</i> .....	12
1.2.3.3	<i>Zona blu (zona a moderata pericolosità)</i> .....	13
1.2.3.4	<i>Zona gialla (zona a bassa pericolosità)</i> .....	14
1.2.4	Appendice di chiarificazione approvata dal Comitato Tecnico Direttivo di AINEVA il 06/07/2005.....	16

## PARTE 2

### Redazione delle mappe di pericolosità (P.Z.E.V.)

2.1	Introduzione.....	21
2.2	Raccolta degli studi esistenti.....	23
2.3	Analisi preliminare del sito valanghivo.....	23
2.4	Analisi storica degli eventi valanghivi.....	23
2.5	Fotointerpretazione.....	24
2.6	Sopralluoghi sul sito valanghivo.....	24
2.7	Rilievi topografici.....	25
2.8	Delimitazione preliminare del sito valanghivo.....	25
2.9	Analisi nivometeorologiche.....	27
2.10	Modellazione matematica.....	28
2.11	Redazione del P.Z.E.V.....	29

## PARTE 3

### Appendici

<b>Appendice A</b>	<b>Catasto delle opere di difesa.....</b>	<b>35</b>
A.1	Introduzione.....	37
A.2	Modalità di schedatura.....	37
A.3	Analisi dei fenomeni di dissesto.....	41
<b>Appendice B</b>	<b>Modelli per il calcolo delle valanghe.....</b>	<b>43</b>
B.1	Introduzione.....	45
B.2	Modelli empirici.....	46
B.2.1	Modelli regressivi.....	47
B.2.2	Modelli inferenziali: il modello del "rapporto di arresto".....	49
B.2.3	Modelli inferenziali: analisi statistica "sito-specifica" dei dati storici.....	51

B.3	Modelli di dinamica.....	56
B.3.1	Modelli a centro di massa.....	57
B.3.1.1	<i>Il modello PCM.....</i>	<i>58</i>
B.3.1.2	<i>Il modello di Voellmy.....</i>	<i>60</i>
B.3.2	Modelli di tipo continuo.....	63
<b>Appendice C Elaborazioni statistiche dei dati nivometeorologici.....</b>		<b>67</b>
C.1	Introduzione.....	69
C.2	Definizioni.....	70
C.2.1	Momenti.....	70
C.2.2	Frequenza cumulate.....	72
C.2.3	Momenti pesati in probabilità.....	73
C.3	Determinazione della FDP con il metodo AM.....	73
C.3.1	Carte probabilistiche e test di adattamento.....	73
C.3.2	Stima dei parametri.....	75
C.4	Alcune FDP teoriche a due parametri.....	76
C.4.1	FDP Normale.....	77
C.4.2	FDP LogNormale.....	77
C.4.3	FDP Gamma.....	78
C.4.4	FDP di Gumbel.....	79
C.4.5	FDP Esponenziale.....	79
C.5	Determinazione della FDP con il metodo PD.....	80
C.6	Analisi regionale.....	82
C.6.1	Metodo del Valore Indice.....	82
C.6.2	Stima dei parametri della curva di crescita regionale.....	84
C.7	Errori di stima e limiti di confidenza.....	85
<b>Appendice D Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto .....</b>		<b>89</b>
D.1	Calcolo dell'altezza di distacco.....	91
D.2	Stima dei sovraccarichi da vento.....	92
<b>Appendice E Pressioni di impatto e delimitazione delle aree pericolose.....</b>		<b>95</b>
E.1	Pressioni di impatto delle valanghe .....	97
E.2	Criteri pratici di delimitazione delle aree pericolose.....	98

<b>Appendice F</b>	<b>Riperimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga in relazione alla presenza di interventi di messa in sicurezza.....</b>	<b>103</b>
F.1	Introduzione.....	105
F.2	Opere di difesa attiva.....	106
F.2.1	Opere di ritenuta.....	106
F.2.2	Opere frangivento.....	107
F.3	Opere di difesa passiva.....	108
F.3.1	Opere di rallentamento nella zona di scorrimento.....	108
F.3.2	Opere di deviazione nella zona di scorrimento.....	108
F.3.3	Opere di rallentamento e deviazione nella zona di arresto.....	111
F.3.4	Opere di contenimento nella zona di arresto.....	111
F.3.5	Gallerie paravalanghe.....	115
F.3.6	Effetto delle opere passive sul moto della componente polverosa.....	115
F.4	Rimboschimenti.....	115
F.4.1	Zona di distacco.....	116
F.4.2	Zona di scorrimento.....	116
<b>Appendice G</b>	<b>Analisi di rischio.....</b>	<b>119</b>
G.1	Carta del rischio.....	121
G.1.1	Introduzione.....	121
G.1.2	Metodologia di redazione.....	121
G.2	Stima quantitativa dei livelli di rischio.....	125
G.2.1	Metodologia di calcolo.....	125
<b>Appendice H</b>	<b>Esempi applicativi.....</b>	<b>129</b>
H.1	Il caso di studio.....	131
H.2	Descrizione del sito valanghivo.....	133
H.3	Descrizione degli interventi di difesa in opera.....	135
H.3.1	Gli interventi di difesa realizzati negli anni '70 e '80.....	135
H.3.2	Gli interventi di difesa realizzati in tempi recenti (L.102/90) .....	137
H.3.3	Catasto delle opere di difesa in zona di distacco.....	138
H.4	Indagine storico documentale.....	141
H.4.1	Raccolta dei dati storici.....	141
H.4.2	Analisi dei dati storici.....	144
H.5	Analisi nivometeorologiche.....	148
H.5.1	Dati nivometrici (DH3gg) .....	148

H.5.1.1	<i>Introduzione</i> .....	148
H.5.1.2	<i>Dati utilizzati</i> .....	149
H.5.1.3	<i>Analisi regionale</i> .....	151
H.5.2	Dati di ventosità.....	154
H.5.2.1	<i>Introduzione</i> .....	154
H.5.2.2	<i>Grandezze esaminate e dati utilizzati</i> .....	155
H.5.2.3	<i>Elaborazioni e risultati</i> .....	156
H.6	Modellistica matematica.....	158
H.6.1	Introduzione.....	158
H.6.2	Definizione degli scenari di simulazione.....	158
H.6.3	Risultati delle simulazioni.....	162
H.7	Redazione del P.Z.E.V. ....	163
H.7.1	Procedura.....	163
H.7.2	Risultati.....	165
<b>Appendice I</b>	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>169</b>

# **PARTE 1**

## **Valanghe e pianificazione territoriale: documenti di indirizzo normativo**

## 1.1 Linee di indirizzo per la gestione del pericolo di valanghe nella pianificazione territoriale

*(Documento approvato dall'Assemblea AINEVA il 23/02/01)*

### 1.1.1 Finalità

La trattazione dei fenomeni valanghivi negli strumenti urbanistici è attualmente caratterizzata da una generale carenza di riferimenti normativi comuni a livello nazionale. Di conseguenza, a livello regionale il problema viene affrontato in modo disomogeneo pur in presenza di problematiche territoriali simili almeno per quanto concerne l'arco alpino.

Scopo di questo documento è quello di fornire alcune indicazioni di carattere generale atte ad armonizzare ed indirizzare le Regioni e Province Autonome nell'elaborazione degli strumenti tecnici e normativi necessari per garantire in ambito urbanistico una efficace attività di prevenzione del pericolo di valanga su insediamenti ed infrastrutture

### 1.1.2 Pericolo di valanghe

Il pericolo associato alla caduta delle valanghe va considerato alla stregua di tutti gli altri pericoli originati da eventi calamitosi disciplinati dagli strumenti urbanistici.

### 1.1.3 Documentazione dei fenomeni valanghivi. Livelli di approfondimento

In campo urbanistico, la prevenzione del rischio valanghivo, va attuata per progressivi livelli di approfondimento in relazione alla natura del Piano ed alla sua scala territoriale. L'attività di prevenzione sarà pertanto funzionale al grado di conoscenza dei fenomeni e verrà attuata con approcci diversi in relazione alla disponibilità di dati ed informazioni.

#### **1.1.4 Piani urbanistici di inquadramento a scala territoriale ed utilizzo del dato storico**

Il dato relativo agli eventi valanghivi verificatisi nel passato ed opportunamente documentati è da considerarsi la fonte di informazione di riferimento da utilizzarsi nei processi di pianificazione dell'uso del territorio. In linea generale ed in assenza di ulteriori approfondimenti sulla natura degli eventi, nelle zone storicamente interessate da eventi valanghivi documentati è da evitare qualsiasi modificazione all'assetto del territorio che comporti un aumento dell'esposizione di beni e persone al pericolo di valanghe.

Per eventi valanghivi documentati si intendono i fenomeni censiti nel Catasto Valanghe e/o riportati nelle Carte di Localizzazione Probabile delle Valanghe (C.L.P.V.), con riferimento alle aree individuate a seguito di indagine sul terreno. L'utilizzo del dato storico come fonte di segnalazione del pericolo di valanga è da considerarsi il primo livello di un processo di progressivo affinamento degli strumenti di gestione dei fenomeni nel contesto della pianificazione dell'uso del territorio. Per questo motivo l'utilizzo di tale dato è da ritenersi adeguato alla scala dei piani territoriali.

Le attività di aggiornamento e di completamento dei Catasti delle Valanghe e delle Carte di Localizzazione Probabile delle Valanghe, come pure le iniziative finalizzate al trasferimento dei dati cartografici su supporti informatici, sono da considerarsi prioritarie per le Amministrazioni delle Regioni e Province Autonome aderenti ad AINEVA

#### **1.1.5 Piani Urbanistici a scala locale**

L'esigenza di una corretta e dettagliata valutazione dell'interazione fra fenomeni valanghivi e previsioni urbanistiche a scala locale rende opportuna l'elaborazione, nelle fasi preliminari alla stesura degli strumenti urbanistici comunali (Piani Regolatori), di specifici studi finalizzati alla determinazione della natura del fenomeno ed alla eventuale delimitazione delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanghe.

In tali studi, le valutazioni sul diverso grado di esposizione al pericolo di valanghe, dovranno essere effettuate con riferimento alla frequenza ed intensità degli eventi valanghivi attesi. L'effettuazione degli studi di approfondimento è da ritenersi necessaria in tutte le situazioni in cui sia riscontrabile una interferenza diretta o indiretta tra fenomeni valanghivi ed insediamenti esistenti o previsti.

Il grado di esposizione al pericolo di valanghe identificato negli studi di approfondimento dovrà essere opportunamente considerato per la regolamentazione dell'uso del suolo in fase di stesura dei Piani Regolatori Comunali.

#### **1.1.6 Valutazione dei fenomeni valanghivi nella progettazione di manufatti ed infrastrutture**

L'interazione fra fenomeni valanghivi riportati negli strumenti urbanistici a scala territoriale o locale ed interventi di modificazione dell'assetto del territorio rende necessaria l'elaborazione, nelle fasi preliminari della progettazione, di specifici studi nivologici. Tali studi andranno effettuati in particolare, qualora gli interventi in progetto comportino l'esposizione di vite umane al pericolo di valanga.

Gli studi nivologici saranno finalizzati alla caratterizzazione degli eventi valanghivi attesi in relazione al loro potenziale impatto sui manufatti e sulle infrastrutture in progetto.

#### **1.1.7 Aggiornamento**

Le caratteristiche dei fenomeni valanghivi e dell'ambiente in cui si manifestano possono portare alla necessità di provvedere all'aggiornamento degli strumenti conoscitivi di cui ai § 1.1.4, 1.1.5 e 1.1.6 in relazione ad eventuali modificazioni del contesto territoriale ed ambientale.

Nell'ambito degli strumenti urbanistici ed ai fini della valutazione del grado di vincolo a cui assoggettare il territorio relativamente agli insediamenti, l'eventuale presenza di interventi di difesa dalle valanghe di tipo strutturale

(attiva e/o passiva) andrà in linea generale interpretata in termini di “messa in sicurezza dell’esistente”.

### **1.1.8 Documenti tecnici di indirizzo metodologico**

AINEVA, si impegna a promuovere iniziative di coordinamento sulle procedure applicate in campo urbanistico dalle Amministrazioni aderenti e di ricerca scientifica nel settore dello studio e della documentazione dei fenomeni valanghivi. Tali iniziative saranno finalizzate alla elaborazione di “Quaderni di documentazione” concernenti gli indirizzi tecnico-metodologici di riferimento per una corretta ed omogenea attuazione dei principi contenuti nel presente documento.

## **1.2 CRITERI PER LA PERIMETRAZIONE E L'UTILIZZO DELLE AREE SOGGETTE AL PERICOLO DI VALANGHE**

*(Documento approvato dall'Assemblea di AINEVA il 19/06/02, da leggere contestualmente all'appendice di chiarificazione approvata dal Comitato Tecnico Direttivo di AINEVA il 06/07/2005)*

### **1.2.1 Finalità**

Il presente documento, risultato del lavoro congiunto degli uffici valanghe dell'Arco Alpino Italiano aderenti ad AINEVA e redatto in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università degli Studi di Pavia, ha finalità di indirizzo relativamente alle modalità di gestione urbanistica del territorio interessato da fenomeni valanghivi. I criteri di perimetrazione ed i regimi di utilizzo delle aree esposte a valanga proposti nel documento rappresentano l'obiettivo verso il quale indirizzare le normative locali nella prospettiva di una maggiore sicurezza del territorio montano. In considerazione delle specificità delle Regioni e Provincie Autonome dell'Arco Alpino, i criteri qui descritti, nel rispetto degli indirizzi generali forniti, potranno subire parziali modifiche e integrazioni in funzione delle esigenze di armonizzazione ai caratteri geografici, amministrativi e normativi delle diverse realtà territoriali rappresentate in AINEVA, nonché a seguito di ulteriori approfondimenti tecnici in materia.

I criteri contenuti nel presente documento concernono esclusivamente le previsioni urbanistiche legate agli insediamenti. Il documento non tratta pertanto gli aspetti connessi alla realizzazione di interventi di carattere infrastrutturale quali vie di comunicazione, impianti di risalita, linee elettriche, ecc.

## **1.2.2 Definizione dei gradi di esposizione al pericolo di valanghe**

### 1.2.2.1 Generalità

Negli studi tecnici finalizzati alla perimetrazione delle zone soggette a valanga andranno distinti tre differenti gradi di esposizione al pericolo (elevato, moderato, basso), rappresentati con diversi colori: rosso, blu e giallo, in ordine decrescente di pericolo.

Quali grandezze atte a definire il grado di esposizione al pericolo di valanghe di una determinata porzione di territorio andranno utilizzate la frequenza e l'intensità degli eventi valanghivi attesi, espresse attraverso:

- ✓ il tempo di ritorno della valanga, ovvero il numero di anni che intercorre, mediamente, tra due eventi valanghivi in grado di interessare la porzione di territorio in oggetto;
- ✓ la pressione della valanga, ovvero la forza per unità di superficie esercitata dalla valanga su di un ostacolo piatto, di grandi dimensioni disposto perpendicolarmente rispetto alla traiettoria di avanzamento della massa nevosa. La pressione andrà determinata con riferimento alle componenti di sollecitazione sia dinamiche che statiche.

Nel paragrafi che seguono sono descritti i caratteri delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanga (zone rosse, blu e gialle), e indicati i valori critici del tempo di ritorno e della pressione da utilizzare nella delimitazione di tali aree. I valori proposti fanno riferimento ad usi del suolo di tipo insediativo.

### 1.2.2.2 Zona rossa (zona ad elevata pericolosità)

Sono classificate come zone rosse (zone ad elevata pericolosità) le porzioni di territorio che possono essere interessate o con una certa frequenza da valanghe, anche con modesto potenziale distruttivo, o più raramente da valanghe altamente distruttive. In particolare, una porzione di territorio è attribuita alla zona rossa quando esiste la possibilità che in essa si producano:

- ✓ valanghe "frequenti" (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 30 anni) che esercitano una pressione uguale o superiore a 3 kPa;
- ✓ valanghe "rare" ( per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitano una pressione uguale o superiore a 15 kPa.

Una sola di queste due condizioni è di per sé sufficiente per attribuire alla zona rossa la porzione di territorio all'esame.

### 1.2.2.3 Zona blu (zona a moderata pericolosità)

Sono classificate come zone blu (zone a moderata pericolosità) le porzioni di territorio che possono essere interessate o con una certa frequenza dagli effetti residuali di valanghe, o più raramente da valanghe moderatamente distruttive. In particolare, una porzione di territorio è attribuita alla zona blu quando esiste la possibilità che in essa si verificino:

- ✓ valanghe "frequenti" (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 30 anni) che esercitano una pressione inferiore a 3 kPa;
- ✓ valanghe "rare" (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitano una pressione compresa tra 3 e 15 kPa.

Una sola di queste due condizioni è di per sé sufficiente per attribuire alla zona blu la porzione di territorio all'esame.

#### 1.2.2.4 Zona gialla (zona a bassa pericolosità)

Sono classificate come zone gialle (zone a bassa pericolosità) le porzioni di territorio che possono essere interessate dagli effetti residuali di valanghe di accadimento raro. In particolare una porzione di territorio è attribuita alla zona gialla quando esiste la possibilità che in essa si verifichino valanghe "rare" (per le quali si assume convenzionalmente un tempo di ritorno di riferimento pari a 100 anni) che esercitino una pressione inferiore a 3 kPa.

Andranno altresì delimitate in giallo le porzioni di territorio interessate dall'arresto di eventi valanghivi di accadimento "eccezionale" (per i quali si può assumere indicativamente un tempo di ritorno di riferimento pari a 300 anni).

#### 1.2.2.5 Disposizione delle zone di pericolo

In linea generale, la zona rossa è contenuta nella zona blu, e la zona blu è contenuta in quella gialla. Esternamente alla zona gialla si ha la zona bianca, dove si ritiene che il pericolo sia così esiguo da non richiedere nessun tipo di misura precauzionale.

#### 1.2.2.6 Aggiornamento delle perimetrazioni : criteri generali

Le perimetrazioni delle aree soggette a valanga hanno carattere temporaneo: in base all'aumento delle informazioni disponibili andranno previste verifiche ed eventuali aggiornamenti periodici (o "riperimetrazioni"). In particolare si dovrà provvedere all'aggiornamento delle perimetrazioni ogniqualvolta:

- (i) emergano delle informazioni storiche non considerate nella stesura della perimetrazione, che possano portare a modifiche significative della stessa;

- (ii) si verifichino nuovi eventi valanghivi (ovvero valanghe in aree non censite come valanghive nelle CLPV o nei catasti), o eventi valanghivi che, seppur noti, si manifestino con caratteri di estensione o intensità non conosciute e/o non previste;
- (iii) si verifichino modificazioni (naturali e/o artificiali) del contesto territoriale ed ambientale che comportino un aumento del grado di esposizione al pericolo di valanga (quali ad esempio la deforestazione delle zone di distacco). Gli aggiornamenti periodici dovranno tenere conto anche di campioni di osservazioni nivometriche aggiornate, ed eventualmente della disponibilità di strumenti di calcolo più avanzati di quelli utilizzati al momento della stesura dell'originaria perimetrazione.

Ai fini dell'aggiornamento delle perimetrazioni potrà essere considerata anche la riduzione del grado di esposizione al pericolo di valanga indotta per cause naturali, quali la forestazione delle zone di distacco, o artificiali, legate alla realizzazione di interventi di difesa strutturali (fermo restando che la realizzazione di opere di difesa è motivata esclusivamente dalla necessità di garantire la sicurezza degli insediamenti esistenti). Qualora ritenuta plausibile in relazione alle caratteristiche del sito valanghivo e delle modificazioni artificiali e/o naturali su di esso intervenute, la ripermetrazione delle aree soggette a valanga andrà effettuata con riferimento ai seguenti criteri generali:

- (a) Al fine cautelativo di mantenere una forma di vigilanza sulle aree potenzialmente esposte, soprattutto con riferimento a fenomeni con carattere di eccezionalità, la ripermetrazione conseguente alla realizzazione di interventi di bonifica non dovrà portare ad un ridimensionamento dell'intera area esposta, ma dovrà essere limitato ad una "riclassificazione" del livello di esposizione delle diverse aree (da tradursi nella ridefinizione delle linee di confine rispettivamente tra aree rosse e blu e tra aree blu e gialle).
- (b) La ripermetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga a seguito della forestazione dovrà essere effettuata sulla base di specifiche perizie tecniche, in cui verrà valutato l'effetto della forestazione sul

distacco e scorrimento delle masse nevose, con riferimento alla composizione per specie forestali, alla densità e maturità del bosco e alla sua esposizione ad eventuali fattori di rischio che ne possano ridurre l'efficacia, a breve o lungo termine.

- (c) La riperimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga a seguito della realizzazione degli interventi strutturali di messa in sicurezza del territorio andrà effettuata sulla base di specifiche perizie tecniche, in cui verrà opportunamente verificato il grado di efficacia degli interventi in opera con riferimento al distacco e al movimento delle masse nevose. Nel caso di interventi in progetto, la riperimetrazione delle aree esposte dovrà rappresentare parte integrante del progetto esecutivo delle opere di difesa. La valutazione sull'opportunità di riclassificare le aree esposte al pericolo dovrà essere effettuata anche con riferimento alla "vita tecnica" caratteristica delle diverse tipologie di opere di difesa utilizzate; in ogni caso dovranno essere previsti programmi periodici di manutenzione e periodiche certificazioni di efficienza.

### **1.2.3 Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza di fenomeni valanghivi.**

#### 1.2.3.1 Generalità

In relazione alla classificazione delle aree da effettuarsi in funzione del diverso grado di esposizione al pericolo di valanghe (cfr. § 1.2.2), vengono di seguito definiti i regimi di utilizzo delle stesse da applicarsi nell'ambito degli strumenti urbanistici.

Ai fini di una maggiore garanzia di sicurezza per le popolazioni insediate in aree potenzialmente valanghive, la presenza di insediamenti abitativi e/o commerciali e di infrastrutture pubbliche nelle zone a differente grado di esposizione al pericolo di valanghe (rosse, blu e gialle come da § 1.2.2.2, 1.2.2.3 e 1.2.2.4), renderà comunque necessaria: (a) la predisposizione di un piano di monitoraggio e allertamento finalizzato all'attivazione delle necessarie procedure di Protezione Civile; (b) la realizzazione di tutti i provvedimenti utili a garantire la sicurezza di persone e cose sul lungo periodo

(quali la realizzazione di opere di difesa), non esclusa la "ricollocazione" delle strutture a rischio.

#### 1.2.3.2 Zona rossa (zona ad elevata pericolosità)

- (a) In considerazione dell'elevato grado di pericolo di valanghe caratteristico di tali aree, le zone rosse andranno considerate inedificabili.
- (b) A tale norma generale sarà possibile derogare limitatamente alla realizzazione di volumi tecnici, qualora gli stessi assolvano a funzioni di pubblica utilità e sia comunque dimostrato che la loro realizzazione non sia fonte di aumento di rischio. Tali volumi tecnici non dovranno implicare la presenza umana stabile nelle stagioni favorevoli al manifestarsi di attività valanghiva e dovranno essere realizzati con tecniche costruttive in grado di resistere agli effetti attesi di eventi valanghivi con tempi di ritorno adeguatamente cautelativi. Dovrà inoltre essere verificato che l'effetto dei volumi tecnici sul moto delle masse nevose non produca possibili estensioni delle aree potenzialmente interessate dalle valanghe; in caso affermativo, e qualora non sia possibile ubicare i volumi tecnici in una differente posizione, si dovrà procedere alla ripermetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga.
- (c) Negli strumenti urbanistici, relativamente agli edifici esistenti, andranno ritenuti ammissibili, gli interventi di manutenzione ordinaria, straordinaria e restauro. Gli interventi andranno realizzati con criteri tali da apportare un generale miglioramento delle condizioni di sicurezza del fabbricato.
- (d) Andrà esclusa la possibilità di ampliamento degli edifici esistenti, se non in limiti particolarmente contenuti (indicativamente il 10% della volumetria esistente) ed al solo scopo di adeguare l'edificio a particolari e motivate esigenze di carattere igienico-funzionale. Gli interventi di ampliamento non dovranno portare all'aumento del carico insediativo ed andranno realizzati con criteri tali da apportare un generale

miglioramento delle condizioni di sicurezza del fabbricato. Il miglioramento generale del livello di sicurezza degli immobili andrà dimostrato con specifiche perizie tecniche.

- (e) Andranno comunque esclusi i cambi di destinazione d'uso e più in generale ogni modificazione all'uso del suolo che comporti un aumento del numero di persone esposte al pericolo.
- (f) Per gli edifici ricadenti in zona rossa già gravemente compromessi nella stabilità strutturale per effetto di fenomeni valanghivi pregressi, sono esclusivamente consentiti gli interventi di demolizione senza ricostruzione e quelli temporanei volti alla tutela della pubblica incolumità.

#### 1.2.3.3 Zona blu (zona a moderata pericolosità)

- (a) In considerazione del moderato grado di pericolo di valanghe caratteristico di tali aree, l'utilizzo a fini urbanistici delle zone blu andrà fortemente limitato.
- (b) Relativamente alle zone blu, in aggiunta a quanto ritenuto ammissibile per le zone rosse, negli strumenti urbanistici, potrà essere valutata l'eventualità di consentire la realizzazione di volumi accessori alla residenza funzionalmente connessi ad essa, quali garage o piccoli depositi, la ristrutturazione e/o l'ampliamento più consistente dei fabbricati esistenti, parziali cambi di destinazione d'uso o la realizzazione di nuovi edifici nelle zone meno esposte e con indici di densità edilizia particolarmente ridotti (non superiori a 0,1 mc/mq). La scelta di consentire tali interventi andrà adeguatamente motivata e potrà essere ritenuta ammissibile solo se sussistono le seguenti condizioni:
  - nelle analisi propedeutiche alla redazione dello strumento urbanistico, sia dimostrata ed espressamente dichiarata l'impossibilità di localizzare i previsti interventi in contesti territoriali diversi;

- i nuovi fabbricati, le ristrutturazioni e gli ampliamenti siano realizzati con caratteristiche costruttive tali da garantirne la resistenza agli effetti attesi di eventi valanghivi a carattere eccezionale. Tali caratteristiche andranno certificate da specifiche relazioni tecniche;
  - nel piano di monitoraggio, allertamento ed evacuazione siano definite le procedure di emergenza relative ai nuovi edifici ed a quelli interessati da ampliamento o ristrutturazione.
- (c) Nelle zone blu andrà comunque esclusa la previsione di realizzazione o potenziamento di insediamenti (e infrastrutture) implicanti utilizzi collettivi quali scuole, alberghi, residence, rifugi, ristoranti, campeggi, impianti sportivi, ecc.

#### 1.2.3.4 Zona gialla (zona a bassa pericolosità)

- (a) In considerazione del basso grado di pericolo di valanghe caratteristico di tali aree, le zone gialle possono essere considerate edificabili con riserva.
- (b) Relativamente alle zone gialle, in aggiunta a quanto ritenuto ammissibile per le zone rosse e per le zone blu, negli strumenti urbanistici potrà essere valutata l'eventualità di consentire utilizzi insediativi meno vincolati. La scelta di consentire tali utilizzi andrà adeguatamente motivata e potrà essere ritenuta ammissibile solo se sussistono le seguenti condizioni:
- nelle analisi propedeutiche alla redazione dello strumento urbanistico, sia dimostrata ed espressamente dichiarata l'impossibilità di localizzare i previsti interventi in contesti territoriali diversi;
  - i nuovi fabbricati, le ristrutturazioni e gli ampliamenti siano realizzati con caratteristiche costruttive tali da garantirne la resistenza agli effetti attesi di eventi valanghivi a carattere eccezionale. Tali caratteristiche andranno certificate da specifiche relazioni tecniche;

- nel piano di monitoraggio, allertamento ed evacuazione, siano definite le procedure di emergenza relative ai nuovi interventi previsti.
- (c) Gli insediamenti residenziali in area gialla verranno realizzati con densità edilizia ridotta e andrà tendenzialmente evitata la previsione di realizzazione o potenziamento di insediamenti implicanti utilizzi collettivi quali scuole, alberghi, residence, rifugi, ristoranti, campeggi, impianti sportivi, ecc.

#### **1.2.4 Appendice di chiarificazione approvata dal Comitato Tecnico Direttivo di AINEVA il 06/07/2005**

Il Comitato Tecnico Direttivo di Aineva allo scopo di agevolare il progressivo recepimento dei contenuti dei “Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe” approvati dall'Assemblea di Aineva in data 19.06.2002, preso atto dell'evoluzione tecnica e normativa registrata nel settore della pianificazione del territorio interessato da fenomeni naturali fonti di potenziale pericolo, rileva la necessità di sottoporre ad una revisione generale la sezione di tali Criteri, denominata “Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza di fenomeni valanghivi” (§ 1.2.3).

La necessità di operare questa revisione nasce dall'aver constatato che la natura degli strumenti urbanistici e di pianificazione dell'assetto idrogeologico, approvati o in fase di elaborazione con riferimento al territorio alpino, implica, spesso, la necessità che la trattazione dei fenomeni valanghivi sia effettuata nell'ambito di prescrizioni di carattere generale finalizzate alla gestione globale degli eventi di natura idrogeologica e non alla sola problematica valanghiva.

Le indicazioni elaborate nella sezione “Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza di fenomeni valanghivi” si sono dimostrate inadatte a questo scopo e tale inadeguatezza, si è spesso tradotta nella necessità di ricorrere ad azioni interpretative e di adattamento dei contenuti della sezione, tali da vanificare le finalità di standardizzazione delle procedure tecniche che costituisce lo scopo primario del documento.

Per tale motivo - confermando i contenuti tecnici dei “Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe”, relativi alla individuazione delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanga (§ 1.2.2) - si ritiene necessario avviare un processo di revisione della sezione “Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza di fenomeni valanghivi”, da effettuarsi anche attraverso l'approfondimento degli aspetti tecnico-scientifici finalizzati alla individuazione e quantificazione degli effetti degli eventi valanghivi sugli insediamenti e le infrastrutture, in relazione ai diversi livelli di soglia indicati dagli stessi Criteri.

In attesa degli esiti di tale revisione, i contenuti sviluppati nella sezione “Regime di utilizzo dei suoli interessati dalla presenza di fenomeni valanghivi” - relativamente agli usi del territorio ritenuti compatibili con la presenza di fenomeni valanghivi - sono da considerarsi esclusivamente come semplici indicazioni orientative, la cui applicazione dovrà necessariamente essere armonizzata con le normative in vigore, con la natura degli strumenti generali e settoriali di pianificazione e con le strategie di gestione del territorio proprie di ogni amministrazione aderente.

## **PARTE 2**

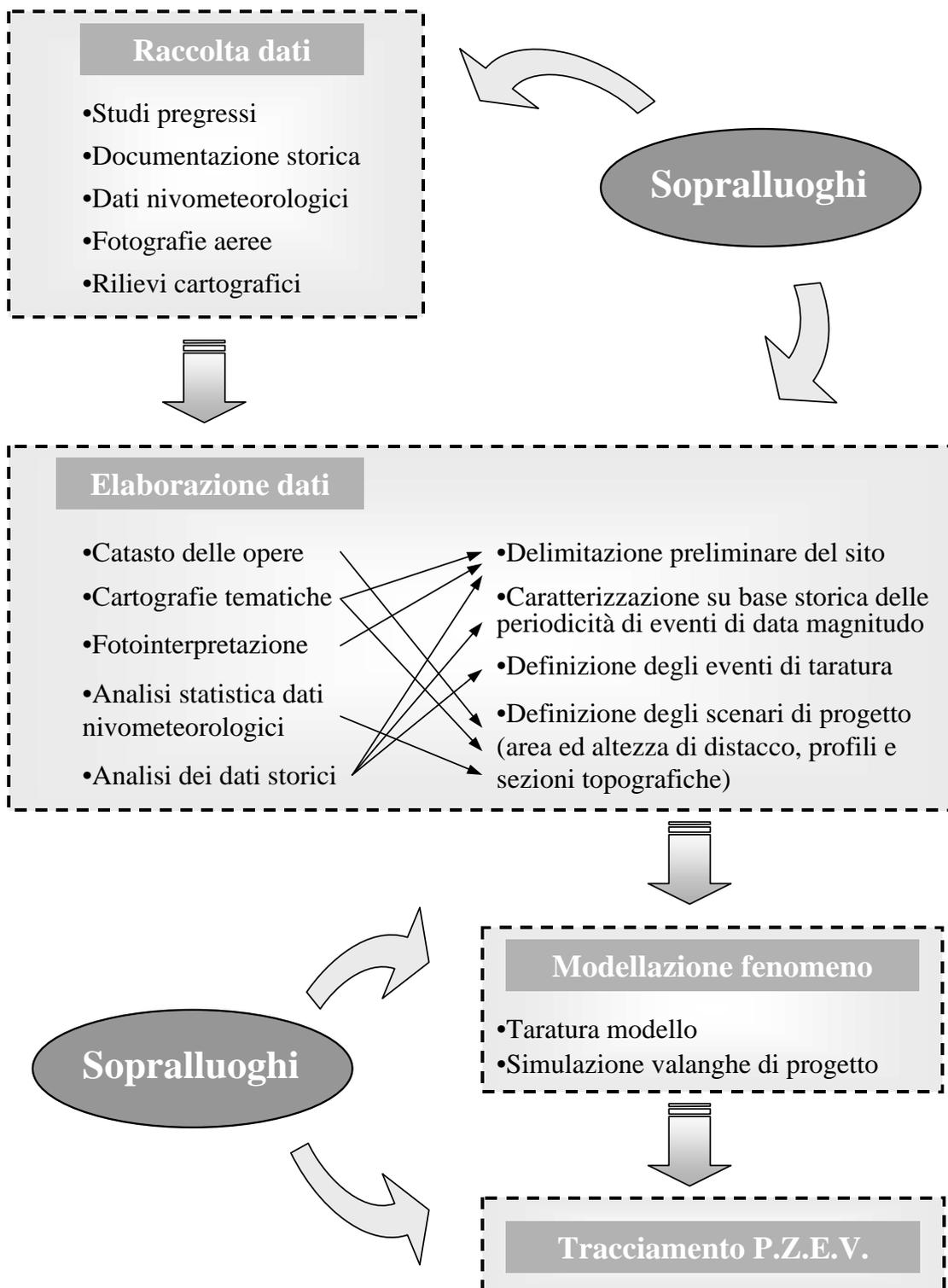
### **Redazione delle mappe di pericolosità (P.Z.E.V.)**

## 2.1 INTRODUZIONE

Le specifiche tecniche di seguito riportate sviluppano una traccia metodologica utile come guida per l'esecuzione delle attività che concorrono all'identificazione del grado di esposizione al pericolo delle aree soggette alla caduta di valanghe (redazione dei Piani delle Zone Esposte alle Valanghe, nel seguito indicati con la sigla P.Z.E.V.). Tale traccia metodologica rappresenta il complemento operativo dei *"Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe"*, presentati in dettaglio nella Parte 1, § 1.2. Il livello di approfondimento e dettaglio delle singole attività di indagine deve essere commisurato caso per caso alle caratteristiche delle situazioni di dissesto e degli elementi a rischio, nonché alla disponibilità di dati e informazioni. I P.Z.E.V. devono comunque essere elaborati esclusivamente secondo criteri scientifici. In particolare, la stima delle distanze di arresto delle valanghe deve prevedere l'ausilio di modelli di calcolo.

Nel seguito del documento, per ragioni di chiarezza, la presentazione delle procedure di perimetrazione dei livelli di pericolo è effettuata con riferimento ad un singolo "sito valanghivo", intendendo con questo termine l'insieme delle zone contigue interessate dal possibile distacco di valanghe che confluiscono in un'unica zona di scorrimento e/o arresto. L'area soggetta a mappatura può essere, in generale, caratterizzata dalla presenza di più siti valanghivi. In tal caso la mappatura complessiva dell'area risulta semplicemente dall'involuppo dei risultati relativi ai singoli siti valanghivi.

In ciascuno dei paragrafi successivi vengono descritte le singole attività di studio che concorrono alla redazione dei P.Z.E.V. Tali attività si inquadrano in un articolato processo di analisi che, da un punto di vista sia metodologico che operativo, può essere schematicamente suddiviso in quattro fasi distinte, peraltro strettamente connesse (vedi Figura 2.1): (a) raccolta dati; (b) elaborazione dati; (c) modellazione fenomeno; (d) tracciamento P.Z.E.V. Le analisi di campo rappresentano una attività di indagine essenziale, che accompagna e supporta tutte le fasi di studio, dalle attività conoscitive preliminari (raccolta ed elaborazione dati), ai calcoli di dinamica, al tracciamento finale della mappa di pericolosità (Figura 2.1).



**Figura 2.1 -** Schema generale delle differenti attività di studio che concorrono alla perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga

## **2.2 RACCOLTA DEGLI STUDI ESISTENTI**

Gli studi geologici, nivologici e valangologici esistenti relativi al sito valanghivo in esame devono essere raccolti, analizzati criticamente ed integrati con l'attività conoscitiva di cui ai paragrafi seguenti.

## **2.3 ANALISI PRELIMINARE DEL SITO VALANGHIVO**

L'analisi preliminare del sito valanghivo deve comprendere un inquadramento territoriale, geomorfologico e vegetazionale del bacino, nonché una descrizione generale del sito valanghivo, che includa la redazione di carte tematiche utili alle fasi di analisi successive (es. carta delle pendenze, carta delle esposizioni, carta degli usi del suolo, ecc.). Qualora siano presenti interventi strutturali di messa in sicurezza, essi devono essere descritti in dettaglio e valutati da un punto di vista dell'efficienza funzionale, in accordo alle indicazioni metodologiche riportate in *Appendice A - Catasto delle opere di difesa*. Il catasto delle opere di difesa deve essere documentato in un apposito allegato.

## **2.4 ANALISI STORICA DEGLI EVENTI VALANGHIVI**

Oggetto di questa fase dello studio è la ricostruzione delle valanghe storiche. La raccolta di informazioni relative ad eventi valanghivi del passato deve prevedere la consultazione delle cartografie di settore e dei Catasti Valanghe degli Uffici Regionali e delle Province Autonome competenti nonché la ricerca diretta presso archivi di Stato, archivi Comunali o delle Comunità Montane, biblioteche, archivi del Corpo Forestale, degli Enti Parco e più in generale di tutti gli enti pubblici e privati interessati alla gestione del territorio. L'indagine storica deve includere anche interviste ad abitanti delle zone interessate, raccolta di fotografie, articoli di giornale, documenti videoregistrati e l'analisi di documenti cartografici predisposti su base storica da enti pubblici o privati. Le informazioni raccolte devono essere documentate in appositi allegati (che includano tabelle riassuntive degli eventi censiti, schede di rilievo "post-evento", fotocopie di materiale originale, ecc.).

Tale tipo d'indagine è di supporto sia alla delimitazione preliminare del sito valanghivo (§ 2.8) sia all'identificazione di eventi valanghivi documentati con un grado di dettaglio sufficiente per essere utilizzati come riferimento nella taratura dei modelli matematici utilizzati per il calcolo della dinamica della valanga (§ 2.10). Nel caso di siti valanghivi "adeguatamente" documentati (con riferimento alla quantità e qualità delle informazioni storiche disponibili), possono essere eseguite anche opportune analisi statistiche sui dati storici, al fine di ottenere una caratterizzazione di prima approssimazione del legame tra frequenza ed intensità dei fenomeni valanghivi attesi sul sito oggetto di indagine (in accordo alle indicazioni metodologiche descritte in Appendice B - *Modelli per il calcolo delle valanghe*, § B.2.3).

## **2.5 FOTINTERPRETAZIONE**

La fotointerpretazione rappresenta uno strumento di estrema utilità ai fini di un primo approccio conoscitivo di carattere generale al sito oggetto di indagine. In particolare l'analisi comparata delle fotografie aeree disponibili sull'area in esame è finalizzata all'identificazione dei limiti delle aree valanghive sulla base delle evidenze morfologiche e vegetazionali (§ 2.8). La fotointerpretazione consente in particolare, mediante comparazioni di immagini relative a differenti periodi storici, di valutare l'evoluzione della esposizione al pericolo di valanghe di un determinato sito in rapporto alla realizzazione di opere di difesa, alle mutazioni nella copertura forestale ed a variazioni delle destinazioni d'uso delle aree. I risultati derivanti dalla fotointerpretazione possono inoltre essere utili nella definizione delle condizioni del sito in concomitanza con gli eventi storici catalogati (§ 2.4) e di conseguenza nella identificazione degli scenari per l'applicazione dei modelli di dinamica in fase di taratura.

## **2.6 SOPRALLUOGHI SUL SITO VALANGHIVO**

I sopralluoghi sono finalizzati alla verifica di dettaglio delle caratteristiche geomorfologiche del sito, della copertura vegetale e delle strutture e infrastrutture esposte, nonché all'individuazione di eventuali tracce del passaggio di valanghe (cd. "testimoni muti"). I rilievi sul sito hanno anche lo

scopo di censire le eventuali opere di difesa presenti e di verificarne lo stato di conservazione e la funzionalità; detta attività deve essere effettuata in accordo con le indicazioni metodologiche presentate in Appendice A - *Catasto delle opere di difesa*. Devono inoltre essere analizzati possibili dissesti in atto o quiescenti che possano aggravare la propensione alla valangosità del sito, nonché compromettere la conservazione di eventuali manufatti di difesa (es. crolli in roccia a monte di strutture di ritenuta in zona di distacco). I sopralluoghi devono anche favorire l'acquisizione di una adeguata documentazione fotografica, che deve essere allegata allo studio includendo le opportune didascalie esplicative.

## **2.7 RILIEVI TOPOGRAFICI**

La descrizione topografica del sito, funzionale alle applicazioni modellistiche e alla rappresentazione grafica dei risultati, deve essere effettuata tramite un supporto planimetrico aggiornato a scala di dettaglio adeguata (scala 1:2000 – 1:5000). La ricostruzione dei profili principali di scorrimento e delle sezioni topografiche è prevista in un numero e con un dettaglio adeguato alla corretta definizione della geometria del sito in relazione al modello di dinamica utilizzato. Particolare accuratezza viene richiesta nella descrizione delle zone di distacco e di arresto, dove vanno censite tutte le opere di difesa ivi già realizzate (vedi Appendice A - *Catasto delle opere di difesa*) nonché le strutture e infrastrutture esposte, ove necessario aggiornando la cartografia esistente.

## **2.8 DELIMITAZIONE PRELIMINARE DEL SITO VALANGHIVO**

Conclusa la fase di raccolta ed elaborazione dei dati si procede ad una "delimitazione preliminare" del sito valanghivo, intesa come la definizione del complesso delle aree che, sulla base delle analisi di cui ai punti precedenti (cartografie tematiche, indagine storica, fotointerpretazione, sopralluoghi), si ritiene possano essere soggette a fenomeni di distacco, scorrimento ed accumulo di masse nevose (vedi Figura 2.1). La delimitazione preliminare del sito valanghivo viene opportunamente restituita su base cartografica a scala 1:10000 o di maggior dettaglio. In aggiunta possono essere prodotti estratti cartografici a maggiore approfondimento (in scala 1:5000 o di maggior

dettaglio) con la delimitazione delle zone identificate come ambiti di potenziale distacco.

Per quanto riguarda l'estremità a valle dell'area valanghiva (zona di arresto) devono essere indicati i dati desunti dalle analisi di cui ai § 2.4, 2.5 e 2.6, ove possibile distinguendo le delimitazioni dell'area di espansione della valanga in due sottocategorie:

- *Massima espansione storica conosciuta*: risultante da testimonianze orali o scritte e/o analisi fotointerpretative o dendrocronologiche. Permette la ricostruzione dell'evento con un livello di dettaglio generalmente basso (tipicamente la quota minima raggiunta dal deposito, desumibile da informazioni quali l'interessamento di un fabbricato, il danneggiamento alla copertura boschiva, ecc.). Non sono in generale disponibili informazioni sulle condizioni al distacco.
- *Massima espansione documentata*: derivata da schede catastali delle valanghe (quali ad esempio il Modello 7 AINEVA o le schede valanghe redatte dal Corpo Forestale). Permette una ricostruzione dell'evento con un livello di dettaglio medio, comprendente le principali caratteristiche del deposito (morfologia, quota minima, lunghezza, massimo spessore, ecc.) ed una stima delle condizioni al distacco (quota massima di distacco, spessore della neve al suolo, spessore di distacco, ecc.). Nel caso particolare di fenomeni valanghivi osservati nel corso di sopralluoghi effettuati nell'arco di tempo in cui è condotto lo studio è possibile una ricostruzione dell'evento - ad esempio mediante analisi di campo - con un livello di dettaglio elevato sia relativamente alle condizioni di arresto che di distacco.

La caratterizzazione del legame tra intensità (distanze di arresto, pressioni di impatto, ecc.) e frequenza degli eventi valanghivi attesi, nonché la delimitazione delle aree potenziali di massima espansione della valanga, non censite in alcun modo ma che potrebbero comunque prodursi in circostanze estreme (soprattutto quando non vi siano osservazioni che risalgono a tempi remoti), è invece ottenuta mediante l'utilizzo di modelli matematici (§ 2.10) e, ove possibile ed in via preliminare, sulla base di analisi statistiche dei dati storici (§ 2.4).

## 2.9 ANALISI NIVOMETEOROLOGICHE

Con riferimento a una o più stazioni di rilevamento ritenute significative per l'area di studio, la cui tipologia e ubicazione devono essere opportunamente documentate (ente gestore, quota, esposizione, parametri misurati, corografia generale dell'area di studio con indicazione della posizione delle stazioni rispetto al sito valanghivo), deve essere effettuata l'analisi e l'elaborazione statistica dei seguenti dati nivometeorologici (in accordo alle indicazioni metodologie fornite in Appendice C - *Elaborazioni statistiche dei dati nivometeorologici*):

- (a) precipitazione nevosa su uno e più giorni consecutivi (in particolare su tre giorni consecutivi,  $DH_{3gg}$ , parametro critico per la stima dell'altezza di distacco, vedi Appendice D - *Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto*);
- (b) altezza della neve al suolo;
- (c) vento (direzione ed intensità).

In accordo ai criteri di Appendice D (*Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto*) l'elaborazione statistica delle grandezze di cui ai punti (a) e (c) consente di stimare le altezze di distacco relative agli eventi di progetto (ovvero caratterizzati da prefissate periodicità), che vengono successivamente simulati mediante opportuni modelli di calcolo ai fini della predisposizione dei P.Z.E.V. (vedi Figura 2.1 e § 2.10). L'analisi statistica della grandezza di cui al punto (b) consente viceversa di stimare le condizioni di innevamento al suolo per prefissate periodicità, valutazione utile qualora si debba analizzare l'efficienza di opere di difesa attiva o passiva eventualmente presenti sul sito in esame.

In relazione ai valori assunti per i tempi di ritorno di riferimento nei calcoli di dinamica (vedi Parte 1 - § 1.2.2), è necessario che siano determinate le altezze di distacco relative ai seguenti valori del tempo di ritorno: 30, 100 e 300 anni. Qualora le serie storiche di dati nivometrici disponibili siano poco "significative" (sia da un punto di vista di ubicazione della(e) stazione(i) utilizzata(e) che di lunghezza della(e) serie storica(che) disponibile(i)), risulta

opportuno fare ricorso a tecniche di "analisi regionale" (vedi Appendice C - *Elaborazioni statistiche dei dati nivometeorologici*, § C.6).

L'analisi dei dati di innevamento può consentire anche di identificare le condizioni climatiche relative ad eventi storici documentati, favorendo l'acquisizione di informazioni necessarie in fase di taratura del modello matematico impiegato.

Le analisi nivometeorologiche devono comprendere la descrizione della metodologia utilizzata per la stima dei parametri di distacco, e presentare in allegato le serie storiche dei principali dati nivometeorologici utilizzati allo scopo (ad esempio in forma tabulare).

## **2.10 MODELLAZIONE MATEMATICA**

L'applicazione dei modelli matematici per la simulazione del discendimento delle valanghe sul sito valanghivo, è finalizzata alla identificazione finale dell'esposizione al pericolo di valanga delle aree urbanizzate e non, ovvero alla predisposizione dei P.Z.E.V. sull'area di studio. I differenti livelli di pericolo sono espressi in funzione del tempo di ritorno e delle pressioni di impatto delle valanghe di progetto (secondo i criteri esposti nella Parte 1 del rapporto, § 1.2.2). Con tali obiettivi l'applicazione dei modelli di dinamica, eventualmente preceduta da una opportuna fase di taratura sul sito valanghivo oggetto di studio, viene effettuata su scenari di calcolo (area ed altezza di distacco) rappresentativi di prefissate periodicità (vedi Figura 2.1).

La determinazione delle altezze di distacco di progetto è trattata al § 2.9; la caratterizzazione della superficie di distacco deve essere effettuata sulla base delle informazioni raccolte nel corso delle analisi di cui ai § 2.3 - 2.7 (vedi Figura 2.1) e essere basata principalmente su fattori morfologici, cliviometrici e vegetativi. L'applicazione dei modelli di dinamica consente la determinazione quantitativa delle zone di influenza e delle sollecitazioni dinamiche degli eventi di progetto.

Il modello impiegato per i calcoli relativi alla dinamica della valanga dovrà essere adeguatamente descritto. Qualora vengano utilizzati programmi di

calcolo commerciali e/o di largo utilizzo nella pratica ingegneristica (vedi Appendice B - *Modelli per il calcolo delle valanghe* - § B.3), possono essere sufficienti l'indicazione precisa del programma utilizzato e i principali riferimenti bibliografici.

Sia la fase di taratura che quella finalizzata alla redazione del P.Z.E.V. devono essere basate sulle informazioni dedotte dalle altre attività di studio (analisi nivometeorologiche, sopralluoghi, analisi dei dati storici, ecc.), in accordo allo schema metodologico di Figura 2.1. Gli scenari di distacco adottati (area ed altezze di distacco) vanno presentati in dettaglio, e la scelta dei parametri modellistici (es. coefficienti di resistenza) adeguatamente motivata. Nel caso si utilizzi un modello monodimensionale si dovrà indicare in planimetria la traccia del(i) profilo(i) principale(i) di scorrimento utilizzato(i) nei calcoli, e dovranno essere specificati i criteri utilizzati per la delimitazione bidimensionale della zona di arresto (eventualmente indicando in planimetria le direttrici principali di espansione considerate nei calcoli).

L'applicazione dei modelli matematici di simulazione può inoltre essere finalizzata alla verifica della efficacia di interventi di difesa in atto (vedi § 2.11), siano essi atti a ridurre i volumi di distacco che a deviare, contenere e/o rallentare il flusso della valanga (in accordo con le indicazioni generali presentate in Appendice F - *Riperimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga in relazione alla presenza di interventi di messa in sicurezza*).

## **2.11 REDAZIONE DEL P.Z.E.V.**

Le aree a diverso grado di esposizione al pericolo di valanga (rispettivamente elevato, moderato e basso) devono essere perimetrate sulla base delle attività conoscitive descritte ai paragrafi precedenti ed in conformità ai criteri contenuti nel documento: "Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe", approvato dall'Assemblea di AINEVA in data 19/06/2002 e riportato nella Parte 1 - § 1.2.2. In Appendice E - *Pressioni di impatto e delimitazione delle aree pericolose* - sono fornite alcune utili indicazioni di carattere pratico in merito alla redazione del P.Z.E.V.

Nel caso di siti valanghivi in cui siano presenti interventi strutturali di messa in sicurezza deve essere comunque realizzata (e allegata allo studio) una perimetrazione che non consideri l'effetto delle opere di difesa esistenti. Sulla base delle analisi e dei rilievi indicati al § 2.3 (vedi Appendice A - *Catasto delle opere di difesa*) è possibile altresì ridelimitare l'estensione delle zone rossa e blu considerando, mediante opportune applicazioni modellistiche, gli effetti indotti sul moto delle valanghe di progetto dalle opere di difesa ritenute efficaci allo scopo (in accordo alle indicazioni generali presentate in Appendice F - *Riperimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga in relazione alla presenza di interventi di messa in sicurezza*). Per contro, al fine cautelativo di mantenere una forma di vigilanza sulle aree potenzialmente esposte, soprattutto con riferimento a fenomeni a carattere eccezionale, la riperimetrazione conseguente alla presenza di interventi di bonifica non deve portare ad un ridimensionamento dell'intera area esposta; per tale ragione l'estensione della zona gialla deve essere mantenuta invariata (vedi Parte 1 - § 1.2.2.6).

Va precisato che i valori critici della frequenza e dell'intensità fissati dal documento: "Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe" (vedi Parte 1 - § 1.2.2.) sono validi soltanto per gli insediamenti a destinazione abitativa o assimilabile. Per altri scopi, quali la realizzazione di interventi di carattere infrastrutturale (vie di comunicazione, impianti di risalita, linee elettriche, ecc.), si potranno considerare valori convenientemente modificati che, in conformità alle eventuali normative di settore, dovranno essere valutati caso per caso dal progettista in accordo con l'ente competente.

Si rammenta inoltre che i "Criteri per la perimetrazione e l'utilizzo delle aree soggette al pericolo di valanghe" associano orientativamente ad ogni livello di esposizione al pericolo individuato dal P.Z.E.V. modalità di utilizzo del suolo diversificate sulla base di un regime vincolistico con rigidità decrescente a partire dalle zone rosse (vedi Parte 1 - § 1.2.3).

Accanto all'utilizzo in campo urbanistico dei P.Z.E.V., come supporto tecnico alla redazione dei Piani Regolatori Generali (in quanto strumento che pone dei vincoli all'uso del suolo in relazione al pericolo di valanga accertato), tali elaborati rappresentano anche la base tecnica essenziale per la

progettazione degli interventi di mitigazione del rischio, costituendo uno strumento indispensabile sia per la caratterizzazione delle priorità di intervento (vedi Appendice G - *Analisi di rischio*) sia per la valutazione dell'efficacia delle soluzioni tecniche proposte.

## **PARTE 3**

### **Appendici**

# **APPENDICE A**

## **Catasto delle opere di difesa**

Nella presente Appendice sono fornite indicazioni metodologiche per l'analisi delle opere di difesa presenti su un sito valanghivo. La descrizione dettagliata ed aggiornata delle opere di difesa esistenti e l'esame sistematico del loro stato di conservazione e del relativo livello d'efficienza risultano preliminari alla valutazione dei potenziali effetti delle stesse sulle valanghe (e quindi alla stesura del P.Z.E.V), nonché all'individuazione di eventuali interventi di completamento. Detta analisi fornisce inoltre uno strumento di supporto alla programmazione degli interventi di manutenzione a breve ed a lungo termine. Nei paragrafi successivi sono descritti gli elementi essenziali secondo cui dovrà essere strutturata tale analisi. In Appendice G, § G.3.3 è presentato, con riferimento ad un caso di studio pratico, un esempio di realizzazione del catasto delle opere.

## **A.2 MODALITÀ DI SCHEDATURA**

Il sistema di schedatura delle opere dovrà essere basato su criteri di completezza descrittiva e semplicità di consultazione e dovrà consentire di identificare univocamente l'opera sul sito. Nella redazione del "catasto delle opere", oltre ai manufatti direttamente rivolti alla difesa dalle valanghe, dovranno essere prese in considerazione anche opere di protezione la cui efficienza condiziona la funzionalità delle opere paravalanghe (quali ad esempio barriere paramassi poste a monte di ponti da neve). Dovranno inoltre essere censiti gli eventuali fenomeni di dissesto in atto, che a breve o lungo termine possano pregiudicare la funzionalità delle opere di difesa. Il catasto delle opere dovrà essere strutturato in modo da comprendere una documentazione in forma sia tabulare che cartografica. Dovrà essere inoltre fornita una adeguata documentazione fotografica. Nel seguito, a livello indicativo, viene proposta una modalità di archiviazione che consente in maniera agevole di verificare e aggiornare sistematicamente le informazioni sullo stato delle opere di difesa.

I dati caratteristici che costituiscono il catasto dovranno essere suddivisi nelle seguenti tre categorie tematiche:

- dati identificativi;
- dati tipologici;
- dati relativi allo stato di conservazione ed efficienza.

### DATI IDENTIFICATIVI

<b>No. OPERA</b>	Ogni singola opera è identificata secondo un codice numerico sequenziale.
<b>ZONA</b>	Indica la zona di ubicazione delle opere e ammette i valori: D (zona di distacco); S (zona di scorrimento); A (zona di arresto).
<b>QUOTA</b>	Indica la quota di posizionamento dell'opera in m s.l.m. dedotta dal rilievo specifico eseguito. Nella norma corrisponde al valore medio rispetto ai due estremi dell'opera.
<b>PERIODO</b>	Indica l'anno o il periodo di costruzione, dedotto dalle indagini archivistiche. E' un parametro importante al fine di valutare l'evoluzione nel tempo del degrado delle opere.

### DATI TIPOLOGICI

<b>TIPO</b>	E' una sigla che rappresenta la tipologia costruttiva dell'opera, secondo le classi di opere generalmente usate per la difesa "attiva" e "passiva" dalle valanghe.
-------------	--

#### OPERE DI DIFESA ATTIVA

DL	Deflettore da vento in legno
DM	Deflettore da vento in metallo
BFL	Barriera frangivento in legno
BFM	Barriera frangivento in metallo
AV	Acceleratore da vento
TL	Treppiedi in legno
RL	Rastrelliera da neve in legno
PLL	Ponte da neve in legno con traverse in legno
PML	Ponte da neve metallico con traverse in legno
PMM	Ponte da neve metallico con traverse metalliche
RN	Rete da neve
ON	Ombrello da neve
BP	Barriera paramassi
MC	Muro di terrazzamento in calcestruzzo

MS	Muro di terrazzamento a secco
MG	Muro di terrazzamento in gabbioni

#### OPERE DI DIFESA PASSIVA

BC	Briglia in cls
BM	Briglia in muratura
BP	Barriera/rete paramassi
DCT	Diga di contenimento in terra
DCM	Diga di contenimento in muratura
DCC	Diga di contenimento in cls
MDT	Muro/argine deviatore in terra
MDM	Muro/argine deviatore in muratura/gabbioni
MDC	Muro/argine deviatore in cls
CRT	Cuneo di rallentamento in terra
CRM	Cuneo di rallentamento in muratura
CST	Cuneo spartivalanghe in terra
CSM	Cuneo spartivalanghe in muratura

**ALTEZZA** Indica l'altezza dell'opera. Nel caso dei ponti (e delle reti) da neve è misurata perpendicolarmente al terreno (altezza utile  $D_k$ ); nel caso dei manufatti in muratura o in terra è riportata l'altezza massima, misurata verticalmente fuori terra.

**LUNGHEZZA** Indica la lunghezza dell'opera. Nel caso dei ponti (e delle reti) da neve indica la lunghezza complessiva di elementi adiacenti (senza discontinuità).

**No ELEMENTI** Nel caso di ponti da neve (o barriere frangivento) è riportato il numero di elementi (campate) che costituiscono l'opera; in aggiunta può essere indicato anche il numero di traverse longitudinali.

**FONDAZIONI** E' una sigla che differenzia le tipologie di fondazione usate per la realizzazione delle opere. Si distinguono:

FS	Fondazioni a secco
FP	Fondazioni su plinti in cls
FM	Fondazioni su micropali

## STATO DI CONSERVAZIONE ED EFFICIENZA

Per la parte relativa alla descrizione dello stato delle opere si adotterà un criterio qualitativo basato sui seguenti campi:

**CLASSE** Si propone una suddivisione in tre livelli numerici per l'identificazione dello stato strutturale e funzionale dell'opera:

- 1 Opera in buone condizioni strutturali e funzionali che richiede esclusivamente interventi manutentivi ordinari.
- 2 Opera parzialmente degradata con ridotta efficienza funzionale che richiede interventi manutentivi straordinari per il pieno ripristino della funzionalità.
- 3 Opera compromessa dal punto di vista strutturale e funzionale per la quale interventi manutentivi risultano attuabili con oneri dell'ordine di quelli necessari alla sua completa sostituzione.

**NOTE** E' un campo di testo destinato ad osservazioni in merito alle condizioni di efficienza dell'opera, alle cause del suo eventuale degrado o alle particolari condizioni del sito ove è ubicata.

Le categorie tematiche descritte dovranno essere riportate in forma tabulare. Il censimento tabulare dovrà essere complementato da una adeguata documentazione cartografica, comprendente:

- una visione generale del sito (scala 1:10000 o 1:5000) con indicazione delle varie aree protette, ed eventualmente delle aree soggette a fenomeni di dissesto;
- una indicazione di maggior dettaglio delle singole aree bonificate (scala 1:5000 o 1:2000) in cui, in accordo con la codifica del catasto (cfr. No. opera), siano numerati ed identificati in maniera univoca i singoli elementi.

### A.3 ANALISI DEI FENOMENI DI DISSESTO

Dovranno essere documentati e sinteticamente descritti gli eventuali fenomeni di dissesto (quali crolli in roccia, fenomeni di erosione superficiale, ruscellamenti, smottamenti della coltre detritica e morenica, ecc.) che interessano le zone del sito valanghivo su cui si è intervenuti con opere di difesa. Indicativamente, si potrà fare riferimento allo schema esemplificativo di Tabella A.1.

ZONA <sup>(1)</sup>	AREA [ha]	OPERE PRESENTI	FENOMENI DI DISSESTO
A	0,25	Ponti da neve	Tutta l'area è soggetta a fenomeni di caduta massi provenienti dagli affioramenti sovrastanti; in particolare la porzione orientale è ubicata lungo un canale che convoglia i massi provenienti da un vasto bacino che si estende fino allo spartiacque.
B	0,60	Terrazzamenti con muri a secco	Il versante a cui appartiene questa zona è caratterizzato dalla presenza di estese e potenti coltri di materiale sciolto, alternate ad affioramenti rocciosi estremamente fratturati ed in pessime condizioni di stabilità. Il fenomeno prevalente (estremamente dannoso data la tipologia dei manufatti presenti) è costituito da diffusi franamenti di limitata entità che interessano i depositi di copertura.
C	...	...	...
...	...	...	...

<sup>(1)</sup>: La lettera identificativa della zona in esame è riferita all'indicazione utilizzata nella cartografia generale (scala 1:10000 o 1:5000) di cui al § A.2.

**Tabella A.1 - Catasto delle opere: esempio di schema descrittivo dei fenomeni di dissesto**

## **APPENDICE B**

### **Modelli per il calcolo delle valanghe**

A partire dalla prima metà degli anni '50 sono state avviate, in molti paesi europei ed extraeuropei, ricerche specifiche mirate allo sviluppo di strumenti modellistici di supporto alla mappatura del pericolo di valanghe. Una rassegna estensiva in merito è stata fornita recentemente da Harbitz (1998). Allo stato attuale si riconoscono essenzialmente due possibili approcci al calcolo delle valanghe (vedi Figura B.1): i modelli empirici e i modelli di dinamica (o fisico-matematici).

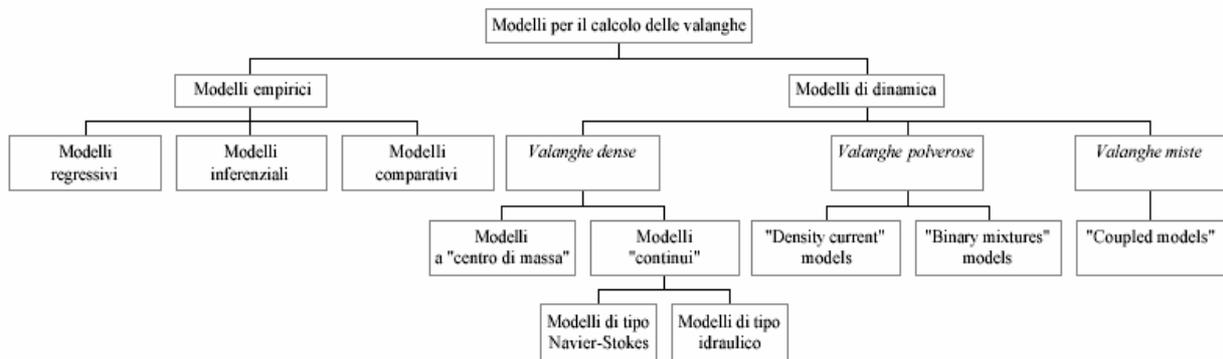


Figura B.1 - Schema dei modelli per il calcolo delle valanghe

I modelli empirici (§ B.2) si basano su elaborazioni statistiche di dati relativi ad eventi valanghivi storici, e prescindono dalla fisica del fenomeno; per contro, nei modelli di dinamica (§ B.3) viene proposta una descrizione dei processi fisici messi in gioco da una valanga durante il suo movimento. Gli approcci di tipo empirico consentono esclusivamente la stima della distanza d'arresto di una valanga; viceversa nei modelli fisico-matematici vengono utilizzati sistemi di equazioni che consentono, almeno in linea di principio, di descrivere la dinamica del fenomeno dal distacco all'avvenuto arresto e di ottenere una caratterizzazione più completa delle proprietà fisiche del fenomeno (velocità, pressioni d'impatto, altezze di scorrimento, distribuzione del deposito, ecc.).

## B.2 MODELLI EMPIRICI

I modelli empirici possono a loro volta essere distinti in tre sotto-classi (vedi Figura B.1): modelli regressivi, modelli inferenziali e modelli comparativi.

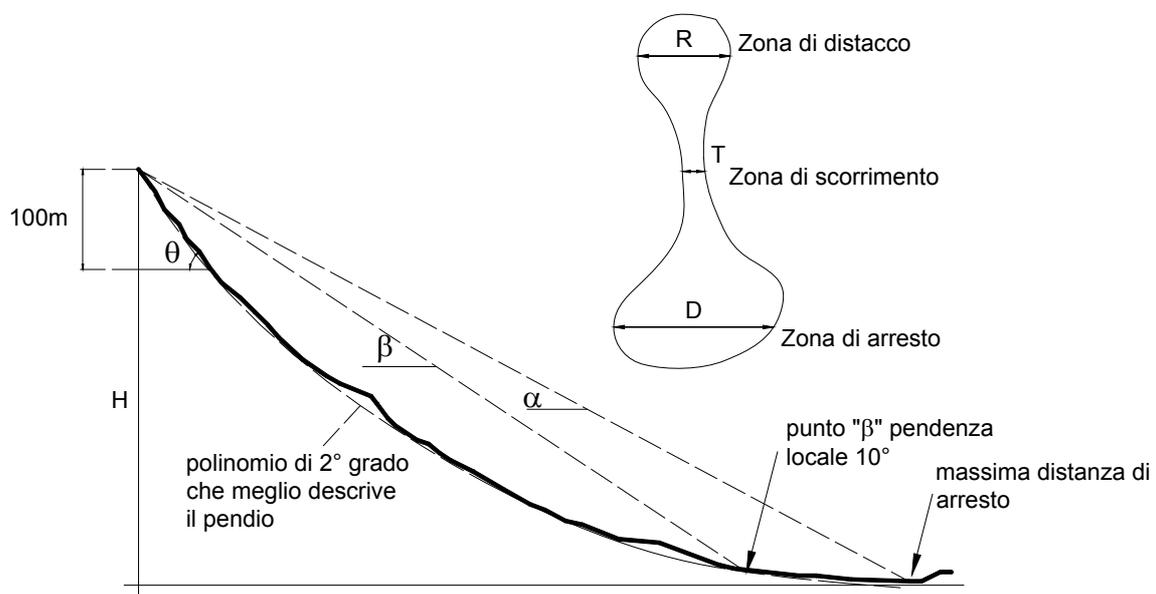
I modelli regressivi (§ B.2.1) sono i primi modelli di tipo empirico sviluppati per il calcolo delle distanze di arresto delle valanghe tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 (Bovis e Mears, 1976; Lied e Bakkehøi, 1980). Tali modelli si basano su regressioni statistiche, in cui le massime distanze di arresto misurate su un campione di siti valanghivi ben documentati vengono messe in relazione alle caratteristiche topografiche dei siti stessi.

I modelli inferenziali si basano sull'adattamento di leggi di distribuzione di probabilità a campioni di distanze di arresto. Storicamente tali modelli sono stati sviluppati a scala regionale (McClung e Lied, 1987), ovvero i dati di massima distanza di arresto relativi a numerosi siti, una volta opportunamente scalati (mediante il cosiddetto "rapporto di arresto", vedi § B.2.2), vengono raggruppati in un unico campione ed adattati con una opportuna legge di ripartizione (la legge di Gumbel ha generalmente mostrato un buon adattamento ai campioni di distanze di arresto estreme, come discusso da McClung et al., 1989). In tal modo è possibile valutare, su un dato sito, la probabilità che un evento estremo raggiunga una certa distanza di arresto. Più recentemente è stata proposta un'analisi inferenziale dei dati storici di distanza di arresto di tipo puntuale, ovvero effettuata alla scala del singolo sito (Barbolini e Cappabianca, 2002). In questo caso non ci si limita più al solo evento massimale, ma si considera un campione di eventi storici registrati con sistematicità sul sito in un certo intervallo di tempo; questo tipo di analisi consente di caratterizzare per il sito in esame il legame tra distanza di arresto e tempo di ritorno (vedi § B.2.3).

A titolo di completezza si deve anche citare il metodo comparativo proposto da Bakkehøi e Norem (1993). La stima della massima distanza di arresto raggiungibile da una valanga in un determinato sito è valutata in questo caso mediante una metodologia di tipo "nearest neighbours" (Buser, 1983), in particolare come media delle distanze di arresto estreme relative a siti valanghivi che mostrano somiglianza (topografica) con il sito in esame.

## B.2.1 Modelli regressivi

I modelli empirici di tipo regressivo, originariamente sviluppati dai ricercatori del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) e per tale ragione comunemente denominati "modelli statistico-topografici norvegesi", si basano sulla determinazione di relazioni regressive che consentono di stimare la massima distanza di arresto raggiungibile da un evento valanghivo in un determinato sito sulla base esclusiva di parametri topografici del sito stesso.



**Figura B.2 - Parametri topografici utilizzati nel modello statistico-topografico norvegese**

Analizzando più di 200 siti valanghivi norvegesi, per i quali erano note le massime distanze di arresto delle valanghe su intervalli di tempo variabili da 100 a 300 anni, i ricercatori dell'NGI hanno studiato la possibilità di esprimere la massima distanza di arresto (definita mediante l'angolo  $\alpha$  di Figura B.2) in funzione dei principali parametri topografici del sito, tra i quali (vedi Figura B.2):

- $\theta$ , inclinazione media della zona di distacco (espressa in gradi sessagesimali), misurata sui primi cento metri di dislivello a partire dal punto più alto di distacco;

- $\beta$ , pendenza media della "zona attiva" (espressa in gradi sessagesimali), ovvero della zona che si estende dal punto più alto di distacco al punto in cui inizia la zona di arresto (denominato "punto  $\beta$ "), quest'ultimo definito come il punto lungo il pendio in cui si registra una pendenza locale rispetto all'orizzontale pari a  $10^\circ$ , e valori inferiori a valle;
- $H$ , dislivello totale del sito, dal punto più alto di distacco al punto più a valle di arresto;
- $R$ , larghezza massima della zona di distacco;
- $T$ , larghezza minima della zona di scorrimento;
- $D$ , larghezza massima della zona di arresto;
- $y''$ , grado di concavità del profilo longitudinale del pendio, descritto dalla derivata seconda del polinomio di secondo grado che meglio descrive il profilo longitudinale del pendio.

La ricerca di un modello regressivo ad una sola variabile fece emergere quale migliore predittore di  $\alpha$  il parametro  $\beta$ , mediante una regressione lineare del tipo:  $\alpha = A\beta + B$ , con  $A$  e  $B$  coefficienti di regressione (da cui la denominazione di modello " $\alpha/\beta$ " spesso utilizzata).

Nel corso degli anni furono proposte numerose modifiche e migliorie al modello originario. Studi successivi condotti in diverse regioni montane europee ed extra-europee confermarono sia l'opportunità di utilizzare variabili topografiche quali predittori delle distanze di arresto per le valanghe estreme sia l'importanza dominante del parametro  $\beta$  nella stima di  $\alpha$ . Una sintesi dei risultati di tali studi è fornita in Tabella B.1, in cui sono presentate le migliori relazioni predittive ricavate in differenti aree di studio. Esempi di applicazione del modello " $\alpha/\beta$ " a differenti zone alpine italiane si possono trovare in Barsanti (1990), Castaldini (1994) e Fellini (1999).

Regioni montuose (Riferimenti)	No. di valanghe	Ipotesi	Equazioni regressive	Accuratezza	
				DS (°)	R <sup>2</sup> (-)
Norvegia (Bakkehoi et al., 1983)	206	Tutte le valanghe	$\alpha=0,96\beta-1.4$ $\alpha=0.92\beta-7.9*10^{-4}H+$ $+0.024H\sqrt{\beta}+0.04$	2,3 2,28	0,85 0,85
	20	H >900(m) $\beta\leq 30^\circ$	$\alpha=0.94\beta+0.035\theta-2.6$	1.02	0,81
Italia Bacino del Cordevole (Barsanti, 1990)	53	Tutte le valanghe	$\alpha=0.89\beta+0,66$ $\alpha=0.89\beta-0.62H\beta y''+$ $+27.36Hy''-2.6$	1,62 1,31	0,73 0,82
	Canada (McClung&Mears, 1991)	126	Tutte le valanghe	$\alpha=0.93\beta$	-
Alaska (McClung&Mears, 1991)	52	Tutte le valanghe	$\alpha=0.74\beta+3.67$ ( $\alpha=0.86\beta$ )	-	0,58
Sierra Nevada (McClung&Mears, 1991)	90	Tutte le valanghe	$\alpha=0.67\beta+2.5$ ( $\alpha=0.76\beta$ )	-	0,6
Colorado (McClung&Mears, 1991)	130	Tutte le valanghe	$\alpha=0.63\beta+4.68$ ( $\alpha=0.8\beta$ )	-	0,5
Giappone (Fujisawa et. Al., 1993)	66	Tutte le valanghe	$\alpha=0,5\beta+0,35\theta-1.01$	3.8	0.63
	18	Non investono abitazioni L>100m	$\alpha=0.92\beta+490.4y''-1.49$	-	0.98
Italia Val di Rabbi (Castaldini, 1994)	54	Tutte le valanghe	$\alpha=0.87\beta+1,71$ $\alpha=0,94\beta-0,36H\beta y''+4,36\theta\beta y''+$ $+6,89*10^{-5}H\beta-1,77$	1,86 1,45	0,85 0,91
	Austria (Lied et. al., 1995)	80	Tutte le valanghe	$\alpha=0.946\beta-0.83$ $\alpha=0,97\beta-0,6*10^{-6}Hy''\theta-0,032y''-$ $0.07\theta+1.54$	1,5 1,3
Francia (Adjel, 1995)		168	Tutte le valanghe	$\alpha=1,14\beta-4.66$ $\alpha=0.82\beta+2.82$	0,87
Islanda (Johannesson, 1998)	45	Tutte le valanghe	$\alpha=0.85\beta$	2,3	0,71
Pirenei Catalani (Furdada et al., 1998)	216	Tutte le valanghe	$\alpha=0.97\beta-1.2$	1.74	0,87
	64	Profili parabolici	$\alpha=0.86\beta+1.05$	1.98	0.75
Valtellina (Fellini, 1999)	94	Tutte le valanghe	$\alpha=0.943\beta$	1.4	0,92
	17	Valle di Livigno	$\alpha=0.882\beta$	1.93	0.88

**Tabella B.1 - Sintesi dei modelli regressivi (a una o più variabili) proposti da differenti autori per differenti regioni montuose (DS e R indicano rispettivamente deviazione standard e coefficiente di regressione)**

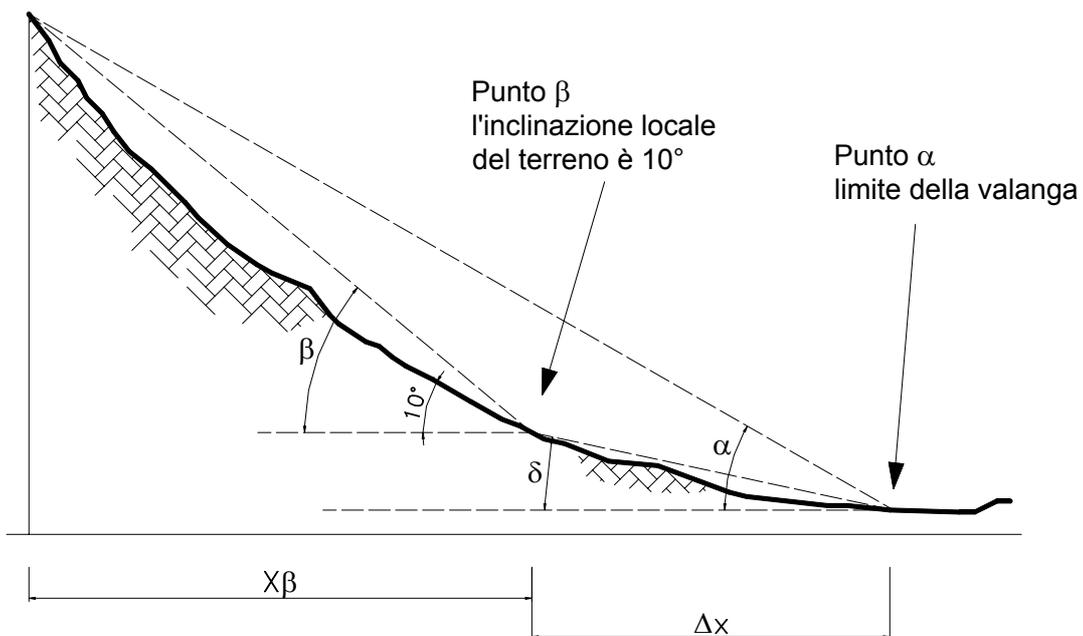
## B.2.2 Modelli inferenziali: il modello del "rapporto di arresto"

Un modello di tipo empirico che usa un approccio alternativo a quello utilizzato nei modelli regressivi (§ B.2.1) è il modello “del rapporto d’arresto”, proposto originariamente da McClung e Lied (1987) e rivisitato successivamente da McClung et al. (1989) e McClung e Mears (1991). Questo

metodo si basa su una modalità di raccolta e misura dei dati valanghivi analoga a quella adottata nel modello “ $\alpha/\beta$ ”; viene però introdotto un nuovo parametro topografico (adimensionale) per descrivere le distanze di arresto estreme, il “rapporto d’arresto” (RR), ed una differente modalità di analisi dei dati rispetto ai modelli regressivi.

Introdotti i parametri  $\delta$ ,  $X_\beta$  e  $\Delta X$ , che esprimono rispettivamente l’inclinazione media della zona d’arresto e gli sviluppi orizzontali della zona attiva e della zona d’arresto del sito (vedi Figura B.3), il rapporto d’arresto è definito nel seguente modo:

$$RR = \frac{\Delta X}{X_\beta} = \frac{\tan \beta - \tan \alpha}{\tan \alpha - \tan \delta} \quad (B.1)$$



**Figura B.3** - Parametri topografici utilizzati per la definizione del rapporto di arresto

L'analisi di campioni di dati relativi a differenti aree geografiche ha mostrato che il rapporto di arresto risulta essere una variabile casuale statisticamente indipendente dalle altre variabili topografiche relative al sito valanghivo (a differenza del parametro  $\alpha$ ), e che la distribuzione asintotica del massimo valore (o distribuzione “di Gumbel”, vedi Appendice C - § C.4)

garantisce in generale un buon adattamento a popolazioni di dati relative a diverse regioni montuose. Definita con  $P$  la probabilità di non superamento, ovvero la probabilità che la variabile casuale (nel nostro caso il rapporto di arresto  $RR$ ) assuma un valore non superiore ad una fissata soglia, la legge di distribuzione di probabilità dei rapporti di arresto risulta esprimibile nel seguente modo:

$$P(RR) = \exp\{-\exp[-a(RR - u)]\} \quad (B.2)$$

dove con  $u$  e  $a$  si sono indicati i parametri rispettivamente di posizione e scala caratteristici della Legge di Gumbel, ottenibili dai valori campionari dei momenti (media  $\overline{RR}$  e deviazione standard  $s[RR]$ ), mediante le relazioni:

$$a = \frac{1,2825}{s[RR]} \quad (B.3)$$

$$u = \overline{RR} - 0,45 \cdot s[RR] \quad (B.4)$$

Con semplici trasformazioni si può ottenere la relazione tra il valore del rapporto di arresto con determinata probabilità di non superamento e la media e deviazione standard del campione:

$$RR(P) = \overline{RR} - s[RR] \cdot \{0,45 + 0,7797 \ln[-\ln(P)]\} \quad (B.5)$$

Fissato un valore di  $P$ , determinato in base al rischio accettabile, risulta immediato ricavare dalla (B.5) il corrispondente valore del rapporto d'arresto; da questo, noto  $X_\beta$  per un fissato sito, è possibile ricavare mediante la (B.1)  $\Delta X(P)$ , ovvero stimare la distanza d'arresto estrema sul sito in esame per fissati valori di probabilità cumulata.

Applicazioni di questo metodo in differenti ambiti geografici hanno evidenziato che i valori assunti dai parametri  $u$  e  $a$  variano al variare della regione montuosa da cui vengono rilevati i dati per lo sviluppo del modello. Esempi di applicazione del modello del rapporto d'arresto ed un'analisi comparativa dei relativi vantaggi/svantaggi rispetto all'approccio di tipo regressivo (§ B.2.1) sono forniti in Jahannesson (1998) e McClung (2001).

### **B.2.3 Modelli inferenziali: analisi statistica "sito-specifica" dei dati storici**

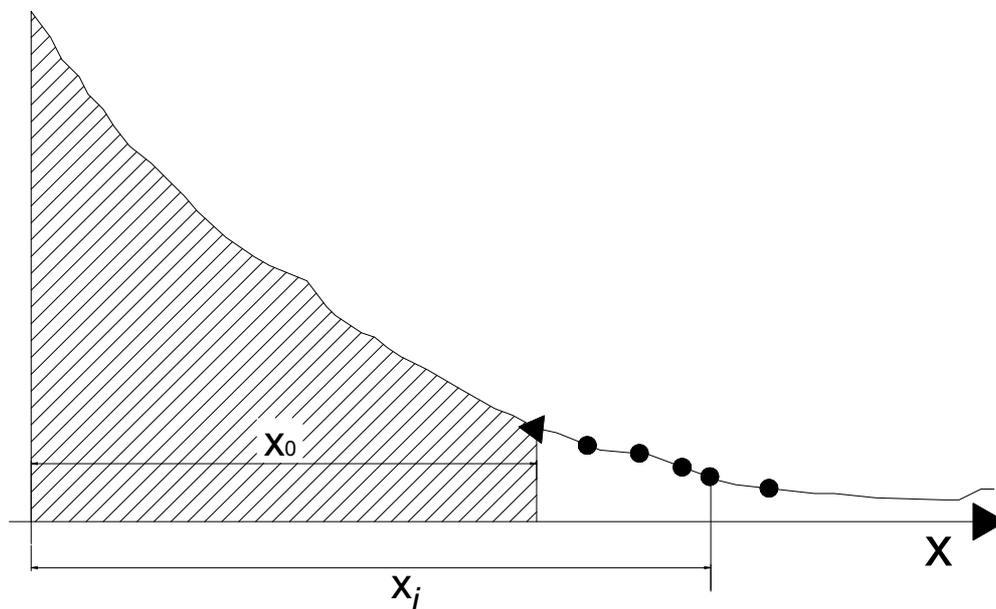
Uno dei principali limiti dei modelli sia di tipo regressivo (§ B.2.1) che del "rapporto di arresto" (§ B.2.2) è che di fatto essi forniscono relazioni predittive che consentono di stimare esclusivamente la massima distanza di arresto raggiungibile da una valanga su di un dato sito (indicativamente quella relativa ad un evento centennale); tali modelli non consentono invece di determinare un vero e proprio legame sito-specifico tra distanza di arresto e tempo di ritorno delle valanghe. A tal proposito è stata proposta recentemente un'analisi di tipo inferenziale dei dati storici di distanza di arresto alla scala del singolo sito in cui non ci si limita più al solo evento massimale, ma si considera un campione di eventi storici registrati sistematicamente sul sito in un certo intervallo di tempo (Barbolini e Cappabianca, 2002). Poiché i dati valanghivi non sono dei massimi annuali (è possibile infatti che in alcuni anni non si verifichino valanghe, così come che se ne verifichino più di una) al fine di trovare un legame sito-specifico tra distanza di arresto e tempi di ritorno non è possibile adottare un'analisi statistica basata sui massimi annui (ovvero di tipo AM, vedi Appendice C, § C.3) ma è necessario fare ricorso all'analisi statistica delle serie di durata parziale (ovvero al metodo delle eccedenze o metodo di tipo PD, vedi Appendice C - § C.5). Nel seguito viene brevemente descritta la metodologia di analisi; un esempio di applicazione della stessa ad un caso di studio reale è presentato in Appendice G, § G.4.

Si consideri un sito valangivo per il quale siano stati raccolti un certo numero di dati relativi a distanze di arresto di eventi del passato (tali informazioni possono essere desunte da varie fonti, quali ad esempio Report CLPV, Modelli 7 Aineva, schede forestali, archivi di varia natura, testimonianze, documentazione fotografica, ecc.). Le distanze di arresto siano espresse attraverso un parametro che sia funzione monotona della distanza percorsa dalla valanga, come ad esempio la proiezione orizzontale della distanza complessiva percorsa dalla valanga a partire dal punto più alto di distacco (indicata con  $x_i$  in Figura B.4). Fissato un valore di soglia per le distanze di arresto (quale ad esempio la distanza che corrisponde all'entrata nella zona di conoide o più in generale all'entrata nella zona di arresto, indicata con  $x_0$  in Figura B.4), si consideri il numero  $m$  di eccedenze, ovvero di eventi valanghivi che si arrestano a valle di tale soglia. Indicato con  $M$  il numero degli anni cui le

osservazioni si riferiscono, il valore medio del numero di superamenti per anno (tasso di eccedenza) risulta:

$$\lambda = \frac{m}{M} \quad (\text{B.6})$$

E' importante precisare che la condizione necessaria all'applicazione del metodo è che la serie di eccedenze così definita risulti registrata con "sistematicità", ovvero che si abbia la garanzia che nell'intervallo di tempo considerato ( $M$  anni) tutti gli eventi valanghivi arrestatisi a valle della soglia fissata siano stati registrati.



**Figura B.4 -** Schema per l'applicazione del metodo delle eccedenze ai dati di distanza di arresto;  $x_j$  indica la distanza percorsa dalla valanga a partire dal punto più alto di distacco.

La distanza di arresto di un evento valanghivo che superi la soglia fissata è una variabile casuale, con funzione di probabilità cumulata  $P_e(x)$ . La distanza di arresto  $x$  verrà superata, in media, una volta ogni  $t$  eventi, avendo posto:

$$t(x) = \frac{1}{1 - P_e(x)} \quad (\text{B.7})$$

Poiché si contano mediamente  $\lambda$  superamenti per anno, con buona approssimazione il valore  $x$  risulta superato, sempre in media, una volta ogni  $T$  anni, con:

$$T(x) = \frac{t(x)}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{1 - P_e(x)} \quad (\text{B.8})$$

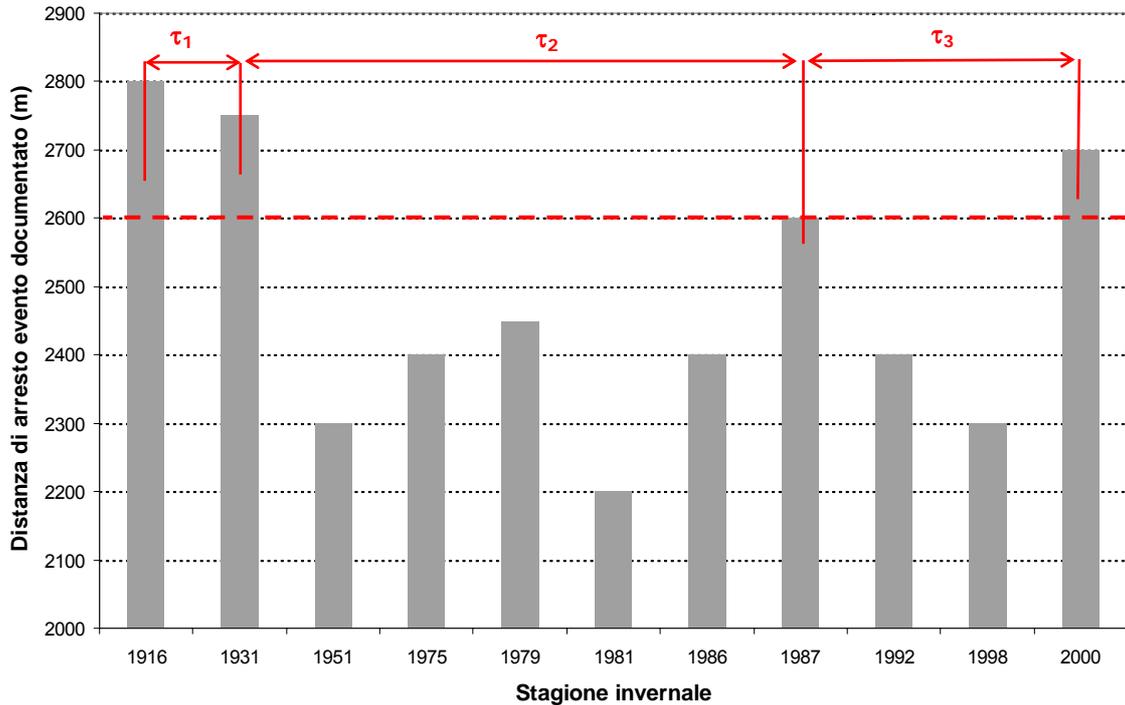
dove  $t$  è il tempo di ritorno del valore  $x$  della distanza di arresto espresso in numero di eccedenze, mentre  $T$  è il tempo di ritorno espresso in anni.

La relazione (B.8) consente, almeno in linea di principio, di associare per un determinato sito valanghivo ad ogni valore di distanza di arresto un determinato tempo di ritorno (e viceversa), e richiede:

- che sia stimato per il sito in esame il numero di eccedenze medio annuo ( $\lambda$ );
- che sia individuata la legge di distribuzione di probabilità  $P_e(x)$  secondo la quale sono distribuite le distanze di arresto degli eventi valanghivi che superano la soglia prefissata (eccedenze). A tal proposito sarebbe opportuno adottare una legge limitata inferiormente (molto spesso si usa la legge esponenziale, Appendice C - § C.4), anche se può essere utilizzata una qualunque legge che si adatti bene alle osservazioni, soprattutto nel campo delle maggiori distanze di arresto, che sono quelle di maggior interesse.

La stima di  $\lambda$  e di  $P_e(x)$  per essere effettuata in maniera sufficientemente accurata su di un determinato sito richiede un campione di dati significativo, ovvero la conoscenza di un buon numero di eventi storici registrati in maniera sistematica.

Rappresentando i dati di distanza di arresto ( $x_i$  in Figura B.4) mediante un diagramma a istogrammi (vedi Figura B.5) è possibile effettuare una caratterizzazione di prima approssimazione della periodicità con cui, sul sito in esame, si può manifestare un evento di determinata "magnitudo", intesa come distanza di arresto raggiunta della valanga.



**Figura B.5 - Schema per il calcolo del tempo di ritorno di eventi di data "magnitudo"**

Il tempo di ritorno di un evento di data magnitudo ( $x^*$ , in Figura B.5 pari a 2600 metri) è per definizione l'intervallo di tempo medio in cui tale accadimento si ripete, e può essere pertanto semplicemente calcolato come:

$$T(x^*) = \frac{\sum \tau_i}{n} \tag{B.9}$$

dove  $\tau_i$  indica l'estensione temporale dell'intervallo di tempo che intercorre tra due accadimenti successivi di uguale magnitudo (nel caso di Figura B.5  $\tau_1=15$ anni,  $\tau_2=56$ anni e  $\tau_3=13$ anni), mentre  $n$  indica il numero di intervalli disponibili (pari a tre nel caso di Figura B.5). Chiaramente a differenza della relazione (B.8), che consente di estrapolare la stima delle periodicità anche in zone non documentate storicamente, la relazione (B.9) consente di stimare la periodicità solo per eventi conosciuti.

### B.3 MODELLI DI DINAMICA

I modelli fisico-matematici del fenomeno valanghivo si distinguono in base alla tipologia di valanga che si desidera modellare (vedi Figura B.1). Per lo studio delle *valanghe di neve densa*, maggiormente rilevanti ai fini della mappatura del pericolo in quanto più frequenti e dannose rispetto a quelle di neve polverosa (almeno sull'arco alpino italiano), i modelli di dinamica si suddividono essenzialmente in due classi, basate su differenti approcci modellistici (Figura B.1): i modelli "a centro di massa" (§ B.3.1) e i modelli di tipo "continuo" (§ B.3.2).

Per lo studio delle *valanghe polverose*, classe di scorrimenti nevosi di minore interesse pratico, si utilizzano approcci ed equazioni differenti rispetto a quelli adottati per le valanghe dense. In letteratura si distinguono i cosiddetti "density current models", modelli monofase analoghi a quelli utilizzati per descrivere le correnti di torbidità sottomarine e i cosiddetti "binary mixture models", modelli bifase in cui la dinamica delle fase solida e quella della parte aeriforme vengono descritte separatamente mediante le rispettive equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto; un approccio intermedio tra i due è quello di utilizzare bilanci di massa separati per le due fasi (solida e areiforme), ma un solo bilancio della quantità di moto per il miscuglio (il modello AVAL1D - Christen *et al.*, 2002 - recentemente commercializzato dall'Istituto Svizzero per lo Studio della Neve e delle Valanghe di Davos (CH) contiene un modulo per il calcolo delle valanghe polverose basato su quest'ultimo approccio modellistico).

Per esauritive informazioni sulla modellazione delle valanghe polverose si rimanda a Hopfinger (1983), Tesche (1986), Brørs (1991), Hermann e Hutter (1991), Hutter (1996) e Harbitz (1998).

Modelli per la descrizione delle *valanghe miste* (generalmente chiamati "coupled models") sono stati proposti solo in tempi molto recenti (Naaïm, 1999; Bartelt *et al.*, 2000). Tali modelli sono in fase di sviluppo e non risultano allo stato attuale sufficientemente affidabili per un utilizzo in campo ingegneristico.

### B.3.1 Modelli "a centro di massa"

Questo tipo di modellazione ha rappresentato cronologicamente il primo tentativo di effettuare una descrizione in termini matematici della dinamica di una valanga. Alla base dei modelli a centro di massa (o di tipo puntuale) vi è l'ipotesi di poter analizzare la dinamica di una valanga attraverso lo studio del moto del suo baricentro lungo una traiettoria predefinita, rappresentata dal profilo longitudinale del pendio. L'unico grado di libertà è pertanto rappresentato dall'ascissa curvilinea che definisce in ogni istante la posizione del baricentro lungo una traiettoria nota a priori.

L'equazione a cui fanno riferimento questi modelli è la legge di conservazione della quantità di moto:

$$F_{ext}(t) = \frac{d}{dt}[M(t)V(t)] = V(t)\frac{dM(t)}{dt} + M(t)\frac{dV(t)}{dt} \quad (B.10)$$

dove:  $M(t)$  indica la massa complessiva della valanga ad ogni istante,  
 $V(t)$  è la velocità istantanea del baricentro della massa nevosa,  
 $F_{ext}(t)$  è la risultante delle forze esterne agenti sulla valanga.

Nell'ipotesi di massa della valanga costante ( $M(t)=M=cost$ ), la (B.10) si riduce alla legge fondamentale della dinamica:

$$F_{ext}(t) = M \cdot a(t) \quad (B.11)$$

dove con  $a(t)$  si è indicata l'accelerazione istantanea del baricentro.

Tra i modelli "a centro di massa" si distinguono il modello PCM (Perla et al., 1980) ed il modello di "Voellmy" (Voellmy, 1955), quest'ultimo utilizzato per molti anni come base tecnica per la perimetrazione delle aree a rischio di valanga in Svizzera (Salm et al., 1990), ed ampiamente adottato per i calcoli tecnici delle valanghe anche in Italia. Tali modelli, sinteticamente descritti nei due paragrafi successivi, risultano di semplice utilizzo e possono essere facilmente implementati in fogli di calcolo elettronici (quali ad esempio Excel); ciò da ragione del loro ampio utilizzo in ambito ingegneristico.

### B.3.1.1 Il modello PCM

Il modello PCM (Perla *et al.*, 1980) può essere utilizzato per calcolare la velocità della valanga lungo il profilo longitudinale del pendio e la distanza di arresto. Il modello si basa sull'equazione di conservazione della quantità di moto (B.10), in cui però le derivate temporali vengono trasformate in derivate spaziali, mediante la trasformazione:

$$\frac{d}{dt} = \frac{d}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = V(t) \cdot \frac{d}{ds} \quad (\text{B.12})$$

dove con  $s$  si è indicata l'ascissa curvilinea (ovvero la distanza misurata lungo il pendio). Utilizzando la trasformazione (B.12) ed esprimendo le forze esterne agenti sulla valanga come differenza tra la componente della forza peso nella direzione del moto e le resistenze al moto ( $R$ ):

$$F_{ext} = Mg \sin \theta - R = Mg \sin \theta - [Mg \cos \theta \cdot \mu + k \cdot V^2] \quad (\text{B.13})$$

(dove con  $\theta$  si è indicata la pendenza locale del pendio, con  $\mu$  il coefficiente di attrito Coulombiano e con  $k$  il coefficiente di attrito turbolento), la (B.10) può essere scritta come:

$$\frac{1}{2} \frac{dV^2}{ds} = g(\sin \theta - \mu \cos \theta) - \left(\frac{D}{M}\right) V^2 \quad (\text{B.14})$$

con  $D = (k + dM/ds)$ .  $M/D$  è un parametro caratteristico del modello definito dagli autori "mass to drag ratio". L'altezza e l'estensione laterale del flusso non vengono calcolate dal modello ma devono essere stimate sulla base delle osservazioni sul campo o dei dati storici disponibili.

Nell'applicazione del modello il profilo longitudinale del pendio deve essere suddiviso in segmenti rettilinei, in numero tale da poter considerare  $\theta$  approssimativamente costante all'interno di ogni tratto. In questo modo l'intero profilo risulta generalmente suddiviso in 5-20 segmenti, in dipendenza della lunghezza e della complessità del sito. Definita con  $V_i^A$  la velocità all'inizio del segmento  $i$ -esimo (di lunghezza  $L_i$ , vedi Figura B.6), la velocità  $V_i^B$  alla fine del medesimo segmento è ottenibile mediante la relazione:

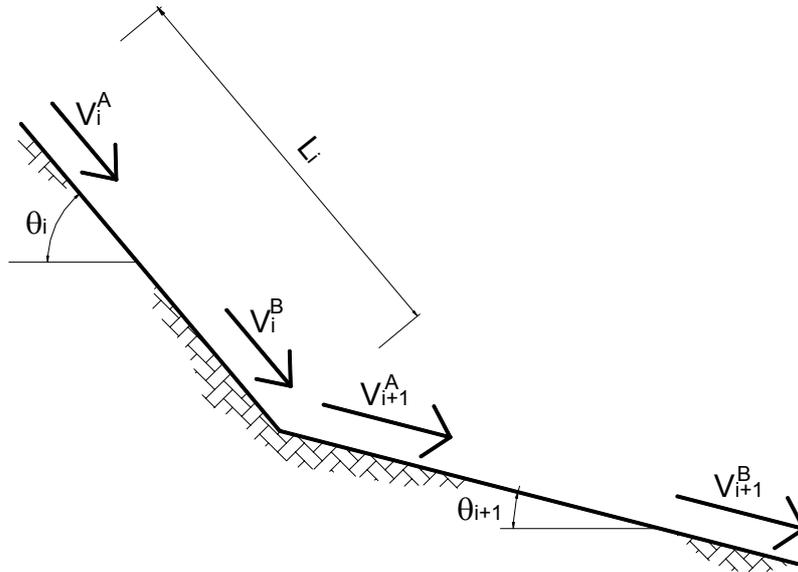
$$V_i^B = \left[ \alpha_i \left( \frac{M}{D} \right)_i (1 - \exp \beta_i) + (V_i^A) \exp \beta_i \right]^{0.5} \quad (\text{B.15})$$

dove:  $\alpha_i = g(\sin \theta_i - \mu_i \cos \theta_i)$

$$\beta_i = -\frac{2L_i}{(M/D)_i}$$

La velocità  $V_i^B$  alla fine di ogni segmento è utilizzata per calcolare velocità iniziale  $V_{i+1}^A$  del segmento successivo.  $V_i^B$  non può sempre essere sostituita direttamente a  $V_{i+1}^A$  poiché alcune volte (ovvero nel caso in cui  $\theta_i > \theta_{i+1}$ ) è necessario introdurre la seguente correzione:

$$V_{i+1}^A = V_i^B \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) \quad (\text{B.16})$$



**Figura B.6 -** *Variazione di pendenza e velocità tra due segmenti di calcolo successivi*

Il calcolo è ripetuto sino a quando il centro di massa si arresta prima della fine del segmento *i-esimo* (cioè  $V_i^B$  calcolata con la B.15 risulta negativa). In tal caso la distanza d'arresto, calcolata dall'inizio del segmento *i-esimo*, è pari a:

$$S = \left[ \frac{(M/D)_i}{2} \right] \ln \left[ 1 - \frac{(V_i^A)^2}{\alpha_i (M/D)_i} \right] \quad (\text{B.17})$$

Gli autori del modello (Perla *et al.*, 1980) propongono i seguenti campi di variabilità per i valori dei parametri resistivi caratteristici del modello:

$$\begin{aligned} 0,1 &\leq \mu \leq 0,5 \\ 10^2 &\leq M/D \leq 10^4 \end{aligned} \quad (\text{B.18})$$

L'applicazione del modello deve comunque essere preceduta da una fase di taratura dello stesso sul sito in analisi. Esempi di taratura del modello in differenti regioni montane sono forniti da McClung e Schaerer (1983), Bakkehøi *et al.* (1981) e Jonasson *et al.* (1999).

### B.3.1.2 Il modello di Voellmy

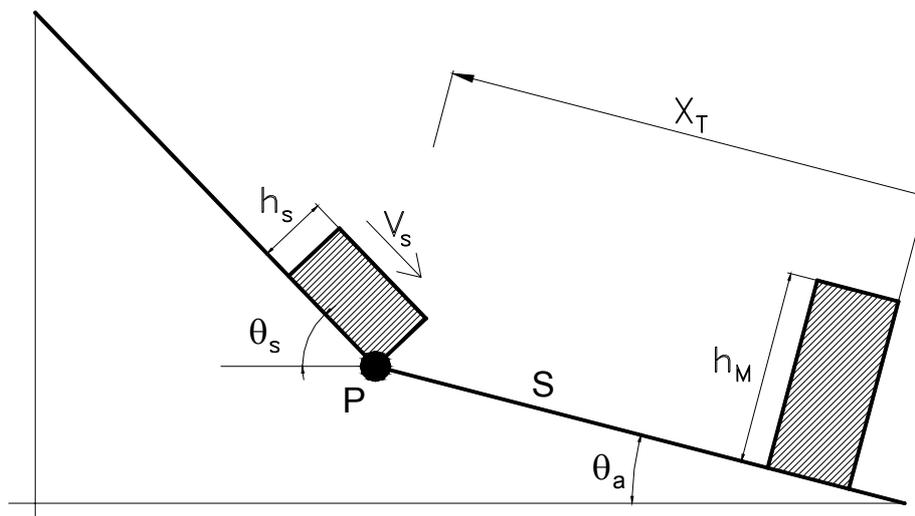
L'ipotesi alla base del modello di Voellmy è quella di ritenere che il moto di una valanga nella zona di scorrimento abbia caratteristiche analoghe a quelle delle correnti idrauliche stazionarie a pelo libero. La valanga è quindi assimilata, limitatamente alla zona di scorrimento, ad un fluido incompressibile, infinitamente esteso, in condizioni di moto stazionario. Nel modello di Voellmy la geometria reale del pendio viene fortemente semplificata, attraverso due tratti a pendenza costante rappresentativi rispettivamente della zona di scorrimento e della zona di arresto (Figura B.7).

Alla suddivisione del pendio in due tratti distinti corrisponde anche una descrizione "ibrida" del fenomeno. In particolare mentre nella parte superiore del percorso (zona di scorrimento) si utilizza un approccio di tipo fluidodinamico al fine di valutare la velocità massima raggiunta dalla valanga, nella parte inferiore (zona di arresto) la determinazione della distanza necessaria alla valanga per arrestarsi è ottenuta ritenendo il suo moto assimilabile a quello di un corpo rigido.

Nella zona di scorrimento il modello ipotizza che la valanga, dopo un “breve” transitorio accelerativo iniziale, raggiunga una condizione di moto a regime caratterizzata da una velocità limite (si deve notare che tra le varie ipotesi del modello c'è anche quella di ritenere i transitori brevi, e quindi di ammettere che la valanga sia in grado di pervenire ad una condizione di moto a regime dopo avere percorso ridotte distanze). In queste particolari condizioni di moto a cui conducono le ipotesi del modello, il bilancio di quantità di moto si traduce in una condizione di equilibrio tra le forze in gioco (equazione B.11 con  $a(t)=0$ ) e, con riferimento ad una colonnina di fluido di area unitaria, può essere scritto come:

$$f_D = \rho g h_s \sin \theta_s = f_R \quad (\text{B.19})$$

dove con  $f_D$  si è indicata la componente del peso della colonnina in direzione parallela al pendio ( $h_s$  è l'altezza di scorrimento della valanga,  $\rho$  la densità della valanga e  $\theta_s$  la pendenza media della zona di scorrimento) e con  $f_R$  l'insieme degli effetti resistivi al fondo. Per la descrizione di questi ultimi Voellmy adottò la *formula di Chezy* corretta con l'aggiunta di una componente resistiva di tipo coulombiano (indipendente quindi dalla velocità ma legata unicamente alla componente normale del carico esterno).



**Figura B.7** - Altezze, velocità e pendenze caratteristiche del modello di Voellmy (il punto P, che divide zona di scorrimento e zona di arresto è usualmente definito dalla relazione:  $\text{tg} \theta(P) = \mu$ )

La forza complessiva al fondo per unità di area fu quindi espressa tramite la seguente relazione:

$$f_R = \frac{\rho g}{\xi} V_s^2 + \mu \rho g h_s \cos \theta_s \quad (\text{B.20})$$

valida per il moto di versante, in cui il coefficiente di Chezy è sostituito dal coefficiente di attrito turbolento  $\xi$  e  $\mu$  indica il coefficiente di attrito Coulombiano (nel caso di moto incanalato nella B.20 al posto dell'altezza dello strato nevoso in scorrimento è introdotto il raggio idraulico). Dalle relazioni (B.19) e (B.20) si ricava l'espressione della velocità massima raggiunta a regime dalla valanga nella zona di scorrimento:

$$V_s = \left\{ \xi h_s (\sin \theta_s - \mu \cos \theta_s) \right\}^{0,5} \quad (\text{B.21})$$

Nel lavoro originale di Voellmy (1955) si supponeva che lo spessore della neve in movimento,  $h_s$ , fosse approssimativamente uguale ad  $h_0$ , spessore del lastrone al distacco (entrambe le altezze sono misurate perpendicolarmente al pendio). Tuttavia molteplici osservazioni sperimentali suggeriscono che le valanghe a lastroni teneri di neve asciutta tendono a disperdere il materiale verso l'alto durante il movimento. In Tabella B.2 i valori tipici del rapporto  $h_s/h_0$  sono messi in relazione al tipo di valanga.

Tipo di valanga	$h_s/h_0$
Lastrone duro	1÷2
Lastrone soffice	1,5÷5
Lastrone umido	1÷2

**Tabella B.2** - Valori tipici del rapporto  $h_s/h_0$  proposti da Mears (1981)

L'analisi del fenomeno dell'arresto è effettuata con riferimento al moto decelerato di un corpo rigido su un tratto a pendenza costante ( $\text{tg} \theta_a < \mu$ ), con il quale a priori si è descritta in modo semplificato la parte del pendio in cui si ritiene che la valanga rallenti fino ad arrestarsi (Figura B.7). La valutazione della

distanza di arresto è fatta mediante un bilancio energetico, in cui il lavoro delle forze esterne resistive (attrito turbolento, attrito coulombiano) dovrà uguagliare la diminuzione di energia cinetica e potenziale. L'espressione proposta da Voellmy per il calcolo della distanza di arresto è la seguente:

$$X_R = \frac{V_s^2}{\left[ 2g(\mu \cos \theta_a - \sin \theta_a) + \frac{V_s^2 g}{\xi h_m} \right]} \quad (\text{B.22})$$

in cui l'altezza caratteristica del tratto di scorrimento ( $h_s$ ) è stata sostituita con il valore che rappresenta l'altezza media dei depositi ( $h_m$ ).

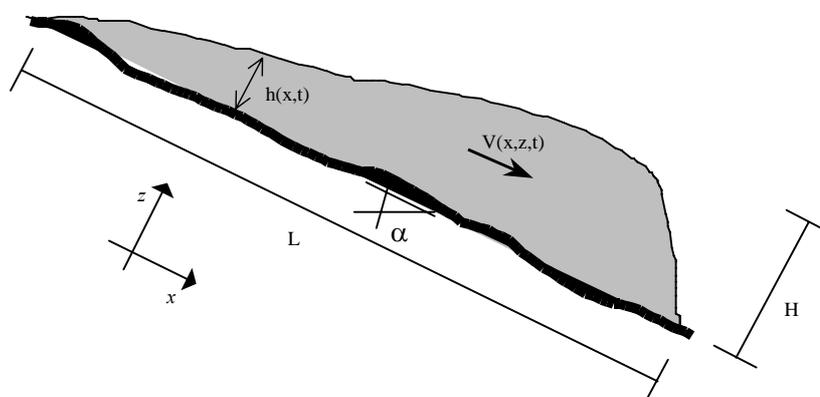
I valori tipici dei parametri di resistenza caratteristici del modello di Voellmy ( $\mu$  e  $\xi$ ) sono stati discussi da differenti autori (ad esempio Schaerer, 1975; Buser e Fruitiger, 1980; Martinelli *et al.*, 1980). La procedura da seguire per l'applicazione del modello di Voellmy al calcolo delle valanghe è descritta in dettaglio nelle *Direttive Svizzere* (Salm *et al.*, 1990); in tale documento sono forniti anche i valori di riferimento da utilizzare per i coefficienti di resistenza in dipendenza della morfologia del sito e delle dimensioni dell'evento, ottenuti sulla base di un'estensiva taratura del modello.

Le idee originarie di Voellmy sono state recentemente implementate in un modello continuo di tipo idraulico (AVAL1D, Christen *et al.*, 2002) che, in Svizzera, sta progressivamente sostituendo il modello di Voellmy nei calcoli tecnici delle valanghe.

### B.3.2 Modelli di tipo continuo

I modelli di tipo "continuo" si basano sull'ipotesi di considerare la valanga un mezzo continuo monofase (Figura B.8), e ne descrivono il moto mediante le equazioni di bilancio della dinamica dei continui deformabili (bilanci di massa e quantità di moto). Essi quindi consentono, almeno in linea di principio, di valutare l'evoluzione spazio-temporale completa del fenomeno, cioè l'andamento punto per punto ed istante per istante di tutte le grandezze fisiche più significative (ad esempio altezze di scorrimento,  $h$  in Figura B.8, e velocità,

V in Figura B.8), fornendo pertanto una descrizione più realistica e completa della dinamica della valanga rispetto ai modelli a centro di massa.



**Figura B.8 -** Sezione schematica di una valanga densa.  $H$  e  $L$  sono due lunghezze caratteristiche del fenomeno (per un evento alla scala di prototipo tipicamente il rapporto  $H/L$  è dell'ordine di  $10^{-2}$ ).  $x$  e  $z$  sono le due coordinate cartesiane che individuano univocamente la posizione all'interno del corpo dell'ammasso nevoso,  $t$  indica il tempo.

L'impostazione completa del problema da un punto di vista matematico richiede la definizione parallela del sistema di equazioni a cui fare riferimento e delle leggi costitutive da utilizzare per la descrizione del comportamento meccanico dell'ammasso nevoso in movimento. Con riferimento a questi due aspetti, le modellizzazioni di tipo continuo proposte in letteratura possono essere così classificate (Figura B.1):

- *modelli basati sulle equazioni di Navier-Stokes*, che a loro volta si possono suddividere in modelli newtoniani (Lang *et al.*, 1979a-b; Dent *et al.*, 1980; Hunt, 1995) e modelli biviscosi (Dent *et al.*, 1983) a seconda del modello reologico adottato;
- *modelli di tipo idraulico* (anche detti di *tipo integrale*), basati sulle equazioni di St. Venant o delle "acque basse" (nel caso rispettivamente mono- e bi-dimensionale), anch'essi a loro volta suddivisibili in base alla formulazione reologica utilizzata. Con riferimento a quest'ultimo aspetto in letteratura sono state proposte leggi di resistenza di tipo

Coulombiano (Grigoryan, 1979; Savage e Hutter, 1989; 1991; Sampl, 1993), formulazioni in cui accanto al termine di attrito coulombiano viene introdotto un termine di resistenza dipendente dal quadrato della velocità (Naaim e Ancey, 1992; Natale *et al.*; 1994; Barbolini, 1998; Barbolini *et al.*, 2000; Bertelt *et al.*, 1997a; Eglit, 1998) e formulazioni resistive più complesse facenti riferimento a modelli reologici di tipo visco-plastico (Norem *et al.*, 1987; 1989; Bertelt *et al.*, 1997b).

Per una rassegna esaustiva e dettagliata delle modellazioni di tipo continuo proposte in letteratura si rimanda a Barbolini (1996) e Harbitz (1998). A titolo esemplificativo in Appendice H, § H.6 è presentata l'applicazione di un modello continuo ad un caso di studio reale.

## **APPENDICE C**

### **Elaborazioni statistiche dei dati nivometeorologici**

## C.1 Introduzione

L'elaborazione statistica di un campione di misure di una variabile nivologica (altezza della neve al suolo, nevicata su uno o più giorni consecutivi, velocità media giornaliera del vento, ecc.) ha lo scopo di definire, secondo una procedura efficiente e robusta, la forma della *funzione di probabilità* (o *funzione di ripartizione*, nel seguito indicata con la dicitura FDP) della variabile medesima:

$$P = P(x) \quad (C.1)$$

ossia il legame tra la variabile casuale ( $x$ ) ed la probabilità di non superamento ( $P$ ). Poiché il tempo di ritorno ( $T$ ) di un qualunque valore  $x$  della variabile è legato alla corrispondente probabilità di non superamento dalla relazione:

$$T(x) = \frac{1}{1 - P(x)} \quad (C.2)$$

la determinazione della FDP (relazione C.1) equivale alla definizione del legame tra la variabile  $x$  ed il tempo di ritorno ( $T$ ):

$$x_T = X(T) \quad (C.3)$$

Al solito il legame tra la variabile 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*, in sigla *AM* (§ C.3). In maniera alternativa il legame (C.3) può dedursi elaborando le misure della variabile che superano un prefissato valore di soglia (eccedenze). L'elaborazione delle eccedenze, comunemente indicata come elaborazione delle *serie di durata parziale* (in sigla *PD*, § C.5) è di fatto meno utilizzata nella pratica idrologica, ma diviene utile nel caso di elaborazioni statistiche di campioni di distanze di arresto (come discusso in Appendice B - § B.2.3).

In passato la stima della FDP di una variabile idrologica (o nivologica) era ottenuta esclusivamente da 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*. Recentemente si è diffuso il ricorso a procedure di *stima regionale* (§ C.6) che individuano la legge di distribuzione della variabile di interesse a partire dai campioni di dati rilevati in tutte le stazioni di misura della regione ove è posto il sito di progetto, una volta che la regione sia riconosciuta come idrologicamente (o nivologicamente) "omogenea".

Per approfondimenti in merito ai contenuti dei paragrafi che seguono si rimanda a Kite (1988), Cunnane (1989) e Maione e Moisello (1993).

## C.2 DEFINIZIONI

Dai valori  $X_1, \dots, X_N$  (tra loro indipendenti e identicamente distribuiti) di un campione di dimensione  $N$  sufficientemente grande si possono calcolare i momenti, le frequenze cumulate dei valori del campione ed i momenti pesati in probabilità.

### C.2.1 Momenti

- *Media*, è il valore attorno al quale tende a distribuirsi la variabile:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N} \quad (\text{C.4})$$

- *Scarto quadratico medio* (s.q.m.), è l'indice della dispersione della variabile intorno al valore medio:

$$s = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (\text{C.5})$$

con  $C_v = s/\bar{X}$  definito *coefficiente di variazione* (quest'ultimo fornisce una misura del grado di dispersione della popolazione della variabile casuale considerata che si presta bene, in quanto adimensionale, a istituire confronti tra variabili casuali diverse).

- *Coefficiente di asimmetria*, misura il grado di asimmetria del grafico che rappresenta la *funzione di densità di probabilità* di una variabile casuale, ed è positivo per FDP con coda allungata verso destra, negativo nel caso contrario:

$$G = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^3}{s^3} \quad (\text{C.6})$$

I momenti empirici così calcolati dal campione ( $\bar{X}$ ,  $s$  e  $G$ ) sono anch'essi variabili casuali con momenti legati ai corrispondenti momenti ( $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\gamma$ ) della popolazione originaria dalla quale si suppone che il campione sia stato estratto. Le espressioni dei momenti di  $\bar{X}$  e  $s$ :

$$E(\bar{X}) = \mu \quad \text{var}(\bar{X}) = \frac{\sigma^2}{N} \quad (\text{C.7})$$

$$E(s^2) = \sigma^2 \quad \text{var}(s^2) = \frac{2(N-1)}{N^2} \sigma^4 \quad (\text{C.8})$$

mostrano che i momenti campionari calcolati con le (C.4) e (C.5) sono stime *indistorte* dei momenti originari e che la stima è tanto più *efficiente* quanto più grande è la dimensione del campione ( $N$ ) e quanto più basso è l'ordine del parametro stimato. Diversamente si trova che la stima (C.6) del coefficiente di asimmetria originario è distorta; *Hazen*, tra gli altri, ha proposto una espressione per correggere tale distorsione:

$$g = G(1 + 8,5/N) \quad (\text{C.9})$$

E' molto importante ricordare che  $C_v$  e  $G$  sono limitati dalla dimensione del campione:

$$0 < C_v < (N-1)^{1/2} \quad |G| = \frac{(N-2)}{(N-1)^{1/2}} \quad (\text{C.10})$$

Quindi  $G$  calcolato con la (C.6) sottostima fortemente il valore originario  $\gamma$ , specialmente se  $\gamma$  è elevato e  $N$  è piccolo.

### C.2.2 Frequenze cumulate

Disposti i valori del campione in ordine crescente, se ne possono calcolare le frequenze di non superamento ( $F_i$ ) ove  $i$ , con  $i=1, \dots, N$  è il numero d'ordine di  $X_i$ ,  $i$ -esimo valore dal più piccolo. Tra le espressioni di frequenza proposte da diversi autori quella di *Weibull*, ancora oggi largamente in uso:

$$F_i = \frac{i}{N+1} \quad (\text{C.11})$$

è distorta, ossia fornisce valori di frequenza cumulata che non tendono asintoticamente al valore corretto della probabilità  $P_i=P(X_i)$ . Nel caso in cui la FDP originaria sia di tipo Gumbel o Esponenziale (vedi § C.4) è preferibile utilizzare la formula di *Grigorten*, che risulta indistorta:

$$F_i = \frac{i-0,44}{N+0,12} \quad (\text{C.12})$$

Per tutti i dati distribuiti con moderata asimmetria, indipendentemente dal tipo della FDP originaria, si consiglia l'utilizzo dell'espressione di *Cunnane*:

$$F_i = \frac{i-0,4}{N+0,2} \quad (\text{C.13})$$

Le coordinate  $(X_i, F_i)$  dei vertici della poligonale delle frequenze cumulate sono le *plotting position* dei valori del campione.

### C.2.3 Momenti pesati in probabilità

Verso il 1980 è stato introdotto per le applicazioni statistiche in idrologia l'uso dei momenti pesati in probabilità, il cui calcolo è relativamente poco sensibile alla presenza nel campione di valori eccezionalmente grandi (o piccoli), usualmente indicati con il nome di *outlier*. Pertanto la determinazione dei momenti pesati in probabilità è ritenuta meno aleatoria di quella dei momenti ordinari (§ C.2.1). Per il calcolo del momento (di ordine  $j$ ) pesato in probabilità ci limitiamo a proporre la formula approssimata:

$$m_{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i)^j X_i \quad \text{con} \quad F_i = \frac{i-0,35}{N} \quad (\text{C.14})$$

dove, come già detto, i valori di  $X_i$  sono disposti in ordine crescente (si noti che  $m_{(0)} = \bar{X}$ ).

## C.3 DETERMINAZIONE DELLA FDP CON IL METODO AM

La funzione di probabilità di una variabile casuale è completamente definita quando, scelta la legge teorica (§ C.3.1), ne siano stati determinati i parametri (§ C.3.2). In generale per campioni di piccole dimensione,  $N < 50$ , non risulta opportuno utilizzare FDP con più di due parametri; per tale ragione nelle procedure di stima puntuale è consigliato l'impiego di leggi di ripartizione a due parametri (§ C.4). Viceversa, quando nell'analisi delle frequenze delle serie di massimi annui si vogliono utilizzare leggi con 3 o più parametri è consigliata la procedura di stima regionale (§ C.6).

### C.3.1 Carte probabilistiche e test di adattamento

Usualmente la scelta del modello statistico adeguato a determinare la legge  $x_T = X(T)$  è operata preferendo la FDP che meglio si adatta alla distribuzione dei dati campione. Il confronto grafico su *carta probabilistica* (c.p.) tra la curva delle frequenze cumulate dei dati (§ C.2.2) e la curva delle

probabilità calcolate con leggi teoriche da un'indicazione molto efficace della bontà dell'adattamento globale, segnalando altresì le zone di discrepanza. Ciascuna funzione di probabilità teorica viene rappresentata sulla propria carta probabilistica con una retta; la c.p., normale e la c.p. di Gumbel rettificano, rispettivamente, la curve (C.19) e (C.27). Sulle ascisse della carta probabilistica è riportata la grandezza casuale (in scala lineare per c.p. normale o di Gumbel, in scala logaritmica per c.p. lognormale), sulle ordinate è riportata la variabile ridotta (vedi § C.4); la grandezza della probabilità che a questa corrisponde risulta quindi in scala deformata.

I *test di adattamento* controllano se la distribuzione di frequenza dei dati devia in maniera statisticamente significativa dalle previsioni del modello teorico.

Test di Pearson. Il test proposto da Pearson misura lo scostamento tra l'istogramma empirico e quello teorico della variabile casuale. Suddiviso il campo della variabile in un numero finito  $K$  di classi, in ciascuna delle quali la variabile abbia, in base alla legge teorica in esame, probabilità  $p_i (i=1, \dots, K)$  di ricadere, si determina per ciascun intervallo il numero  $N_i$  di dati del campione che vi ricadono. La statistica:

$$D_1 = \sum_{i=1}^K \frac{(N_i - Np_i)^2}{Np_i} \quad (\text{C.15})$$

segue approssimativamente la distribuzione del  $\chi^2$  con  $f=K-r-1$  gradi di libertà, essendo  $r$  il numero dei parametri della legge stimati dal campione. Determinato il valore critico  $\chi_a^2$ , ad  $f$  gradi di libertà, che corrisponde al prefissato livello di significatività del test (che usualmente è  $\alpha = 0,10$  o  $\alpha = 0,05$ ), si accetta l'ipotesi che il campione sia tratto da una popolazione avente la FDP esaminata se  $D_1 < \chi_a^2$ . Nell'esecuzione del test si usa l'accortezza di operare una ripartizione tale che sia  $p_i=1/K$ , uguale per tutte le classi, e che  $N/K \geq 5$ .

Test di Kolmogorov-Smirnov. Il test considera il massimo scostamento tra la funzione di ripartizione empirica e quella teorica. Il test, che vale a rigore solo se i parametri della legge sono indipendenti dal campione, è accettato se risulta  $D_2 < C$ . La statistica  $D_2$ , la cui distribuzione è indipendente da quella della variabile  $x$ , è definita dalla relazione:

$$D_2 = \max \left| \frac{i}{N} - P(X_i) \right| \quad (\text{C.16})$$

mentre il termine di confronto è  $C = 1,22/\sqrt{N}$  al livello di significatività  $\alpha = 0,10$ , mentre è  $C = 1,36/\sqrt{N}$  al livello di significatività  $\alpha = 0,05$ . Queste ultime due relazioni valgono solo se  $N \geq 30$ .

### C.3.2 Stima dei parametri

Per la stima dei parametri di una legge di distribuzione di probabilità si possono utilizzare diverse metodologie.

- a) Interpolazione grafica delle *plotting position* (largamente affidata al giudizio soggettivo)
- b) Interpolazione delle *plotting position* secondo il metodo dei minimi quadrati (che di norma conduce a stime distorte dei parametri della FDP)
- c) Metodo dei momenti (MOM)
- d) Metodo della massima verosimiglianza (ML)
- e) Metodo dei momenti pesati in probabilità (PWM)

Il ricorso ai metodi a) e b) è di norma sconsigliabile.

Il *metodo dei momenti* impone l'uguaglianza tra i valori dei momenti empirici tratti dal campione (momenti campionari) e quelli della legge teorica  $P=P(x; \alpha_1, \dots, \alpha_m)$ . I valori degli  $m$  parametri si ottengono risolvendo il sistema di equazioni.

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \hat{\mu}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \\ s &= \hat{\sigma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \\ g &= \hat{\gamma}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

e così via. Le espressioni dei momenti teorici  $\hat{\mu}, \hat{\sigma}, \hat{\gamma}$  delle varie leggi di distribuzione di probabilità si possono trovare in letteratura; al § C.4 per alcune leggi di ripartizione a due parametri sono fornite le espressioni dei parametri in funzione dei momenti campionari.

Con il *metodo della massima verosimiglianza* si calcolano i valori dei parametri  $\alpha_1, \dots, \alpha_m$  che rendono massima la funzione di verosimiglianza, ossia che massimizzano la probabilità (congiunta) che il campione utilizzato per la stima provenga da una popolazione distribuita secondo la legge i cui parametri hanno effettivamente i valori stimati. Il metodo della massima verosimiglianza è di norma più efficace del metodo dei momenti e può applicarsi anche in quei casi, peraltro rari, in cui non siano definite le espressioni analitiche dei momenti teorici della legge di ripartizione. I calcoli richiesti per l'applicazione di questo metodo sono peraltro spesso onerosi.

Il *metodo dei momenti pesati in probabilità* impone, analogamente al metodo dei momenti, l'uguaglianza tra i valori teorici  $M_{(j)}$  ed empirici  $m_{(j)}$  dei momenti pesati in probabilità (§ C.2.3):

$$m_{(j)} = M_{(j)}(\alpha_1, \dots, \alpha_m) \quad \text{con } j = 0, \dots, m-1 \quad (\text{C.18})$$

#### **C.4 ALCUNE FDP TEORICHE A DUE PARAMETRI**

Di ciascuna delle leggi di seguito riportate,  $F(\alpha_1, \alpha_2)$ , sono indicate la sigla e i simboli utilizzati per contraddistinguere, nell'ordine, il *parametro di posizione* e il *parametro di scala*. Le leggi di probabilità (e le funzioni che in esse compaiono) riportate in questo paragrafo, spesso non possono essere risolte analiticamente, ma sono risolte numericamente dai fogli di calcolo elettronico più diffusi (ed esempio *Excel*) che ricorrono, per il calcolo, alle espressioni approssimanti proposte nella letteratura specializzata.

#### C.4.1 FDP Normale, $N(\mu, \sigma)$

Solo quando  $|\gamma| < 0,1$  e  $C_v < 0,2$  si può sperare che la legge di ripartizione di una variabile casuale sia ben interpretata dalla legge normale (o di Gauss)  $N(\mu, \sigma)$ , la quale, avendo campo di validità  $(-\infty; +\infty)$ , mal si adatta a grandezze sempre positive. La sua espressione canonica è:

$$P(y) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^y \exp(-v^2/2) dv \quad (\text{C.19})$$

avendo definito la *variabile ridotta*:

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad -\infty < x < +\infty \quad (\text{C.20})$$

Le stime di  $\mu$  e  $\sigma$  sono date direttamente dalle relazioni (C.4) e (C.5). La legge gaussiana è simmetrica, quindi il suo coefficiente di asimmetria è nullo.

#### C.4.2 FDP LogNormale, $LN(\mu_L, \sigma_L)$

La legge lognormale (o di Galton) gode di largo favore nella rappresentazione statistica delle variabili idrologiche, sia per i valori correnti che per i valori estremi, in quanto è limitata al solo campo positivo ed è asimmetrica. Ipotizzando che il logaritmo della variabile casuale sia distribuito con legge normale, la *variabile ridotta* risulta:

$$y = \frac{\ln x - \mu_L}{\sigma_L} \quad x \geq 0 \quad (\text{C.21})$$

e la funzione di ripartizione è data dalla (C.19). Con il metodo dei momenti i parametri si stimano dal campione mediante le relazioni:

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_L^2 &= \ln(C_v^2 + 1) \\ \hat{\mu}_L &= \ln \bar{X} - 0,5\hat{\sigma}_L^2\end{aligned}\tag{C.22}$$

Il coefficiente di asimmetria della distribuzione è ricavabile dal coefficiente di variazione con la relazione:

$$\hat{\gamma} = 3C_v + C_v^3\tag{C.23}$$

### C.4.3 FDP Gamma, $G(k, \lambda)$

La distribuzione Gamma da risultati analoghi a quelli della legge lognormale anche se, rispetto a questa, è di meno agevole rappresentazione su carta probabilistica. La legge gamma è data dal rapporto:

$$P(x) = \frac{\Gamma(k, \lambda x)}{\Gamma(k)} \quad x \geq 0\tag{C.24}$$

tra la funzione gamma incompleta

$$\Gamma(k, \lambda x) = \int_0^{\lambda x} e^{-v} v^{k-1} dv\tag{C.25}$$

e la funzione  $\Gamma(k)$ . I parametri di forma e di scala della distribuzione, stimati con il metodo dei momenti, sono dati da:

$$\hat{k} = \frac{\bar{X}^2}{s^2} \quad \hat{\lambda} = \frac{\bar{X}}{s^2}\tag{C.26}$$

La  $G(k, \lambda)$  è asimmetrica con  $\gamma = 2/\sqrt{k}$ , e può essere facilmente tabulata notando che la grandezza  $2\lambda x$  ha una distribuzione del  $\chi^2$  a  $2k$  gradi di libertà.

#### C.4.4 FDP di Gumbel, $EV1(u, \alpha)$

La distribuzione del massimo valore tra  $M$  valori di una variabile casuale, quale è ad esempio il massimo annuo di altezza di neve al suolo, segue la cosiddetta prima legge asintotica del massimo valore (o di Gumbel) quando  $M$  è sufficientemente grande:

$$P(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\} \quad -\infty < x < +\infty \quad (\text{C.27})$$

con  $y = \alpha(x-u)$  *variabile ridotta*. Noti valori campionari dei momenti, i parametri della legge di Gumbel sono dati da:

$$\hat{\alpha} = \frac{1,283}{s} \quad \hat{u} = \bar{X} - 0,45s \quad (\text{C.28})$$

Con semplici trasformazioni si può ottenere la relazione tra il valore della variabile con assegnato tempo di ritorno e la media e lo s.q.m del campione:

$$\hat{x}_T = \bar{X} + Ks \quad (\text{C.29})$$

ove compare il fattore di frequenza  $K$ :

$$K = -\{0,45 + 0,7797 \ln[-\ln(1 - 1/T)]\} \quad (\text{C.30})$$

L'asimmetria della distribuzione di Gumbel è fissa e pari a  $\gamma = 1,1396$

#### C.4.5 FDP Esponenziale, $EX(X_0, k)$

Per l'analisi delle piene è talvolta utilizzata anche la distribuzione esponenziale (vedi § C.5), limitata inferiormente ed illimitata superiormente, caratterizzata da due parametri,  $X_0$  e  $k$ , il primo dei quali si identifica con il limite inferiore. La FDP ha espressione:

$$P(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x - x_0}{k}\right) \quad (\text{C.31})$$

con i parametri stimati dai momenti campionari mediante le seguenti relazioni:

$$X_0 = \bar{X} - s \quad k = s \quad (\text{C.32})$$

Quando il limite inferiore  $X_0$  è noto a priori il parametro  $k$  si può stimare senza passare attraverso il calcolo dello scarto quadratico medio ( $s$ ), per mezzo della relazione:

$$k = \bar{X} - X_0 \quad (\text{C.33})$$

## C.5 DETERMINAZIONE DELLA FDP CON IL METODO PD

In alternativa all'elaborazione delle serie dei massimi annui (AM) si può ricorrere alla elaborazione delle serie di durata parziale (PD). Questo metodo, che è impiegato poco di frequente in quanto la sua applicazione richiede la disponibilità della registrazione completa della grandezza di interesse (serie sistematica), risulta molto utile quando sono disponibili misure di eventi storici ricordati per la loro eccezionalità, accaduti al di fuori del periodo di registrazioni sistematiche. L'applicazione di tale metodo consente in tali casi di ottenere risultati comparabili con quelli prodotti da procedure statistiche molto più complesse.

Indicato con  $X_0$  il valore di soglia della variabile casuale, consideriamo tutti i valori della variabile superiori a  $X_0$  (eccedenze). Se  $m$  è il numero di eccedenze e  $N$  è il numero di anni a cui le osservazioni si riferiscono, il tasso medio annuo di eccedenza è:

$$\lambda = \frac{m}{N} \quad (\text{C.34})$$

Indicata  $P_e(x)$  con la FDP delle eccedenze, la relazione tra la variabile casuale ed il tempo di ritorno (in anni) avrà la forma:

$$T(x) = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{1 - P_e(x)} \quad (\text{C.35})$$

con:

$$t(x) = \frac{1}{1 - P_e(x)} \quad (\text{C.36})$$

tempo di ritorno espresso in numero di eventi.

L'analisi delle eccedenze richiede pertanto la stima del tasso di eccedenza annuo ( $\lambda$ ) e l'individuazione della legge di probabilità ( $P_e(x)$ ) secondo la quale sono distribuite le eccedenze. Tale legge dovrebbe, a rigore, essere limitata inferiormente; è comunque utilizzabile una qualsiasi legge che si adatti bene alle osservazioni, soprattutto per i valori maggiori della variabile casuale (ad esempio la legge di Gumbel).

Nelle ipotesi che: (i) i valori, tra loro indipendenti, della variabile casuale superiori ad un prefissato valore di soglia  $X_0$  realizzino un processo Poissoniano; (ii) le eccedenze  $z=x-X_0$  si distribuiscono con legge esponenziale del tipo della (C.31), la probabilità annua di non superamento è data dalla legge:

$$P(x) = \exp\left\{-\lambda \exp\left[-\frac{(x - X_0)}{k}\right]\right\} \quad (\text{C.37})$$

Per la stima dei parametri della legge si procede nel modo seguente. Avendo a disposizione tutti i valori della variabile casuale registrati in un periodo storico di durata  $N$  (anni) viene prefissato  $X_0$  in modo che il campione dei valori eccedentari includa tutti gli eventi ritenuti significativi. Risultano così noti il numero  $m$  (di solito, ma non sempre,  $m > N$ ) e l'entità delle eccedenze  $z_i = x_i - X_0$ ,

con  $i=1, \dots, m$ . La frequenza annua media di superamento ( $\lambda$ ) è ottenibile dalla (C.34), mentre il parametro  $k$  si calcola con la relazione:

$$k = m_z \quad (\text{C.38})$$

essendo  $m_z = \sum_{i=1}^N z_i / m$  (vedi relazione C.33).

## C.6 ANALISI REGIONALE

La procedura di stima regionale elabora un numero di dati molto maggiore che non la procedura puntuale e quindi risulta più robusta, ossia meno influenzata da variazioni aleatorie delle misure e dalla presenza di *outlier*. Per tale ragione la procedura regionale è consigliabile quando, nell'analisi delle frequenze dei massimi annui, si vogliono utilizzare leggi con un numero di parametri superiore a due. La procedura regionale considera che le distribuzioni di probabilità degli  $M$  campioni di  $N_j$  ( $j=1, \dots, M$ ) dati, rilevati in tutte le  $M$  stazioni comprese nella medesima regione idrologica (o nivologica), abbiano caratteri simili. Nel seguito è illustrato il metodo più diffuso di analisi regionale, comunemente denominato *metodo del valore indice*. Un esempio di applicazione di tale metodo ad un caso di studio reale, con riferimento alla variabile nivometrica *DH3gg* (incremento di altezza del manto nevoso su 3 giorni di nevicata), è fornito in Appendice G, § G.5.1.

### C.6.1 Metodo del valore indice

Questa procedura, che è stata proposta originariamente con il nome di *metodo della piena indice* (*index flood procedure*) per elaborare le serie AM delle portate di piena, può essere estesa alla elaborazione di qualsiasi variabile idrologica (e/o nivologica). Essa ammette che i valori  $Y$  della variabile adimensionale ottenuta dividendo i valori  $x_{ij}$  rilevati in ciascuna delle  $M$  stazioni della regione idrologica omogenea per la media  $\bar{X}_j$  del proprio campione (di dimensione  $N_j$ ) abbiano la medesima distribuzione di probabilità, che talvolta

viene detta *curva di crescita regionale* (In realtà un relativamente limitato grado di disomogeneità tra le stazioni di rilevamento che vengono accorpate nell'analisi regionale è ammesso; il test più comune e semplice è quello di verificare che il  $CV(CV_j) < 0,4$ ). La variabile adimensionale è definita come:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{X}_j} \quad (C.39)$$

con  $i=1, \dots, N_j$  e  $j=1, \dots, M$ . Per elaborare le serie adimensionali dei massimi annui delle grandezze idrologiche è consigliato l'impiego della legge generale del massimo valore (*Generalised Extreme Value*, GEV), caratterizzata da tre parametri (posizione,  $u$ , scala,  $\alpha$ , forma,  $k$ ):

$$P(y) = \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{y-u}{\alpha} \right) \right]^{1/k} \right\} \quad (C.40)$$

Per  $k=0$  tale legge degenera nella EV1 (§ C.4.4). Poiché la GEV assegna probabilità non nulla anche ai valori negativi della variabile, si raccomanda che questa legge non sia utilizzata per regionalizzare la distribuzione dei massimi annui quando essa fornisce risultati non realistici ossia, in pratica, quando  $P_{GEV}(y < 0) > 2\%$ . Ciò succede ad esempio con coefficiente di variazione  $C_v(y) > 0,75$  e parametro di forma  $k > -0,05$  oppure con  $C_v(y) > 1,25$  e  $k > -0,30$ .

Determinata la curva di crescita regionale, il valore  $x_{Tj}$  alla  $j$ -esima stazione si ottiene semplicemente dalla relazione:

$$x_{Tj} = y_T \cdot \bar{X}_j \quad (C.41)$$

Il metodo del valor indice ben si presta anche per il calcolo di  $x_T$  in un sito non strumentato, quale è ad esempio una sezione fluviale ove non esiste una stazione idrometrica (o una zona di distacco in cui non sia presente una stazione di rilevamento dei dati nivometeorologici). In questi casi il valore  $\bar{X}_j$  da introdurre nella (C.41) è ottenuto attraverso una regressione lineare o

logaritmica sui parametri morfometrici del bacino (o della zona di distacco, quali ad esempio quota ed esposizione); i coefficienti della regressione vengono calcolati a partire dai valori  $\bar{X}_j$  rilevati nei bacini monitorati della regione. L'esperienza mostra che le  $\bar{X}$  stimate per mezzo di una regressione non hanno precisione superiore a quella di stime tratte da campioni puntuali anche di dimensioni molto ridotte.

### C.6.2 Stima dei parametri della curva di crescita regionale

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:

$$N = \sum_{j=1}^M N_j \quad (\text{C.42})$$

Al campione unico si applicano le procedure descritte al § C.3.2 per determinare i valori dei parametri della GEV. Il metodo dei momenti pesati in probabilità fornisce in questo caso le espressioni più semplici per la stima parametrica, approssimate dalle relazioni seguenti (i cui termini devono essere rappresentati con almeno 5 cifre significative per evitare consistenti errori dovuti agli arrotondamenti):

$$\hat{k} = 7,8590C + 2,9554C^2 \quad \text{dove} \quad C = \frac{2m_{(1)} - m_{(0)}}{3m_{(2)} - m_{(0)}} - \frac{\ln 2}{\ln 3} \quad (\text{C.43})$$

$$\hat{\alpha} = \frac{\hat{k} 2m_{(1)} - m_{(0)}}{\Gamma(1 + \hat{k}) (1 - 2^{-\hat{k}})} \quad (\text{C.44})$$

$$\hat{u} = m_{(0)} + \frac{\hat{\alpha}[\Gamma(1 + \hat{k}) - 1]}{\hat{k}} \quad (\text{C.45})$$

Si ricorda che essendo  $y$  adimensionale  $m_{(0)}=1$ . Il metodo station year non è consigliabile quando le stazioni di misura sono tra loro molto correlate.

#### Approccio basato sulle medie dei PWM

L'applicazione del metodo dei momenti pesati in probabilità (§ C.3.2) può fare riferimento anche alla media regionale dei PWM del campione di dati della variabile  $y$  relativi a ciascuna stazione di misura:

$$\bar{m}_{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^M m_{(k)j} \cdot N_j}{\sum_{j=1}^M N_j} \quad j = 1,2 \quad (\text{C.46})$$

## **C.7 ERRORI DI STIMA E LIMITI DI CONFIDENZA**

La stima del valore  $x_T$  con le procedure di inferenza statistica viste nei paragrafi precedenti è sempre affetta da errore. Non è possibile valutare direttamente l'effetto dell'errata scelta della legge teorica di regolarizzazione che comunque porta, di norma, a stime non centrate. Viceversa, attraverso il calcolo dell'errore quadratico medio della stima ( $s_T$ ) è possibile definire l'effetto che, a causa della limitata dimensione del campione, gli errori nella stima dei parametri della legge teorica hanno sulla precisione del calcolo di  $x_T$ . Inoltre, ammesso che la stima sia centrata e che, approssimativamente, l'errore nella stima di  $x_T$  abbia distribuzione normale, ossia  $P(e_T)=N(0, s_T)$ , è possibile tracciare i limiti di confidenza di  $x_T$ . Il valore superiore di confidenza ( $x_{lc}^+$ ) e il valore inferiore ( $x_{lc}^-$ ) hanno l'espressione:

$$x_{lc}^{\pm} = x_T \pm z \cdot s_T \quad (\text{C.47})$$

Per  $z=1,645$  e  $z=1,960$  abbiamo rispettivamente i limiti di confidenza al 90% e al 95%.

*Kite* fornisce le espressioni asintotiche di  $s_T$  in funzione dei parametri della legge teorica e della numerosità  $N$  del campione. Per la legge normale risulta:

$$s_T = \left[ \left( 1 + \frac{y^2}{2} \right) \frac{s^2}{N} \right]^{1/2} \quad (\text{C.48})$$

dove la variabile ridotta  $y$  è data dalla (C.20) quando sia noto  $x_T$ . Se viene inserito nella (C.48) lo s.q.m. del logaritmo della variabile  $\sigma_L$  al posto di  $\sigma$ , la (C.48) da  $s_{TL}$ , logaritmo dell'errore quadratico medio della stima lognormale; i limiti di confidenza della stima lognormale si ottengono dalla relazione:

$$x_{lc}^{\pm} = x_T \cdot \exp(\pm z \cdot s_T) \quad (\text{C.49})$$

Per la legge di Gumbel, se i parametri sono stimati con il metodo dei momenti risulta:

$$s_T = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{0,9106 + 0,1495y + 0,8576y^2}{N} \right)^{1/2} \quad (\text{C.50})$$

mentre se i parametri sono stimati con il metodo dei momenti pesati in probabilità *Stedinger* propone la relazione:

$$s_T = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{1,1128 + 0,4574y + 0,8046y^2}{N} \right)^{1/2} \quad (\text{C.51})$$

In entrambe le relazioni  $y$  è la variabile ridotta di Gumbel e  $\alpha$  è il parametro di scala della legge.

Anche per la legge GEV possono essere tracciati i limiti di confidenza; comunque, per  $T > 100$  anni l'errore nella stima di  $x_T$  con la legge GEV/PWM non può ritenersi distribuito con legge normale in quanto è dimostrato che la stima di  $x_T$  è affetta da non trascurabile errore sistematico (stima non centrata). Le espressioni asintotiche di  $s_T$  e dell'errore sistematico della stima GEV/PWM sono estremamente complesse. *Lu e Stedinger* propongono una semplice espressione empirica di  $s_T$  in funzione dei parametri della legge (C.40), che può risultare utile nelle applicazioni pratiche:

$$s_T = \frac{\alpha^2}{N} \exp[a_0 + a_1 \exp(-k) + a_2 k^2 + a_3 k^3] \quad (\text{C.52})$$

Per  $T=100$  anni di tempo di ritorno, i valori dei coefficienti della (C.52) sono nell'ordine: -4,147; 8,216; -2,033; 4,780.

## **APPENDICE D**

### **Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto**

## D.1 Calcolo dell'altezza di distacco

Con riferimento alle simulazioni di dinamica finalizzate alla stesura dei P.Z.E.V. viene di seguito brevemente descritta la metodologia di calcolo proposta nelle *Direttive Svizzere* (Salm *et al.*, 1990) per la stima dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto (cioè con tempi di ritorno prefissati, in particolare pari a 30, 100 e 300 anni in accordo alle recenti normative AINEVA, vedi Parte 1 - § 1.2.2).

L'altezza di distacco di una valanga,  $H_d$ , è ottenibile mediante la seguente relazione (Salm *et al.*, 1990; Burkard e Salm, 1992):

$$H_d(T; z) = [DH3gg(T, z) \cdot \cos 28^\circ + H_{sd}(T)]f(\theta) \quad (D.1)$$

dove con  $T$  si è indicato il tempo di ritorno, con  $z$  la quota media di distacco, con  $DH3gg$  lo spessore del manto nevoso accumulato su tre giorni consecutivi (misurato verticalmente su una superficie orizzontale, e stimabile da misure nivometriche come differenza tra l'altezza del manto nevoso al giorno  $i$  e quella al giorno  $i-3$ ), con  $H_{sd}$  il sovraccarico di neve trasportata dal vento e con  $f(\theta)$  una funzione decrescente della pendenza media della zona di distacco ( $\theta$ ), la cui espressione è fornita dalla relazione (D.2) ed i cui valori sono riportati per alcune pendenze caratteristiche in Tabella D.1.

$$f(\theta) = \frac{0,291}{\sin \theta - 0,202 \cos \theta} \quad (D.2)$$

$\theta$	28°	30°	32.5°	35°	37.5°	40°	45°	50°
$f(\theta)$	1	0.9	0.79	0.71	0.65	0.60	0.52	0.46

**Tabella D.1** - Valori dello fattore correttivo  $f(\theta)$  ("slope factor") per alcuni valori caratteristici della pendenza media della zona di distacco

L'inferenza statistica sui massimi annui del parametro  $DH3gg$  relativi ad una stazione di misura significativa consente di stimare i valori di tale grandezza in funzione del tempo di ritorno (dettagli in merito sono forniti in Appendice C - § C.3). Per la correzione con la quota (nel caso tipico di stazioni di rilevamento poste a quote inferiori alla quota media di distacco) le *Direttive Svizzere* (Salm *et al.*, 1990) propongono un incremento di  $DH3gg$  pari a 5 cm ogni cento metri di dislivello. L'accuratezza delle estrapolazioni sia spaziali (ovvero in funzione della quota) che temporali (ovvero in funzione del tempo di ritorno) associate alla stima di  $DH3gg(T,z)$  può essere migliorata mediante tecniche di analisi regionale, presentate in Appendice C - § C.6.

Per quanto riguarda il sovraccarico di neve ventata,  $H_{sd}$ , le *Direttive Svizzere* (Salm *et al.*, 1990) propongono per le zone di distacco sottovento un valore indicativo variabile tra 30 e 50 cm. La definizione delle zone di distacco soggette ai sovraccarichi da vento può essere fatta individuando le direzioni prevalenti dei venti nella zona di indagine (mediante analisi statistica dei dati anemometrici registrati in un stazione significativa). Nel paragrafo che segue (§ D.2) è sinteticamente descritta una metodologia alternativa di stima dei sovraccarichi da vento, che ha il vantaggio di associare esplicitamente tale variabile al tempo di ritorno e quindi di modulare i sovraccarichi in dipendenza della rarità dell'evento simulato.

Esempi di applicazione delle metodologie proposte ad un caso di studio pratico sono presentati in Appendice G - § G.5.

## D.2 STIMA DEI SOVRACCARICHI DA VENTO

Per il calcolo dei sovraccarichi da vento si può utilizzare una relazione empirica proposta da Föhn (1980). Durante episodi di nevicata l'incremento giornaliero di altezza del manto nevoso su pendii sottovento rispetto a terreno orizzontale,  $H_{sd(1gg)}$ , è stimato mediante la relazione:

$$H_{sd(1gg)} = k \cdot V^3 \quad (V \leq 20m/s) \quad (D.3)$$

in cui  $H_{sd}$  è espresso in metri al giorno,  $k$  è un coefficiente empirico pari a 0,00008 ( $s^3d^{-1}m^{-2}$ ), e  $V$  indica il valore medio giornaliero della velocità del vento (in m/s).

L'adattamento di un campione di valori massimi annuali della velocità media giornaliera del vento (registrati in un stazione anemometrica attigua all'area di studio) ad una opportuna legge di distribuzione di probabilità dei valori estremi (Appendice C, § C.3) può consentire di stimare il valore di tale grandezza in funzione del tempo di ritorno, e pertanto di caratterizzare il valore del sovraccarico  $H_{sd(1gg)}$  in funzione di predefinite periodicità. Il sovraccarico su tre giorni,  $H_{sd}$ , può essere stimato in maniera largamente conservativa come:

$$H_{sd} = 3 \cdot H_{sd(1gg)} \quad (D.4)$$

Una stima più realistica può invece essere ottenuta come segue:

$$H_{sd} = H_{sd(1gg)} + 2 \cdot H_{sd(1gg)}^* \quad (D.5)$$

dove con  $H_{sd(1gg)}^*$  si è indicato il valore di sovraccarico giornaliero ottenuto considerando il valore massimo annuo della velocità media del vento su tre giorni consecutivi.

## **APPENDICE E**

### **Pressioni di impatto e delimitazione delle aree pericolose**

## E.1 PRESSIONI DI IMPATTO DELLE VALANGHE

La pressione di impatto esercitata da una valanga su di un ostacolo piatto, di grandi dimensioni, disposto perpendicolarmente rispetto alla traiettoria di avanzamento della massa nevosa (parametro di riferimento, assieme al tempo di ritorno, per la delimitazione delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanghe, vedi Parte A, § 1.2.2.1), può essere espressa come somma di due contributi (equazione E.1): uno legato alle componenti di sollecitazione di natura statica, uno a quelle di natura dinamica.

$$P = P_{statica} + P_{dinamica} \quad (E.1)$$

L'ordine di grandezza della componente statica di sollecitazione può essere stimato, in prima approssimazione, con riferimento al carico idrostatico:

$$P_{stat} \approx \rho \cdot g \cdot H \quad (E.2)$$

dove con  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] si è indicata la densità media della neve, con  $g$  [m/s<sup>2</sup>] l'accelerazione di gravità e con  $H$  [m] lo spessore dell'ammasso nevoso in movimento (o eventualmente depositato).

La componente dinamica di sollecitazione è usualmente espressa nel seguente modo (si veda ad esempio Salm *et al.*, 1990):

$$P_{din} = k \cdot (\rho \cdot V^2) \quad (E.3)$$

in cui  $V$  [m/s] indica la velocità della valanga e  $k$  un coefficiente adimensionale usualmente assunto pari a 1 per le valanghe dense (almeno nel caso di ostacoli di grosse dimensioni, come nel caso in esame) e pari a 0,5 per quelle polverose.

I calcoli delle valanghe eseguiti mediante modelli di dinamica (vedi Appendice B, § B.3.1 e B.3.2) consentono di stimare i principali parametri dinamici delle valanghe (altezze di scorrimento e deposito,  $H$ , velocità,  $V$ , ecc.) e quindi di stimare le pressioni di impatto.

A velocità elevate (indicativamente  $V > 10 \text{ m/s}$ ), il contributo statico può essere ritenuto trascurabile rispetto a quello dinamico, sia nel caso di valanghe dense che nel caso di valanghe polverose. Questa è la tipica situazione delle zone di scorrimento delle valanghe.

In zona di arresto la situazione è invece differente.

Nel caso delle valanghe dense, infatti, il contributo di natura statica può divenire di importanza paragonabile a quello di natura dinamica, a causa della riduzione di velocità caratteristica delle zone di deposito (pochi metri al secondo) e, al contempo, dell'aumento degli spessori di scorrimento e della densità dell'ammasso nevoso associati al fenomeno della decelerazione. In particolare per le valanghe dense, anche ad avvenuto arresto, a causa delle notevoli densità e spessori del deposito, il contributo statico può risultare rilevante (qualche kPa, vedi equazione E.2).

Nel caso delle valanghe polverose invece in generale il contributo di natura statica risulta trascurabile rispetto a quello di natura dinamica anche nella zona di deposito, in virtù delle velocità di propagazione maggiori che tale tipo di valanga è in grado di mantenere anche in aree a pendenza contenuta e delle densità molto basse caratteristiche di tali scorrimenti anche nelle fasi di decelerazione e arresto. In particolare, per le valanghe polverose può essere trascurato il contributo statico associato al deposito della valanga, poiché generalmente si hanno depositi di limitato spessore.

## **E.2 CRITERI PRATICI DI DELIMITAZIONE DELLE AREE PERICOLOSE**

Le implicazioni pratiche di quanto esposto al § E.1, con riferimento alla delimitazione delle aree con differente grado di esposizione al pericolo di valanghe, possono essere sintetizzate come segue.

1. Il limite tra zona rossa e zona blu è dato da un valore di pressione pari a 3 kPa per eventi trentennali o da un valore di pressione pari a 15 kPa per eventi centennali (vedi Tabella E.1); viene scelta quella tra le due condizioni che fornisce un limite maggiormente conservativo. Con

riferimento alla prima condizione (soglia dei 3 kPa per eventi trentennali) si osserva che nel caso di valanghe dense tale valore si ottiene dalla componente statica di sollecitazione per uno spessore del deposito pari a circa 1 m, ipotizzando una densità pari a  $300 \text{ kg/m}^3$  (equazione E.2). Poiché usualmente la forma del deposito di una valanga densa presenta un fronte abbastanza ripido, nella pratica la condizione di raggiungimento della soglia dei 3 kPa può essere fatta coincidere con la distanza di arresto della valanga e pertanto la delimitazione della zona blu per valanghe dense trentennali è di fatto priva di rilevanza pratica (vedi Tabella E.1). Per le valanghe polverose, viceversa, la delimitazione della zona blu per eventi trentennali ha rilevanza pratica; in particolare nella stima della soglia dei 3 kPa per eventi trentennali farà fede il valore di pressione dinamica associato al movimento dell'ammasso nevoso (equazione E.3).

2. Il limite tra zona blu e zona gialla è dato da un valore di pressione pari a 3 kPa per eventi centennali (vedi Tabella E.1). Valgono anche in questo caso le considerazioni espresse al precedente punto 1. (ovvero la delimitazione della zona gialla per valanghe centennali ha significato pratico esclusivamente per valanghe di tipo polveroso, vedi Tabella E.1).
3. Nei criteri di perimetrazione (vedi Parte 1, § 1.2.2.1-1.2.2.4) non è stata "formalmente" introdotta una soglia limite inferiore per la pressione di impatto, ovvero un valore di pressione al di sotto del quale si possa ritenere un'area sostanzialmente sicura. Nella pratica risulta sensato introdurre tale limite, soprattutto quando si affrontino calcoli di valanghe polverose. A titolo indicativo si può porre un limite inferiore per la pressione pari a circa 0,5 kPa, valore analogo alle pressioni dinamiche tipicamente utilizzate per la stima dei carichi da vento sulle costruzioni nelle regioni alpine. Per le valanghe polverose il limite inferiore delle zone pericolose (in particolare della zona blu per eventi trentennali e della zona gialla per eventi centennali) potrà essere individuato utilizzando tale valore di soglia per la pressione, criterio che appare più ragionevole che non l'adozione di un criterio di perimetrazione basato sulla massima estensione del deposito della valanga (che condurrebbe, almeno in alcuni casi, alla delimitazione di aree esposte al pericolo

irragionevolmente estese). Si osserva che nel caso delle valanghe dense, un valore di soglia pari a 0,5 kPa corrisponde ad un deposito di circa 15÷20 cm (equazione E.2), pertanto la distinzione della delimitazione prodotta da tale soglia piuttosto che dalla distanza di arresto della valanga nella pratica è irrilevante.

	<b>Criteri da Normativa</b> (cfr. Parte 1, § 1.2.2.1 ÷ 1.2.2.4)	<b>Criterio pratico per valanghe dense</b>	<b>Criterio pratico per valanghe polverose</b>
<b>ZONA ROSSA</b>	- T=30anni; $P \geq 3\text{kPa}$ - T=100 anni; $P \geq 15\text{kPa}$	Il limite della zona rossa può essere fatto coincidere con la distanza di arresto dell'evento trentennale o con la soglia di pressione pari a 15kPa per l'evento centennale	Il limite della zona rossa è dato dalla condizione più conservativa tra la soglia di pressione pari a 3kPa per l'evento trentennale e la soglia di pressione pari a 15kPa per l'evento centennale.
<b>ZONA BLU</b>	- T=30anni; $0\text{kPa} \leq P < 3\text{kPa}$ - T=100 anni; $3\text{kPa} \leq P < 15\text{kPa}$	Il limite della zona blu può essere fatto coincidere con la distanza di arresto dell'evento centennale	Il limite della zona blu è dato dalla condizione più conservativa tra la soglia di pressione pari a 0,5 kPa per l'evento trentennale e la soglia di pressione pari a 3 kPa per l'evento centennale.
<b>ZONA GIALLA</b>	- T=100 anni; $0\text{kPa} \leq P < 3\text{kPa}$ - Aree interessate dall'arresto di eventi valanghivi di natura "eccezionale" (per i quali si può assumere indicativamente, ma non necessariamente, T=300anni)	Il limite della zona gialla è delimitato con riferimento al limite massimo di espansione di eventi a carattere "eccezionale" (ovvero con tempi di ritorno superiori al secolo, per i quali si può assumere indicativamente, ma non necessariamente, T=300anni); tale limite può essere desunto mediante indagini storiche, aerofotogrammetriche, dendrocronologiche, e più in generale mediante attività di studio ed indagine sul campo che non prevedono necessariamente l'ausilio di modelli di calcolo.	Il limite della zona gialla è dato dalla soglia di pressione pari a 0,5 kPa per l'evento centennale; potranno altresì essere delimitate in giallo anche le zone riconosciute come interessate da danneggiamenti prodotti da valanghe polverose eccezionali (ovvero con tempi di ritorno superiori al secolo, per i quali si può assumere indicativamente, ma non necessariamente, T=300anni)

**Tabella E.1 - Criteri di perimetrazione e loro significato pratico**

Nella perimetrazione delle aree esposte al pericolo di valanga è previsto l'utilizzo di modelli di calcolo per la caratterizzazione degli eventi trentennali e centennali. Viceversa il calcolo delle valanghe non è ritenuto necessario, almeno in linea generale, per la delimitazione delle aree potenzialmente interessate da accadimenti di tipo "eccezionale", per la caratterizzazione dei quali un approccio basato su criteri di natura empirica appare più sensato. Ciò spiega perché agli eventi "eccezionali" è associato un tempo di ritorno puramente indicativo e non vincolante (T=300 anni).

Di fatto, nel caso delle valanghe dense la perimetrazione si basa principalmente sul tempo di ritorno degli eventi attesi, mentre nel caso delle valanghe polverose assume maggiore importanza l'intensità dell'evento. Ciò appare sensato considerata la natura estremamente distruttiva degli scorrimenti densi, in grado di produrre danneggiamenti sostanziali in tutta l'area interessata dall'arresto della valanga; la frequenza con cui un evento valanghivo di tipo denso può presentarsi risulta pertanto il principale fattore discriminante in termini di pericolosità. In particolare nel caso delle valanghe dense risultano rosse, blu e gialle le aree potenzialmente interessate dall'arresto di eventi rispettivamente trentennali, centennali ed eccezionali; la soglia di pressione pari a 15kPa per l'evento centennale può essere interpretata come utile controllo del limite della zona rossa delimitato con riferimento alla distanza di arresto dell'evento trentennale. Nel caso di eventi di tipo polveroso, l'area interessata dalla valanga è meno direttamente collegabile alla frequenza dell'evento; in particolare le valanghe polverose possono interessare aree estremamente vaste (anche nel caso di eventi relativamente frequenti), ma altresì presentare sulle stesse potenziale distruttivo trascurabile; l'intensità dell'evento appare pertanto in tale caso il parametro più adeguato per la gradazione della pericolosità. Nel caso delle valanghe polverose risultano rosse, blu e gialle le aree in cui la pressione di impatto dell'evento centennale risulta rispettivamente maggiore di 15 kPa, compresa tra 3 kPa e 15 kPa, inferiore a 3 kPa (e comunque superiore ad un limite inferiore di danneggiamento che può essere fatto coincidere con 0,5 kPa); l'andamento delle pressioni di impatto relative ad un evento trentennale può fornire un utile controllo sui limiti delle zone rosse e blu, mentre il limite della zona gialla può essere opportunamente esteso con riferimento ad informazioni relative ai danneggiamenti prodotti da eventi di tipo polveroso a carattere eccezionale.

## **APPENDICE F**

**Riperimetrazione delle aree esposte al  
pericolo di valanga in relazione alla  
presenza di interventi di difesa**

I criteri per la redazione delle perimetrazioni successivamente alla realizzazione di interventi di difesa (“riperimetrazioni” o “P.Z.E.V. post-intervento”) sono i medesimi utilizzati per la redazione delle perimetrazioni in assenza di opere. Pertanto andranno cartografate le aree a diverso grado di esposizione al pericolo di valanga (indicate nelle mappe di pericolosità con differenti colori) secondo i criteri descritti nella Parte 1 - § 1.2.2. Nell’esecuzione delle riperimetrazioni la presenza di opere di difesa dovrà essere tenuta in conto con modalità differenti in dipendenza della tipologia di intervento in oggetto, come specificato meglio nei paragrafi che seguono.

La natura estremamente qualitativa delle indicazioni presentate nei paragrafi che seguono trova la sua giustificazione nella sostanziale mancanza (sia a livello nazionale che a livello europeo) di procedure tecnico-normative condivise relativamente alla modificazione delle mappe di pericolosità in presenza di interventi di difesa. In particolare, la collocazione delle opere di difesa "attiva", essendo principalmente concentrata in contesti ambientali difficili, espone le opere stesse al costante rischio di danneggiamenti tali da ridurre o pregiudicarne l’efficacia; la garanzia di appropriati interventi manutentivi non è assoluta in quanto la manutenzione appare condizionata da aspetti amministrativi ed economici del tutto imprevedibili se relazionati alla vita tecnica delle opere ed ai tempi di ritorno degli eventi valanghivi utilizzati in fase di perimetrazione. Parimenti, la lacunosità delle conoscenze relative ai processi fisici messi in gioco durante l’interazione di valanghe con ostacoli di varia forma e dimensione, da ragione della carenza di procedure tecniche accettate per la considerazione degli effetti delle varie tipologie di opere di difesa "passiva" sul moto delle valanghe; in aggiunta a tale aspetto si devono considerare i problemi legati alla possibile perdita di efficacia tipica di questa tipologia di opere dovuta all’assommarsi di più eventi durante la stessa stagione con parziale o totale riempimento dell’opera stessa.

Pertanto, stante la necessità e l’urgenza di avviare ricerche specifiche in materia, al fine di prevenire possibili sottostime dei reali livelli di pericolo in relazione alle indeterminatezze di cui sopra, si propongono i seguenti criteri generali da seguire in fase di riperimetrazione.

- Al fine cautelativo di mantenere una forma di vigilanza sulle aree potenzialmente esposte, soprattutto con riferimento a fenomeni a carattere eccezionale, la ripermimetrazione conseguente alla presenza di interventi di bonifica non dovrà portare ad un ridimensionamento dell'intera area esposta, ovvero l'estensione della zona gialla andrà mantenuta invariata (come prescritto dai recenti criteri AINEVA, vedi Parte 1 - § 1.2.2.6).
- Al fine di tenere in debito conto la possibilità di degrado degli interventi di difesa attiva (e dei rimboschimenti) e le problematiche tecniche connesse alla progettazione delle opere di difesa passiva, si propone l'adozione di un criterio cautelativo aggiuntivo che in fase di ripermimetrazione limiti il declassamento delle aree esposte al pericolo al passaggio di una sola categoria. In tal senso le aree considerate ad elevata pericolosità - zona rossa - a seguito di interventi di messa in sicurezza potranno divenire al massimo a moderata pericolosità - zona blu; in linea generale dovrà essere evitato il declassamento da zona rossa a zona gialla, a meno di situazioni particolari che lo rendano giustificabile.

## **F.2 OPERE DI DIFESA ATTIVA**

### **F.2.1 Opere di ritenuta**

La realizzazione di opere di ritenuta nella zona di distacco (tipicamente ponti e reti da neve) avrà come effetto di limitare la potenziale area di distacco e conseguentemente di ridurre i volumi di progetto da utilizzare nelle simulazioni della dinamica delle valanghe. Indicato per esempio con:

$$V_{30-30} = A_{30} H_{30} \quad (F.1)$$

il volume di distacco relativo ad un evento trentennale in assenza di opere di ritenuta ( $A_{30}$  indica l'area potenziale di distacco in assenza di opere,  $H_{30}$  l'altezza di distacco con un tempo di ritorno pari a 30 anni), il volume di progetto

da inserire nelle simulazioni successivamente alla realizzazione dell'intervento di difesa ( $V_{30-co}$ ) sarà:

$$V_{30-co} = A_{co} H_{30} \quad (F.2)$$

dove:

$$A_{co} = A_{so} - A^* \quad (F.3)$$

con  $A^*$  superficie della zona di distacco bonificata mediante le opere di ritenuta. Un discorso analogo vale per il caso centennale, con la sola differenza che all'altezza di distacco con un tempo di ritorno pari a 30 anni andrà sostituita quella con un tempo di ritorno pari a 100 anni.

Conseguentemente alla riduzione dei volumi di distacco si potrà valutare la possibilità di modificare i coefficienti di resistenza del modello di dinamica e, nel caso in cui vari significativamente la quota (e/o la pendenza) media della zona di distacco, l'altezza di distacco delle valanghe di progetto (vedi Appendice D - *Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto*).

Bisognerà inoltre valutare con attenzione la possibilità che lo spessore del manto nevoso al suolo su scala centennale non ecceda l'altezza utile delle opere di ritenuta ( $D_k$  nelle *Direttive Elvetiche* per la progettazione delle opere di ritenuta, 1990). In caso affermativo si dovrà sommare al volume di distacco relativo all'area non bonificata un volume aggiuntivo associato ad un possibile distacco al di sopra delle opere nell'area bonificata. In questo senso dovrà essere opportunamente valutata, ed eventualmente considerata, anche la possibilità di sovraccarichi delle opere di ritenuta associati al trasporto di neve da vento.

### **F.2.2 Opere frangivento**

La realizzazione di opere di difesa finalizzate alla riduzione dei sovraccarichi da vento avrà come effetto di limitare le altezze di distacco delle valanghe e conseguentemente di ridurre i volumi di progetto da utilizzare nelle simulazioni della dinamica delle valanghe.

In particolare, se la zona di distacco risulta adeguatamente protetta rispetto ai sovraccarichi di natura eolica (indicazioni tecniche in materia si possono trovare ad esempio in Sivardiere e Castelle, 1992 e 1993; Tabler *et al.*, 1991) potrà essere considerato nullo (o adeguatamente ridotto) il termine  $H_{sd}$  che compare nell'equazione (D.1) di Appendice D - *Calcolo dell'altezza di distacco delle valanghe di progetto*.

### **F.3 OPERE DI DIFESA PASSIVA**

#### **F.3.1 Opere di rallentamento nella zona di scorrimento**

Le opere di rallentamento nella zona di scorrimento (quali ad esempio cunei in terra o muratura) non modificano in alcun modo i volumi di distacco di progetto che rimangono i medesimi del caso in assenza di opere. Altresì esse modificheranno la dinamica della valanga, rallentandone il moto e favorendone un arresto su distanze più brevi.

La presenza di opere di rallentamento nella zona di scorrimento potrà essere quantificata mediante una opportuna variazione dei coefficienti di resistenza adottati dal modello di dinamica in uso (vedi Appendice B - § B.3). Detta variazione potrà essere espressa in percentuali crescenti del valore di progetto del singolo coefficiente di resistenza, in dipendenza del rapporto tra le dimensioni di riferimento delle opere in progetto (altezza, area, ecc.) e le dimensioni tipiche delle valanghe oggetto di studio (tiranti, larghezza, ecc.).

#### **F.3.2 Opere di deviazione nella zona di scorrimento**

Le deviazioni nella zona di scorrimento (generalmente attuate mediante argini in terra, muratura o cls) comporta una variazione del percorso seguito dalla valanga e pertanto una modificazione delle aree potenzialmente interessate dall'arresto della stessa. Anche in questo caso i volumi di distacco di progetto non risultano modificati rispetto al caso di assenza di opere.

La presenza di questa tipologia di opere di difesa passiva potrà essere tenuta in conto in fase di simulazione della dinamica delle valanghe mediante una opportuna modificazione della topografia di riferimento del sito valanghivo.

Nel caso più comune di utilizzo di un modello di simulazione della dinamica della valanga di tipo mono-dimensionale, in via semplificativa ci si potrà limitare ad una modificazione del profilo principale di scorrimento della valanga che rispecchi la deviazione indotta dall'argine; tale approccio può essere ritenuto conservativo in quanto vengono trascurate le dissipazioni di varia natura causate dall'interazione tra la massa nevosa in movimento e l'opera di deviazione.

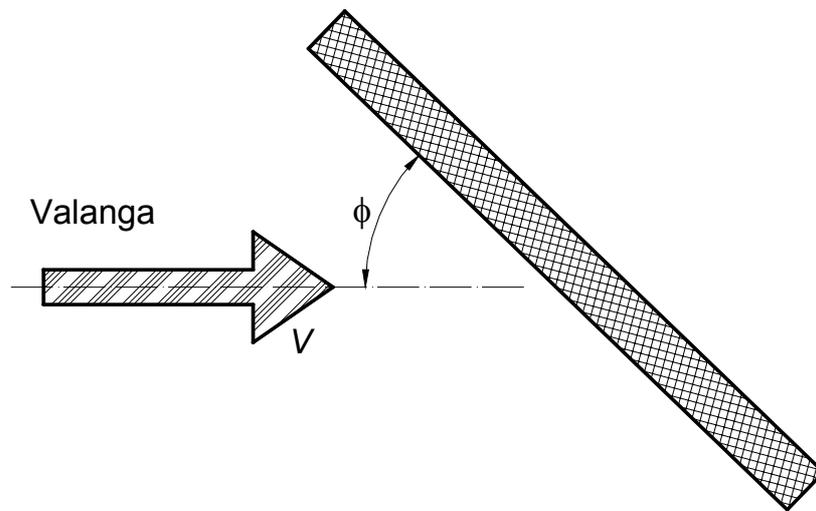
Dovrà essere attentamente valutato che le dimensioni, l'ubicazione e l'orientamento dell'opera di deviazione siano tali da evitare lo "scavalcamento" della stessa da parte della valanga. Per far ciò è necessario calcolare l'*altezza di risalita* ( $h_r$ ) della valanga sull'opera, cioè l'aumento di altezza del flusso in corrispondenza dell'opera di deviazione.

In prima approssimazione, assumendo in via conservativa che non vi siano dissipazioni energetiche nell'impatto della valanga contro la diga, per il calcolo dell'*altezza di risalita* si può ipotizzare che l'intera energia cinetica della valanga si trasformi in energia potenziale. In questo modo è possibile calcolare  $h_r$  come (Mears, 1981):

$$h_r = \frac{(V \sin \phi)^2}{2g} \quad (\text{F.4})$$

dove  $\phi$  è l'angolo di deviazione e  $V$  è la velocità della valanga immediatamente prima dell'impatto (Figura F.1). Per il calcolo di  $V$  si faccia riferimento all'Appendice B - *Modelli per il calcolo delle valanghe*.

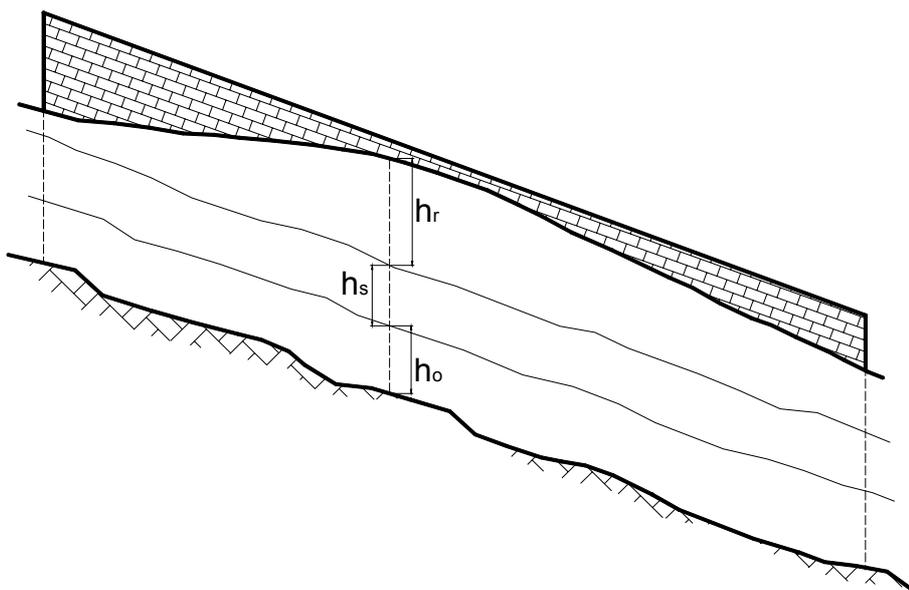
Il calcolo dell'altezza di risalita effettuato mediante la relazione (F.4) è indubbiamente fortemente approssimato. L'analisi dei dati relativi ad alcuni siti sperimentali (Harbitz *et al.*, 1999; Johannesson, 2001) ha comunque mostrato che l'utilizzo della relazione (F.4) sembra consentire di ottenere il corretto ordine di grandezza di  $h_r$ .



**Figura F.1 - Angolo di deviazione rispetto al moto della valanga**

Affinché l'opera non venga scavalcata la sua altezza totale (indicata con  $H$ ) dovrà essere superiore alla somma dell'altezza del manto nevoso al suolo,  $h_o$ , dell'altezza di scorrimento della valanga,  $h_s$ , e dell'altezza di risalita,  $h_r$  (vedi Figura F.2):

$$H > h_o + h_s + h_r \quad (F.5)$$



**Figura F.2 - Altezza massima di risalita sul muro di deviazione**

Nel valutare l'altezza dell'opera è inoltre importante considerare la possibilità che il deposito di masse nevose a monte dell'opera stessa, dovute a precedenti distacchi di valanghe, possa ridurre l'efficacia (cioè la stima di  $h_o$  dovrà essere effettuata in maniera attenta e comunque cautelativa).

L'opera dovrà anche essere in grado di sopportare le spinte che si producono durante l'impatto ed il cambio di direzione della valanga.

### **F.3.3 Opere di rallentamento e deviazione nella zona di arresto**

Per le opere di rallentamento e deviazione nella zona di arresto valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per la medesima tipologia di opere in zona di scorrimento (§ F.3.1 e F.3.2).

### **F.3.4 Opere di contenimento nella zona di arresto**

Le opere di raccolta nella zona di deposito (quali dighe in terra, muratura o cls) consentono di arrestare l'avanzamento della valanga, convogliando e raccogliendo le masse nevose all'interno dell'invaso formato a monte dell'opera stessa ed evitandone l'espansione a valle. Per questo tipo di opere dovrà essere accuratamente valutato il problema della corretta ubicazione (in relazione alla dinamica della valanga) e dimensionamento (altezza, angolo di monte, etc) con riferimento a possibili "scavalcamenti" dell'opera stessa da parte delle valanghe di progetto.

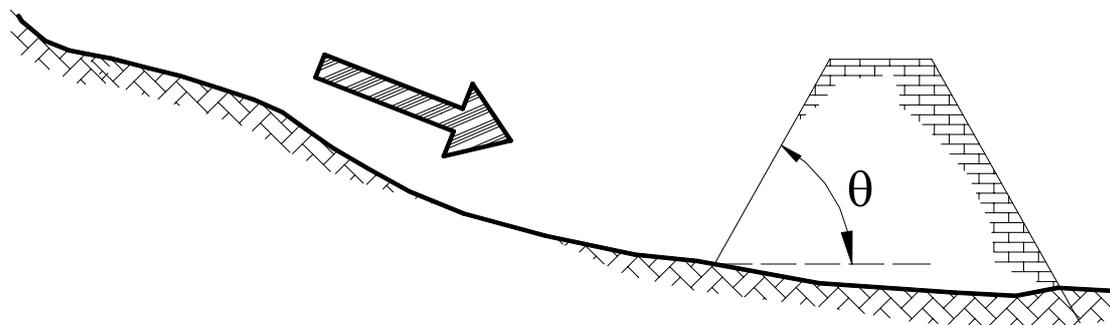
Osservazioni fatte sul campo suggeriscono che le valanghe di grosse dimensioni cominciano a rallentare e depositare detriti su pendenze inferiori a 15-20°, di conseguenza le opere di intercettazione risulteranno più efficaci sui pendii inferiori ai 20° (15° nel caso di valanghe di grosse dimensioni). Occorre inoltre considerare la possibilità che le opere possono essere raggiunte con elevata frequenza da valanghe di piccole e medie dimensioni; in tal caso la loro efficacia risulterà notevolmente ridotta.

Le dimensioni dell'opera di contenimento dovranno essere tali da evitare lo "scavalcamento" della stessa da parte della valanga. Per far ciò è necessario, come nel caso delle opere di deviazione, calcolare l'*altezza di risalita*" ( $h_r$ ) della valanga sull'opera che, anche per le opere di contenimento, può essere stimata mediante la relazione (F.4) (in cui  $\phi$  è generalmente posto pari a  $90^\circ$ ).

Per le opere in terra con angolo di monte di  $\theta$  gradi, considerando un coefficiente di attrito  $\mu$  tra la valanga e l'opera ( $0.25 < \mu < 0.4$ ), l'*altezza di risalita*"  $h_r$  può essere stimata anche mediante la relazione (Mears, 1981):

$$h_r = \frac{V^2}{2g(1 + \mu \cot \theta)} \quad (\text{F.6})$$

che fornisce una stima dell'altezza di risalita meno conservativa della (F.4), perché si suppone che una certa quantità di energia cinetica venga consumata dall'attrito di scorrimento che si esercita sulla valanga mentre essa risale il lato di monte della diga di intercettazione (Figura F.3).



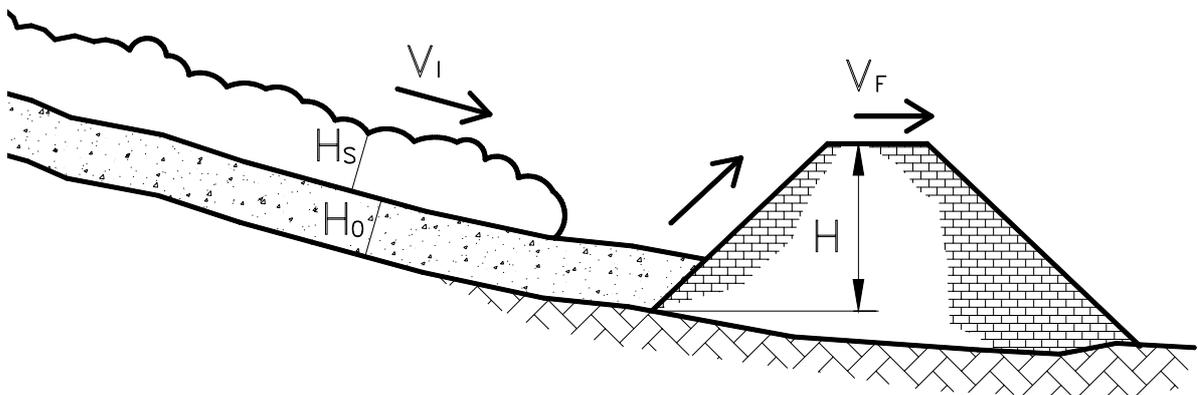
**Figura F.3** - Angolo di deviazione verticale dell'opera di contenimento.

Come nel caso delle opere di deviazione, affinché l'opera di contenimento non venga scavalcata dalla valanga la sua altezza totale ( $H$ ) dovrà essere superiore alla somma dell'altezza del manto nevoso al suolo,  $h_0$ , dell'altezza di scorrimento della valanga,  $h_s$ , e dell'altezza di risalita,  $h_r$  (equazione F.5 e Figura F.2).

Nel caso in cui la diga venga superata dalla valanga (ovvero qualora la relazione F.5 non sia rispettata) si verificherà una riduzione di velocità della valanga, perché una parte di energia cinetica sarà consumata nello scavalcamento della diga. Ipotizzando che tale energia non venga riacquisita nel lato di valle della diga (generalmente non abbastanza lungo e ripido da permettere una accelerazione significativa della valanga) la riduzione di velocità indotta sulla valanga dalla presenza della diga può essere stimata in prima approssimazione mediante la seguente relazione (Mears, 1981):

$$\Delta(V)^2 = V_i^2 - V_f^2 = [2g(H - h_0)(1 + \mu \cot \theta)] \quad (F.7)$$

La velocità a valle della diga (come detto approssimabile con  $V_f$ , Figura F.4) può essere utilizzata come dato di partenza per il calcolo delle distanze di arresto (ad esempio utilizzando la relazione proposta da Voellmy, B.22 di Appendice B). I risultati di alcuni studi sperimentali a scala di laboratorio relativi all'effetto di dighe di ritenuta sulle distanze di arresto delle valanghe sono stati presentati recentemente da Faug *et al.* (2003).



**Figura F.4 -** Schema per il calcolo della riduzione di velocità conseguente allo scavalcamento della diga da parte della valanga

A prescindere dall'adeguatezza dell'altezza della diga, occorre valutare che a monte dell'opera vi sia un volume sufficiente per l'accumulo della neve (Figura F.5). Per far questo è possibile stimare il massimo volume invasabile a



### **F.3.5 Gallerie paravalanghe**

Le gallerie paravalanghe rappresentano un caso particolare di opera di difesa passiva, in quanto garantiscono una modificazione dell'area interessata dal moto della valanga spostando il piano di scorrimento e/o arresto lungo la verticale. Generalmente questa tipologia di opere è realizzata per proteggere vie di comunicazione. Sono interventi di difesa altamente efficienti, nel senso che garantiscono un ridottissimo rischio residuo nelle zone protette.

Peraltro, da un punto di vista puramente cartografico, l'area sovrastante la zona protetta dalla galleria risulta a tutti gli effetti ancora "sito valanghivo", ed andrà pertanto perimetrata di conseguenza.

### **F.3.6 Effetto delle opere di difesa passiva sul moto della componente polverosa**

Le opere di deviazione, rallentamento e raccolta (in zona di scorrimento e/o arresto) hanno un effetto limitato (talvolta addirittura peggiorativo) con riferimento alla dinamica di valanghe di tipo polveroso. Questo aspetto dovrà essere debitamente tenuto in conto nel caso di siti valanghivi propensi alla formazione di scorrimenti nevosi di tipo "misto", cioè in cui la dinamica delle valanghe sia tipicamente accompagnata dalla formazione e propagazione di una componente di tipo polveroso. Gli studi in proposito sono comunque estremamente limitati; una rassegna merito è stata recentemente pubblicata da Naaim-Bouvet *et al.*, 2003.

## **F.4 RIMBOSCHIMENTI**

Nel presente paragrafo sono brevemente discussi gli effetti che i boschi possono avere sul distacco e sulla dinamica delle valanghe. Le conoscenze in materia sono però tuttora limitate e ulteriori studi in tale settore risultano necessari per poter pervenire alla definizione di criteri tecnici che consentano di quantificare in maniera sistematica e relativamente oggettiva i possibili effetti della vegetazione sull'esposizione al pericolo di valanghe delle aree montane.

#### **F.4.1 Zone di distacco**

Un bosco inalterato nei suoi parametri strutturali svolge una funzione protettiva nei confronti delle valanghe impedendo (o comunque limitando) il distacco delle masse nevose al suo interno. Il bosco trattiene con le chiome parte della neve durante le precipitazioni svolgendo un'azione duplice, sia di riduzione dello spessore del manto nevoso che di stabilizzazione dello stesso (la caduta della neve intercettata causa infatti la formazione di una stratificazione non omogenea impedendo la formazione di valanghe a lastroni).

Gli effetti dei rimboschimenti nelle zone di potenziale distacco delle valanghe potranno quindi essere considerati in maniera analoga agli effetti delle opere di ritenuta (vedi § F.2.1), una volta valutato il grado di protezione che il bosco può offrire in relazione a tipologia, dimensioni e densità della copertura vegetativa (per ulteriori indicazioni tecniche in merito si veda ad esempio Meyer-Grass e Imbeck, 1986). In genere per pendii di moderata pendenza 500 conifere per ettaro può essere considerata una densità sufficiente, mentre per pendii molto acclivi la densità ideale è di 1000 conifere/ettaro (in accordo alle indicazioni di McClung e Schaerer, 1993).

Nella ripermetrazione sarà necessario inoltre tener presente che il bosco protettivo, a differenza delle tradizionali opere di difesa dalle valanghe, è un ecosistema dinamico e quindi soggetto a cambiamenti nello spazio e nel tempo; dovranno pertanto essere attuati controlli costanti sul suo stato di conservazione, e la ripermetrazione dovrà essere considerata valida solamente sino a quando il bosco mantiene inalterate le sue caratteristiche protettive.

#### **F.4.2 Zone di scorrimento**

In linea generale, un bosco non può fermare una valanga staccatasi al di sopra del limite della vegetazione. I rimboschimenti nelle zone di scorrimento e di arresto delle valanghe andranno pertanto considerati al più alla stregua di opere atte a favorire il rallentamento delle masse nevose in movimento (vedi § F.3.1).

La loro presenza potrà essere quantificata mediante una eventuale variazione dei coefficienti di resistenza adottati dal modello di dinamica in uso, in relazione a tipologia e dimensioni del bosco protettivo (per alcune indicazioni in merito si veda ad esempio Bartelt e Stöckli, 2001).

# **APPENDICE G**

## **Analisi di rischio**

## **G.1 Carta del rischio**

### **G.1.1 Introduzione**

Il Piano delle Zone Esposte al Pericolo di Valanghe discusso nella Parte 1 (§ 1.2) e nella Parte 2 (§ 2.11) del presente rapporto fornisce un'indicazione dei differenti livelli di esposizione al pericolo di valanghe per l'area in esame, in funzione della periodicità e dei potenziali effetti distruttivi degli eventi valanghivi attesi. Tale tipo di valutazione non tiene conto di ciò che è presente sul territorio e dei danni sociali, economici o ambientali che gli eventi valanghivi di progetto possono arrecare. Per arrivare a questo tipo di valutazione, che assume i connotati di valutazione dei livelli di rischio per l'area in esame, bisogna predisporre una cartografia che tenga conto, oltreché della pericolosità associata al fenomeno, anche dell'utilizzo attuale del territorio (con i suoi insediamenti abitativi e produttivi, il patrimonio naturale presente, etc.), nonché delle previsioni urbanistiche comunali, attuate o in fase di attuazione.

A titolo indicativo si propone nel paragrafo successivo una metodologia di redazione della Carta di Rischio che fa riferimento alle indicazioni contenute nel documento metodologico: "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità del rischio da frana in Regione Lombardia" (B.U.R.L. n. 51 – Edizione Speciale del 22 dicembre 2000). Tale impostazione è stata adottata in Regione Lombardia nel contesto delle perimetrazioni dei siti valanghivi sottoposti al Piano Straordinario di Salvaguardia relativo alla L.267/98.

### **G.1.2 Metodologia di redazione**

Il primo passo della procedura per la redazione della carta del rischio consiste nel sovrapporre la Carta di Pericolosità (P.Z.E.V.) con una carta che indichi lo stato attuale e futuro dell'area urbana in esame (tipicamente il Piano Regolatore Generale, P.R.G) in cui siano riportati i seguenti elementi:

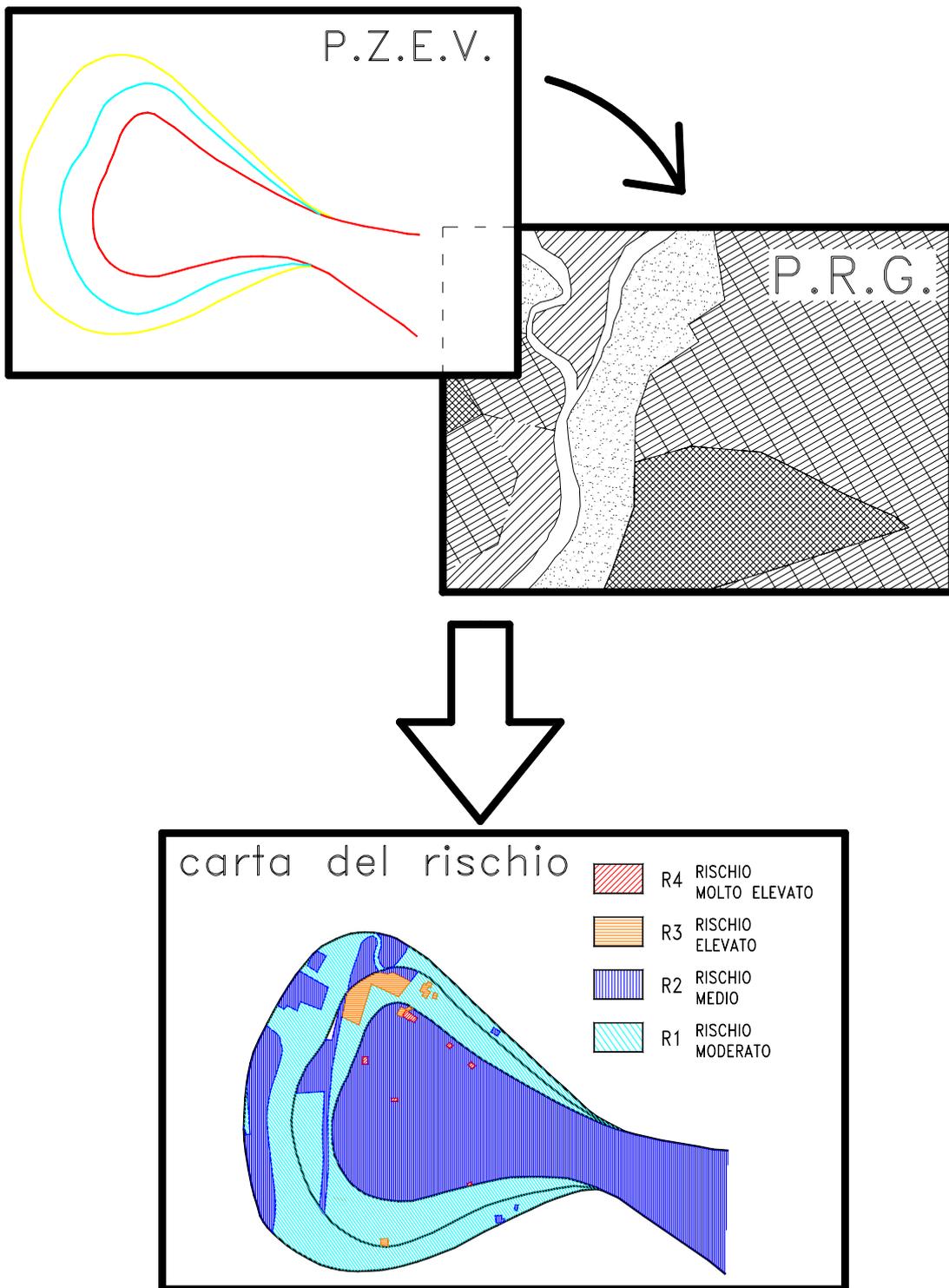
- agglomerati urbani comprese le zone di espansione urbanistica;
- le aree su cui insistono insediamenti produttivi, in particolare quelli definiti a rischio ai sensi di legge;

- le infrastrutture a rete e le vie di comunicazione di rilevanza strategica, anche a livello locale;
- il patrimonio ambientale e i beni culturali di interesse rilevante;
- le aree sede di servizi pubblici e privati, di impianti sportivi e ricreativi, strutture ricettive ed infrastrutture primarie.

Sulla base della sovrapposizione della Carta di Pericolosità (P.Z.E.V.) con il P.R.G. si provvederà a identificare il grado di esposizione al pericolo dei singoli elementi, la loro vulnerabilità, e a valutare il grado di rischio (danno atteso) risultante (vedi Figura G.1).

Per favorire una quantificazione dei livelli di rischio è possibile classificare l'importanza degli elementi a rischio in termini di valore relativo, mediante accorpamento delle classi d'uso del suolo in quattro classi di elementi, secondo lo schema di Tabella G.1. La classificazione dei livelli di rischio risulterà incrociando la pericolosità, ottenuta dalla redazione dei P.Z.E.V. con le classi degli elementi a rischio riportate in Tabella G.1 secondo lo schema indicativo illustrato in Tabella G.2., che prevede le seguenti quattro classi di rischio:

- **R1** (*moderato*): danni sociali, economici e al patrimonio ambientale marginali;
- **R2** (*medio*): danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano incolumità alle persone, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche;
- **R3** (*elevato*): possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture, con conseguente inagibilità delle stesse, interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale;
- **R4** (*molto elevato*): possibili perdite di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche.



**Figura G.1** – Schema per la redazione della carta del rischio

Classi di elementi a rischio	Categorie di uso del suolo
<b>E1</b>	Zona boschiva Zona agricola non edificabile Demanio pubblico non edificato o edificabile
<b>E2</b>	Zona agricola generica (con possibilità di edificazione) Infrastrutture pubbliche (strade comunali o consortili non strategiche <sup>(*)</sup> ) Zona di protezione ambientale, rispetto, verde privato Parchi, verde pubblico non edificato
<b>E3</b>	Infrastrutture pubbliche (strade provinciali e comunali strategiche <sup>(*)</sup> , ferrovie, lifelines, oleodotti, elettrodotti, acquedotti) Zone per impianti tecnologici e discariche RSU o inerti Zona a cava
<b>E4</b>	Centri urbani Nuclei rurali minori di particolare pregio Zone di completamento Zone di espansione Zona artigianale, industriale, commerciale Servizi pubblici prevalentemente con fabbricati Infrastrutture pubbliche (infrastrutture viarie principali strategiche <sup>(*)</sup> ) Zone di discarica speciale o tossico nocivi Zona alberghiera Zona per campeggi e villaggi turistici

<sup>(\*)</sup> *Strategiche: uniche vie di accesso*

**Tabella G.1** - *Classificazione degli elementi a rischio (in accordo al documento metodologico: "Procedure per la valutazione e la zonazione della pericolosità del rischio da frana in Regione Lombardia", B.U.R.L. n. 51 – Edizione Speciale del 22 dicembre 2000, Cap.3, Pag. 25)*

	Zona gialla	Zona blu	Zona rossa
<b>E1</b>	R1	R1	R2
<b>E2</b>	R1	R2	R3
<b>E3</b>	R2	R2	R4
<b>E4</b>	R2	R3	R4

**Tabella G.2** - *Matrice per la valutazione del rischio*

## G.2 STIMA QUANTITATIVA DEI LIVELLI DI RISCHIO

La Carta del Rischio di cui al precedente § G.1 fornisce essenzialmente una stima qualitativa dei livelli di rischio. Nel presente paragrafo viene proposta una metodologia di analisi che permette invece di quantificare il grado di rischio caratteristico di ogni singolo elemento esposto e quindi dell'intera area in esame. Questo tipo di quantificazione può essere di estrema utilità qualora si sia interessati a valutare la tipologia di intervento di bonifica che risulta ottimale in un'ottica "costi-benefici".

La metodologia proposta è sinteticamente descritta nel paragrafo successivo (§ G.2.1); per maggiori dettagli in merito e per un esempio di applicazione del metodo ad un caso di studio reale si rimanda a Barbolini e Pagliardi (2004).

### G.2.1 Metodologia di calcolo

Per effettuare analisi quantitative di rischio bisogna innanzitutto considerare gli elementi esposti (o elementi vulnerabili) che, generalmente, sono molteplici e con differente grado di esposizione al pericolo nonché con un "valore" che non è il solo valore intrinseco del bene ma dipende anche dall'importanza che la collettività conferisce ad esso.

In maniera sintetica e schematica è possibile riassumere in una tabella le strutture potenzialmente coinvolte, assegnando a ciascuna di esse un *Indice di Pericolo P* che dipende dal grado di esposizione al pericolo accertato nel P.Z.E.V. Si propone, a livello puramente indicativo, l'utilizzo della seguente scala:

- strutture in zona gialla →  $P = 1$
- strutture in zona blu →  $P = 3$
- strutture in zona rossa →  $P = 5$

Nei casi in cui l'elemento esposto giaccia tra due differenti zone di esposizione al pericolo (giallo/blu o blu/rosso) si possono utilizzare valori intermedi dell'indice di pericolo, ovvero rispettivamente 2 e 4.

Ad ogni struttura coinvolta verrà assegnando un *valore*  $V$ , utilizzando una opportuna scala "indicativa" (che ad esempio utilizzi valori "indicativi" compresi tra 0 a 10). L'indice di rischio  $IR_i$  per l'*i-esima* struttura esposta sarà ottenuto mediante la seguente relazione:

$$IR_i = P_i \cdot V_i \quad (G.1)$$

dove con  $P_i$  e  $V_i$  si sono indicati rispettivamente l'indice di pericolo ed il valore assegnato all'*i-esima* struttura.

Tale analisi, per quanto estremamente semplificata e in parte anche soggetta ad inevitabili valutazioni soggettive (soprattutto nella definizione dei valori  $V_i$ ), consente in maniera abbastanza sistematica di caratterizzare i livelli di rischio associati ai vari elementi esposti, e conseguentemente di individuare le priorità di intervento (ovvero la protezione di quegli elementi esposti caratterizzati dai valori più alti dell'indice di rischio  $IR_i$ ). Al tempo stesso è possibile effettuare la quantificazione del livello di rischio complessivo per l'area in esame,  $IR$ :

$$IR = \sum_{i=1}^{i=N} IR_i \quad (G.2)$$

dove  $N$  rappresenta il numero degli elementi vulnerabili censiti esposti al pericolo. L'indice di rischio complessivo per l'area in esame ( $IR$ ) risulta un parametro estremamente utile qualora si voglia effettuare una analisi in qualche modo quantitativa e sistematica degli effetti di differenti ipotesi di intervento di messa in sicurezza in termini di riduzione del rischio, rischio residuo ed efficacia dell'intervento in relazione al suo costo.

Il metodo presentato è da intendersi esclusivamente come strumento di aiuto ragionato al decisore, non costituendo in alcun modo restrizione o vincolo. Si desidera inoltre mettere in evidenza la valenza prettamente applicativa del metodo proposto; metodologie più sofisticate per il calcolo del rischio di valanga

sono state proposte recentemente in alcune pubblicazioni scientifiche (si veda ad esempio Barbolini e Cappabianca, 2003; Barbolini *et al.*, 2005), ma il livello di complessità e l'onere computazionale delle stesse non le rende di fatto utilizzabili nella comune pratica ingegneristica.

# **APPENDICE H**

## **Esempi applicativi**

## H.1 IL CASO DI STUDIO

Al fine di presentare un esempio di applicazione delle metodologie proposte nel presente rapporto ad un caso di studio reale si è considerato il sito valanghivo denominato "Valle di Pietra Quadra", ubicato in Alta Val Brembana all'interno delle Alpi Orobie Bergamasche (Figura H.1). Tale sito rappresenta un caso interessante in quanto offre l'occasione di trattare i molteplici aspetti tecnici e le svariate problematiche connesse con la redazione di una mappa di pericolosità da valanga (P.Z.E.V.). Si sottolinea peraltro che le analisi riportate nel seguito hanno scopo didattico ed i relativi risultati valenza puramente esemplificativa; essi non potranno pertanto essere utilizzati, a nessun titolo, in applicazioni pratiche che abbiano per oggetto il territorio citato.

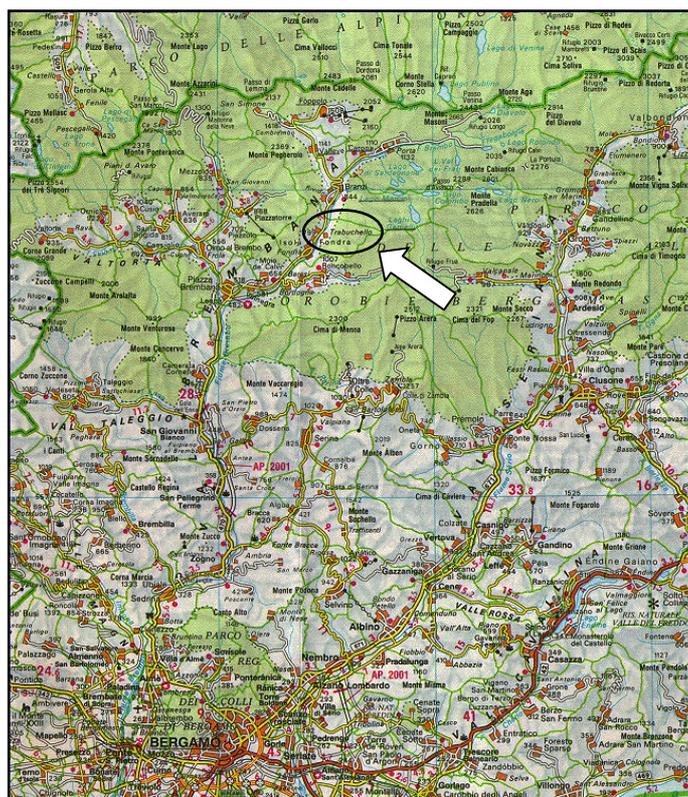
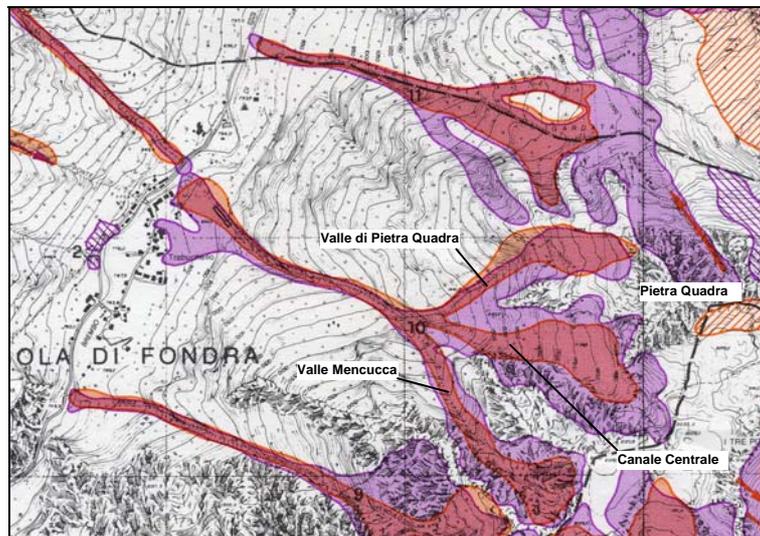


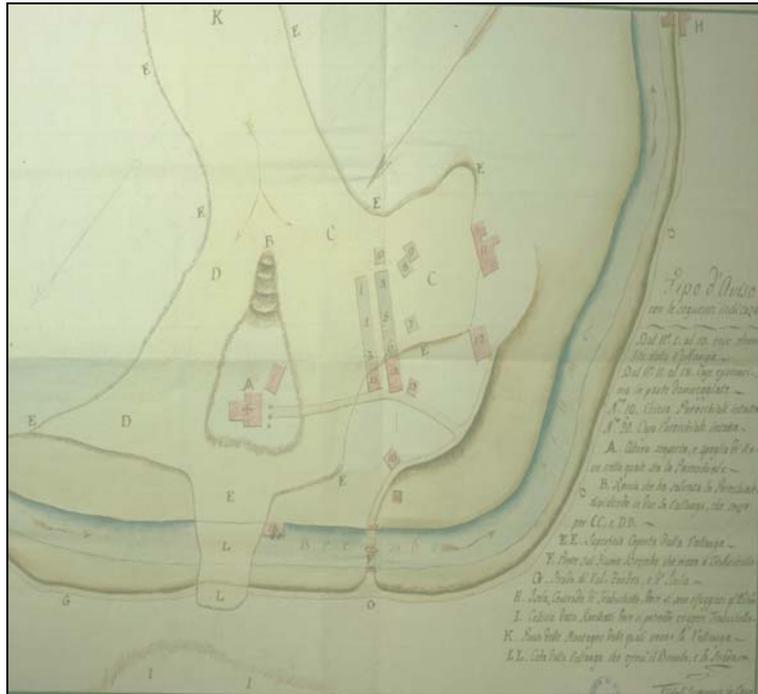
Figura H.1 - Inquadramento territoriale del bacino della Valle di Pietra Quadra

La "Valle di Pietra Quadra" è periodicamente percorsa da una valanga (la n. 10 della Carta di Localizzazione Probabile delle Valanghe relativa al Comune

di Isola di Fondra - BG, vedi Figura H.2) che interessa con notevole frequenza l'area di conoide e, in maniera più occasionale, può raggiungere l'abitato di "Trabuchello" (frazione del Comune di Isola di Fondra) e la strada provinciale "Piazza Brembana-Foppolo". Il 22 Gennaio 1810 una parte considerevole dell'abitato di Trabuchello che sorgeva nei prati adiacenti alla chiesa fu distrutto da una valanga; si contarono 28 vittime (Figura H.3). Seppur senza vittime, l'abitato fu interessato dalla valanga anche nel 1888, 1917 e 1951. L'ultimo evento di grosse dimensioni, che arrivò a lambire le abitazioni, si verificò nel Febbraio 1986 (Figura H.6).



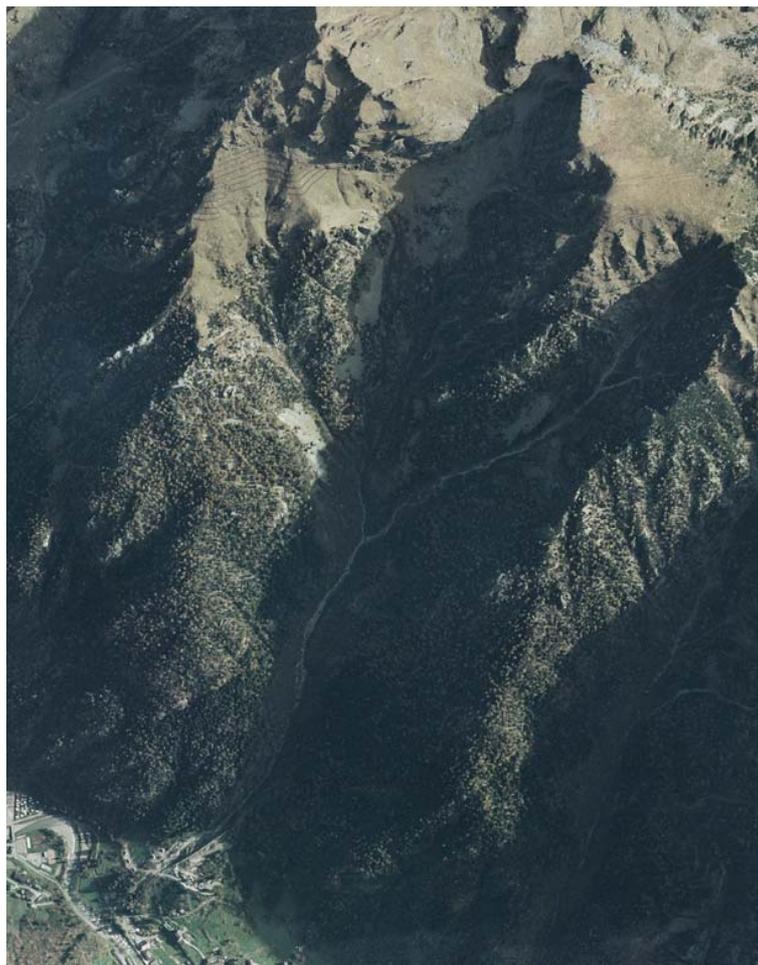
**Figura H.2 -** Estratto C.L.P.V. del Comune di Isola di Fondra, BG (Regione Lombardia, Ed.1992); la valanga in esame è la n. 10.



**Figura H.3 -** *Mappa prodotta dall'Ingegnere in Capo del Dipartimento del Serio (Ing. Vidali) in data 17 Marzo 1810, per documentare l'evento valanghivo del 22 Gennaio 1810 che causò la morte di 28 persone e la distruzione quasi completa della frazione di Trabuchello.*

## H.2 DESCRIZIONE DEL SITO VALANGHIVO

Il sito ha una morfologia abbastanza complessa e presenta tre zone sede di potenziale distacco delle masse nevose, ben distinte e caratterizzate da dimensioni, esposizione e "potenziale" valanghivo molto differenti (vedi Figure H.2 e H.4).



**Figura H.4** - Ortofoto dell'intero sito "Valle di Pietra Quadra" (volo del 1998)

Le zone di distacco poste sui versanti occidentali della Cima di Pietra Quadra risultano quelle più critiche da un punto di vista dell'attività valanghiva. In effetti esse sono caratterizzate da una estensione areale considerevole (circa 13 ha nel complesso), da pendenze regolari intorno ai 35-40° e da un soprassuolo costituito da cotica erbosa interrotta da rari cespuglieti e affioramenti rocciosi. Tale zona si configura pertanto come adatta all'accumulo ed al successivo distacco di valanghe di grosse dimensioni ed elevata energia cinetica, in grado di rappresentare elevato pericolo per le strutture ed infrastrutture poste sul fondovalle. La predisposizione all'attività valanghiva è inoltre favorita dai piccoli e più frequenti distacchi che si verificano sulle testate rocciose sovrastanti la zona di distacco in questione. Le altre zone di distacco (ubicate rispettivamente sui versanti meridionali della Pietra Quadra, afferenti al canale centrale di Figura H.2, ed alla sommità della Valle Mencucca) appaiono invece caratterizzate da un'attività valanghiva più frequente ma in generale

meno intensa, in quanto la natura irregolare dei pendii e la maggiore acclività non permettono l'accumulo al suolo di elevati spessori di neve.

Intorno a quota 1250 m s.l.m. i tre canali di apporto superiori si uniscono nella zona di scorrimento propriamente detta (Figure H.2 e H.4). Essa si sviluppa con una lunghezza di circa 700 metri, con andamento approssimativamente rettilineo. L'andamento longitudinale della zona di scorrimento presenta una pendenza piuttosto discontinua, con un valore medio prossimo ai 26°, e punte di 35-40°. La sezione rientra nel classico tipo a "V", con fianchi molto ripidi e boscati ma rasati su una fascia continua e di ampiezza pressappoco costante in prossimità del fondo.

La zona di conoide copre un dislivello di circa 120 metri e termina alla confluenza con il fiume Brembo (Figure H.2 e H.4). Il conoide è caratterizzato da pendenze piuttosto elevate (intorno ai 15-20°), soprattutto nella parte superiore (sotto 850 m s.l.m. la pendenza è inferiore a 15°), e da un canale attivo in parte regimato eccentrico rispetto all'asse mediano verso il lobo settentrionale. In corrispondenza della zona di conoide la valanga, in condizioni normali, tende a seguire l'alveo del torrente. Nel caso di eventi eccezionali è possibile che le masse nevose sormontino la sponda sinistra del canale con deflusso in direzione di Trabuchello. Nel caso di eventi estremi anche la direzione di deflusso ordinaria può comportare il raggiungimento dell'alveo del Brembo e della strada provinciale ad esso adiacente.

Appare importante rimarcare il fatto che la presenza di molteplici zone di distacco caratteristica di questo sito rappresenta una fonte di incremento di pericolosità per le zone di fondovalle, in quanto sono possibili distacchi successivi (e/o simultanei) di valanghe originatesi da settori diversi, con la duplice conseguenza di: (a) favorire lo scivolamento delle valanghe nella zona di scorrimento, con un conseguente incremento di velocità delle stesse, in quanto la rugosità del canale risulta diminuita dal passaggio di precedenti scorrimenti nevosi; (b) favorire il deflusso in direzioni di espansione inusuali nella zona di arresto a seguito della presenza di depositi di eventi precedenti (le cosiddette "digitazioni"), che in particolare nel caso in esame comportano una riduzione dell'efficacia del vallo di contenimento ubicato nella zona di conoide. Tale aspetto è stato debitamente considerato nelle simulazioni della dinamica della valanga (vedi § H.6.3).

La Valle di Pietra Quadra è stata inserita nel *Piano per la difesa del suolo ed il riassetto della Valtellina e delle adiacenti zone delle provincie di Bergamo, Brescia e Como* (L. 102/90) con la scheda Br/07/13. Nel contesto di tale piano sono stati finanziati e successivamente realizzati interventi volti alla messa in sicurezza del sito nei confronti delle valanghe. L'attuale stato di conservazione ed efficienza di tali opere è descritto in dettaglio al paragrafo che segue (§ H.3); le modalità con cui tali interventi sono stati tenuti in conto nella valutazione dell'attuale stato di esposizione al pericolo di valanghe dell'area di fondovalle (redazione del P.Z.E.V.) sono invece discusse ai § H.6 e H.7.

### **H.3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI DI DIFESA IN OPERA**

#### **H.3.1 Gli interventi di difesa realizzati negli anni '70 e '80**

Nel corso del 1971 vennero eseguiti i primi lavori di mitigazione del rischio, che avevano lo scopo di impedire il sormonto della sponda sinistra dell'alveo all'entrata della zona di conoide. Essi consistettero in: (a) costruzione di un muro alto 1,2 metri, con alla sommità una fila di putrelle; (b) allargamento della sezione di deflusso in zona di conoide con la rimozione di uno sperone roccioso posto in destra idrografica. Tali opere si rivelarono subito inadeguate; un anno dopo la loro realizzazione (inverno 1972) un evento valanghivo fu infatti in grado di superare il muro di recente realizzazione e piegare i profilati metallici posti alla sua sommità (vedi Figura H.5).

Negli anni compresi tra il 1980 ed il 1985, con finanziamenti della Comunità Montana Valle Brembana, vennero effettuati alcuni ulteriori interventi di difesa, volti a: (a) prolungare il muro di deviazione esistente, con innalzamento dello stesso ad un'altezza di circa 4 metri e rinforzo del suo lato esterno mediante rilevato in terra; (b) abbassare il fondo della valle con asportazione di materiale alluvionale per uno spessore complessivo di 4 metri; (c) riprofilare la sezione trasversale della valle, mediante abbattimento di un prisma roccioso in sponda sinistra. Anche tali realizzazioni si rivelarono insufficienti: nel 1986 una valanga oltrepassò il muro di deviazione ed arrivò a lambire le abitazioni e la chiesa di Trabuchello (Figura H.6).



**Figura H.5 -** Zona di arresto della valanga ripresa nella primavera 1977. E' visibile il muro di contenimento realizzato in zona di arresto all'inizio degli anni settanta, nonché i danneggiamenti alle putrelle di estremità prodotti dall'evento del 1972.



**Figura H.6 -** Ripresa aerea dell'evento del 31/1-01/2 1986, con indicazione del limite del deposito

### **H.3.2 Gli interventi di difesa realizzati in tempi recenti (L.102/90)**

Tra la fine degli anni '90 e l'inizio del 2000 la Provincia di Bergamo, nel quadro del *Piano per la difesa del suolo ed il riassetto della Valtellina e delle adiacenti zone delle provincie di Bergamo, Brescia e Como* (L.102/90), ha realizzato un consistente intervento di messa in sicurezza sul sito in esame,

comprensivo di opere di difesa realizzate sia in zona di distacco che in zona di arresto. I lavori sono iniziati nel Dicembre 1997 e completati nel Giugno 2001.

Nella zona di distacco della valanga sono state realizzate opere di ritenuta delle masse nevose (1970 metri lineari di ponti da neve di cui 1685 m in Valle di Pietra Quadra e 285 m in Valle Mencucca) e opere che limitano i sovraccarichi eolici (210 m di “barriere frangivento” alla testata della Valle Mencucca), Figura H.7. In zona di arresto sono state realizzate opere di difesa passiva: un argine di contenimento di lunghezza pari a circa 200 m e altezza pari a circa 15 m (Figura H.8) e 10 cunei di rallentamento di altezza pari a circa 5 m (Figura H.9). Con riferimento alle opere di difesa attiva presenti è stato realizzato un apposito catasto, in accordo ai criteri presentati in Appendice A. Al successivo § H.3.3 a titolo esemplificativo è presentato un estratto di tale catasto.



(a)



(b)

**Figura H.7-** *Opere di difesa attiva in zona di distacco, (a): ponti da neve in Valle di Pietra Quadra; (b) barriere frangivento e ponti da neve in Valle Mencucca.*



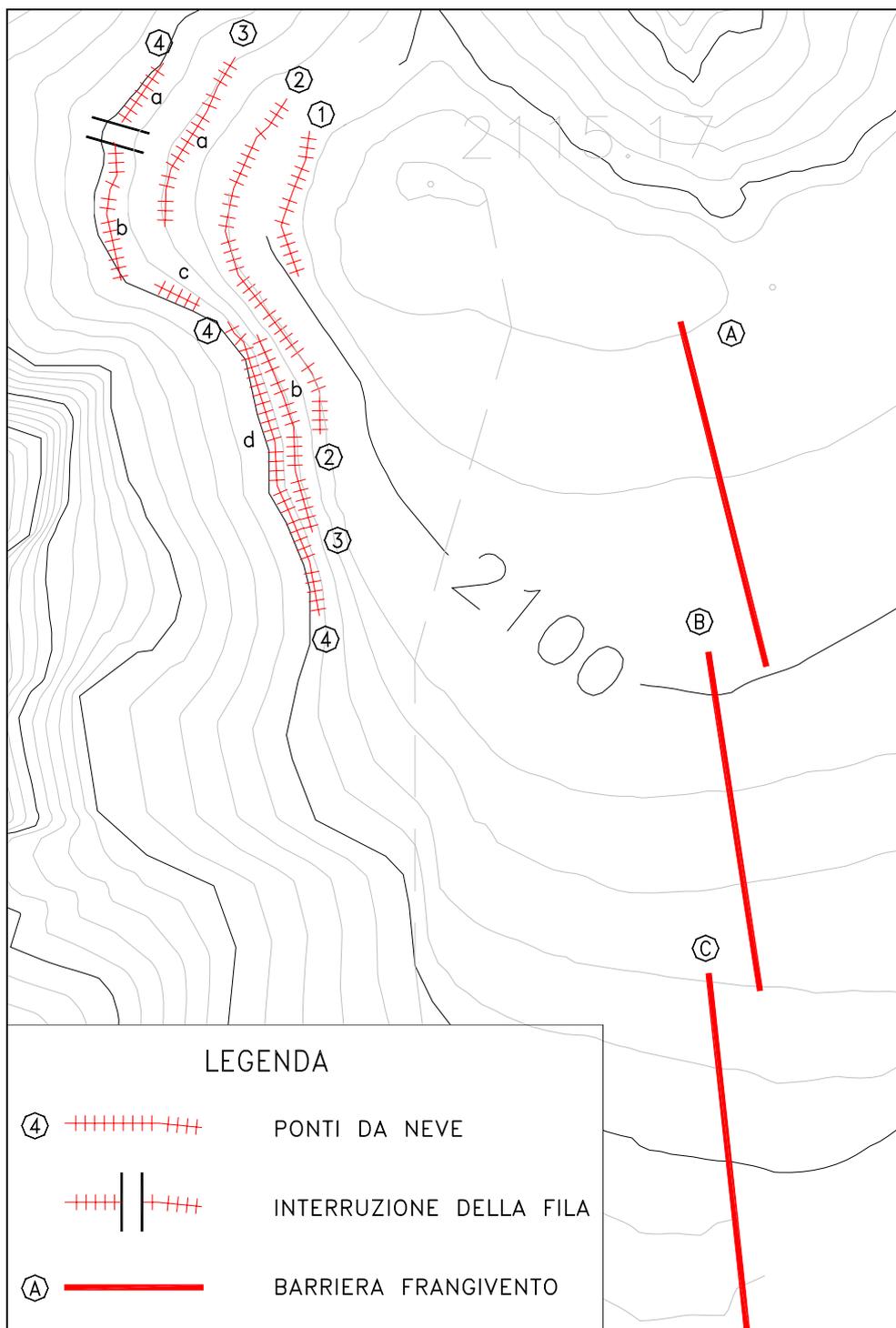
**Figura H.8-** *Opere di difesa passiva in zona di arresto: argine di deviazione.*



**Figura H.9** *Opere di difesa passiva in zona di arresto: cunei di rallentamento*

### **H.3.3 Catasto delle opere di difesa in zona di distacco**

E' stata realizzata una descrizione dettagliata ed aggiornata delle opere di difesa attiva presenti sul sito in esame (sopralluogo nell'estate 2003), e effettuato l'esame sistematico del loro stato di conservazione e del relativo livello di efficienza. Il catasto delle opere comprende una documentazione in forma tabulare (vedi Tabelle H.1 e H.2) ed una in forma cartografica (vedi Figura H.10); è stato inoltre corredato da una adeguata documentazione fotografica.



**Figura H.10 -** *Catasto delle opere: rappresentazione cartografica delle opere di difesa ubicate alla testata della Valle Mencucca*

DATI IDENTIFICATIVI				DATI TIPOLOGICI					STATO DI CONSERVAZIONE ED EFFICIENZA	
No. Opera [No. prog.] <sup>1</sup>	Zona [cod.]	Quota [m.s.l.m.]	Periodo [anno costr.]	Tipo opera [cod.]	Altezza [m]	Lunghezza [m]	No. elementi [campate/traverse <sup>2</sup> ]	Fondazioni [cod.]	Classe [cod.]	Note
A	D	2110/2100	1997/01	BFL	4,5	70	20/10	FM <sup>3</sup>	1	- 6 traversine longitudinali danneggiate (generalmente quelle inferiori), da riparare o sostituire. - Serraggio bullonatura controventi
B	D	2100/2085	1997/01	BFL	4,5	70	20/10	FM	1	- Serraggio bullonatura controventi
C	D	2085/2065	1997/01	BFL	4,5	70	20/10	FM	1	- Serraggio bullonatura controventi
1	D	2100	1997/01	PNF	2,65	28,5	9/6	FM <sup>4</sup>	1	-
2	D	2095	1997/01	PNF	2,65	75,5	24/6	FM	1	-
3a	D	2085	1997/01	PNF	2,65	22	7/6	FM	1	-
3b	D	2085	1997/01	PNF	2,65	44	13/6	FM	1	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Tabella H.1 - Estratto catasto opere: zona Valle Mencucca (barriere frangivento e prime 3 file ponti da neve)**

DATI IDENTIFICATIVI				DATI TIPOLOGICI					STATO DI CONSERVAZIONE ED EFFICIENZA	
No. Opera [No. prog.]	Zona [cod.]	Quota [m.s.l.m.]	Periodo [anno costr.]	Tipo opera [cod.]	Altezza [m]	Lunghezza [m]	No. elementi [campate/traverse]	Fondazioni [cod.]	Classe [cod.]	Note
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
5a	D	1980	1997/01	PNF	2,65	167	53/6	FM	1	Campata di estremità (sx): traverse n. 5 e 6 leggermente deformate (probabilmente a causa di scaricamenti di neve, senza perdita di funzionalità per l'elemento)
5b	D	1980	1997/01	PNF	2,65	3,3	1/6	FM	1/2	Grosso masso depositato tra le traverse superiori (n. 5 e n. 6), da rimuovere
5c	D	1980	1997/01	PNF	2,65	16	5/6	FM	2/3	Danni consistenti alle campate n. 2, 3, 4 (puntone piegati, 4 traverse mancanti); elementi da sostituire Masso depositato sulla campata n. 1 (traverse n. 4 e n. 5, Vol $\approx 0,2m^3$ )
5d	D	1980	1997/01	PNF	2,65	9,5	3/6	FM	1	-
5e	D	1980	1997/01	PNF	2,65	47,5	15/6	FM	1	-
5f	D	1988	1997/01	PNF	2,65	16	5/6	FM	1	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

**Tabella H.2 - Estratto catasto opere: zona Valle di Pietra Quadra (fila n.5)**

<sup>1</sup> I numeri/codici delle opere fanno riferimento a quelli utilizzati in Figura G.10

<sup>2</sup> Traverse delle barriere frangivento in larice. Lunghezza=400cm; Altezza=20cm, Spessore=1,5cm

<sup>3</sup> Fondazioni su micropali sia per il montante che per il puntone delle barriere frangivento. Caratteristiche principali: (i) diametro di perforazione  $\phi=100mm$  e camicia in ferro FE510; (ii) lunghezza perforazione pari a 3,5 metri per il montante e 2,5 metri per il puntone.

<sup>4</sup> Fondazioni su micropali sia per il montante che per i due puntone dei ponti da neve. Caratteristiche principali: (i) diametro di perforazione  $\phi=100mm$  e camicia in ferro FE510; (ii) lunghezza perforazione pari a 2,5 metri per il puntone di valle 2 metri per il puntone di monte. La fondazione per il montante è realizzata mediante tirante con foro di perforazione  $\phi=100mm$  e barra di armatura FEB44K.

Attualmente, lo stato di conservazione ed efficienza delle opere di difesa attiva presenti sul sito in esame appare nel complesso buono, indubbiamente anche in virtù della recente realizzazione. Le opere di ritenuta ed i frangivento ubicati in Valle Mencucca non presentano danneggiamenti significativi né agli elementi strutturali né alle fondazioni. Si sono rilevati solo danni ad alcune traverse delle barriere frangivento che necessitano di riparazione e/o sostituzione. Analogo discorso vale per le opere di ritenuta ubicate nella Valle di Pietra Quadra, che appaiono nel complesso ben conservate ed efficienti, ad esclusione di alcuni elementi ubicati in corrispondenza dello spartiacque tra la zona di distacco tributaria del Canale di Pietra Quadra e quella tributaria del Canale Centrale. Tale zona risulta infatti soggetta a scaricamenti di materiale roccioso e/o nevoso proveniente dalle pendici sommitali del versante occidentale della Pietra Quadra.

## **H.4 INDAGINE STORICO-DOCUMENTALE**

### **H.4.1 Raccolta dei dati storici**

Scopo di questa parte dello studio è la ricostruzione dei principali eventi valanghivi che in passato hanno interessato il sito. A tal fine si è proceduto alla raccolta ed analisi di tutte le informazioni storiche disponibili, desumibili in particolare da:

- schede di rilievo "post-evento" (Modello 7 AINEVA e/o moduli simili);
- schede di rilevamento e "report" allegati alla C.L.P.V.;
- testimonianze scritte (articoli di giornale, archivi comunali e/o parrocchiali, archivio di stato, ecc.) e orali (interviste a testimoni del luogo);
- testimonianze fotografiche.

L'analisi comparativa delle differenti fonti ha consentito di individuare e correggere eventuali errori presenti nella documentazione disponibile. Una parte consistente della documentazione storica raccolta, soprattutto con riferimento agli eventi più recenti nel tempo, è stata fornita dal Corpo Forestale dello Stato - Coordinamento Provinciale di Bergamo. In effetti a partire dall'inverno 1974/75 l'Ispettorato Regionale delle Foreste di Milano ha condotto un'opera sistematica di rilevamento e di elaborazione dei dati relativi alle valanghe della montagna lombarda, finalizzata alla redazione della "Carta delle

Valanghe della Lombardia". I dati relativi ad eventi valanghivi documentati raccolti dalla Forestale sono sintetizzati in schede catastali (su base cartacea) aventi una struttura molto simile al Modello 7 Aineva. Nel seguito del presente studio ci si riferirà a tali informazioni storiche come "Schede Valanghe della Forestale". Presso l'Archivio di Stato di Bergamo sono invece state reperite molte utili informazioni relative all'evento catastrofico del Gennaio 1810 (Figura H.3).

In generale, le informazioni storiche raccolte raramente consentono una ricostruzione completa dell'evento, e tipicamente si limitano alla segnalazione (diretta o indiretta) della quota minima raggiunta dalla valanga nella zona di arresto. Fanno eccezione a tal riguardo le schede valanghe della forestale. In tale caso talvolta le informazioni disponibili comprendono anche le caratteristiche al distacco (quota massima, spessore dello strato di neve mobilizzato, larghezza della linea di frattura) ed una descrizione della forma e delle dimensioni dell'accumulo (lunghezza, larghezza, altezza massima del deposito).

L'analisi delle testimonianze storiche evidenzia chiaramente che la valanga in passato ha raggiunto con notevole frequenza l'area di fondovalle, depositando le masse nevose in differenti posizioni sul conoide. Talvolta il deposito ha raggiunto l'alveo del fiume Brembo e l'adiacente Strada Provinciale e, in taluni casi, la valanga ha interessato le abitazioni della frazione Trabuchello, producendo consistenti danni e numerose vittime.

Con riferimento agli eventi valanghivi più lontani nel passato si segnalano tra i principali:

- 22 Gennaio 1810: una parte considerevole dell'abitato di Trabuchello che sorgeva nei prati adiacenti alla chiesa viene distrutto da una valanga; si contano 28 vittime (vedi Figura H.3);
- Febbraio-Marzo 1888: la valanga si arresta a ridosso dell'abitato senza provocare vittime (tale evento è riprodotto in un "ex-voto" contenuto nella chiesa di Trabuchello, vedi Figura H.11);
- 1 Aprile 1917: la valanga causa nuovamente gravi danni all'abitato di Trabuchello, senza però provocare vittime; il ramo della valanga che segue l'alveo del torrente raggiunge il Brembo e si unisce al deposito di

- una valanga proveniente dal versante opposto (la n. 1 della CLPV, vedi Figura H.2);
- 11 Febbraio 1951: la valanga raggiunge nuovamente l'abitato, e divelle un traliccio della linea ad alta tensione in prossimità del Brembo;
- Inverno 1972: l'argine di contenimento realizzato in zona di conoide nel 1971 viene scavalcato da una valanga di neve radente, che piega i profilati metallici posti alla sua sommità (vedi Figura H.5).

Si deve osservare che nella documentazione disponibile presso l'Archivio di Stato si sono trovati riscontri che indicano un altro evento valanghivo antecedente al 1810 che ha interessato la frazione Trabuchello, probabilmente occorso nel secolo precedente. In una relazione di poco successiva alla data dell'evento del gennaio 1810 l'Ingegnere in Capo del Dipartimento del Serio, Ing. Vidali, scrive quanto segue: " ... *ma siccome si va che un'altra volta fu Trabuchello ingoiato da una valanga, così sembrando bastare due verificati casi ....*" e poi ancora: " ... *che il paese di Trabuchello il cui solo nome è per se medesimo di mall'augurio non si deva mai più ricostruire nell'identico locale in cui ne rimangono le reliquie, affinché non si rinnovelli un terzo tanto funesto esempio ...*".



**Figura H.11** - Quadro votivo custodito nella chiesa di Trabuchello, raffigurante l'evento valanghivo dell'inverno 1888.

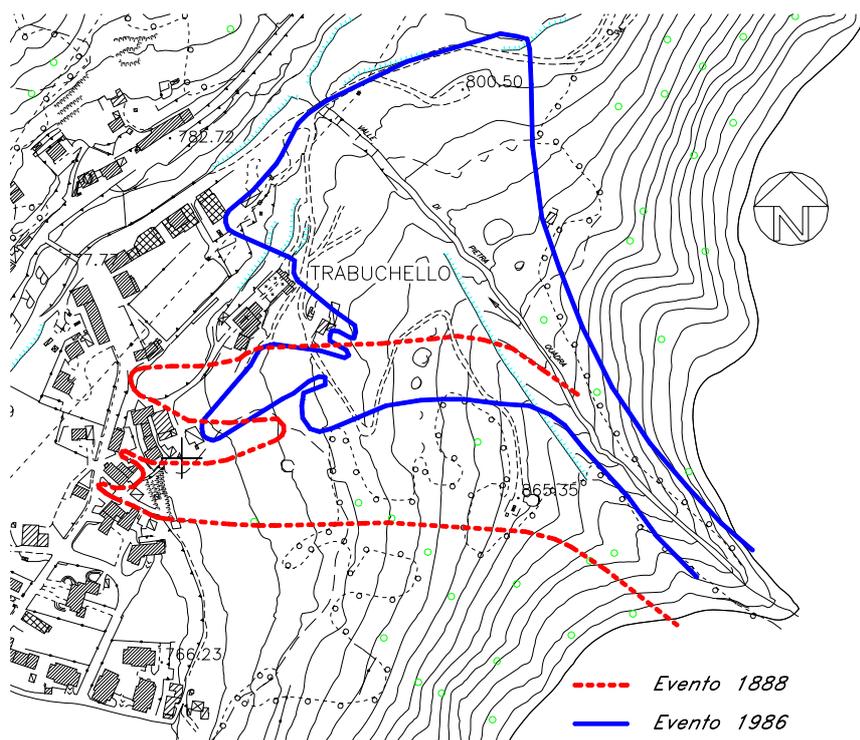
Con riferimento a tempi più recenti, nelle schede valanghe della forestale (registrazioni sistematiche effettuate dal 1974) sono riportati eventi valanghivi sul fondovalle nelle seguenti date: 12.01.1977; 21.02.1977; 13.01.1978; 28.01.1978; 1979 (varie); 05.02.1980; 22.12.1983; 27.02.1984; 29.03.1984; 17.01.1985; 01.02.1986; 22.04.1986; 19.02.1987; 08.01.1994. Successivamente al 1994 non sono più stati registrati mediante le *Schede della Forestale* eventi valanghivi in grado di raggiungere il fondovalle. In realtà l'analisi della documentazione fotografica raccolta fornisce testimonianza di un evento della primavera del 1997 arrestatosi in corrispondenza della zona apicale del conoide.

Tra gli eventi riportati nelle *Schede della Forestale* vale la pena di citare quello del 12 Gennaio 1977, in quanto raro caso in cui la valanga fu in grado di formare una consistente componente polverosa, che abbatté numerosi alberi d'alto fusto sui bordi del canalone di scorrimento. Un altro evento di rilievo tra quelli di più recente accadimento è sicuramente quello del Febbraio 1986. Con riferimento a quest'ultimo evento, la documentazione fotografica raccolta (vedi Figura H.6) ha consentito la realizzazione di una perimetrazione di prima approssimazione del deposito della valanga, riportata in Figura H.12; tale analisi ha evidenziato alcune lievi difformità con la perimetrazione storica riportata nella CLPV (Figura H.2), in cui probabilmente sono stati leggermente sottostimati i limiti laterali di espansione della valanga in destra idrografica del conoide.

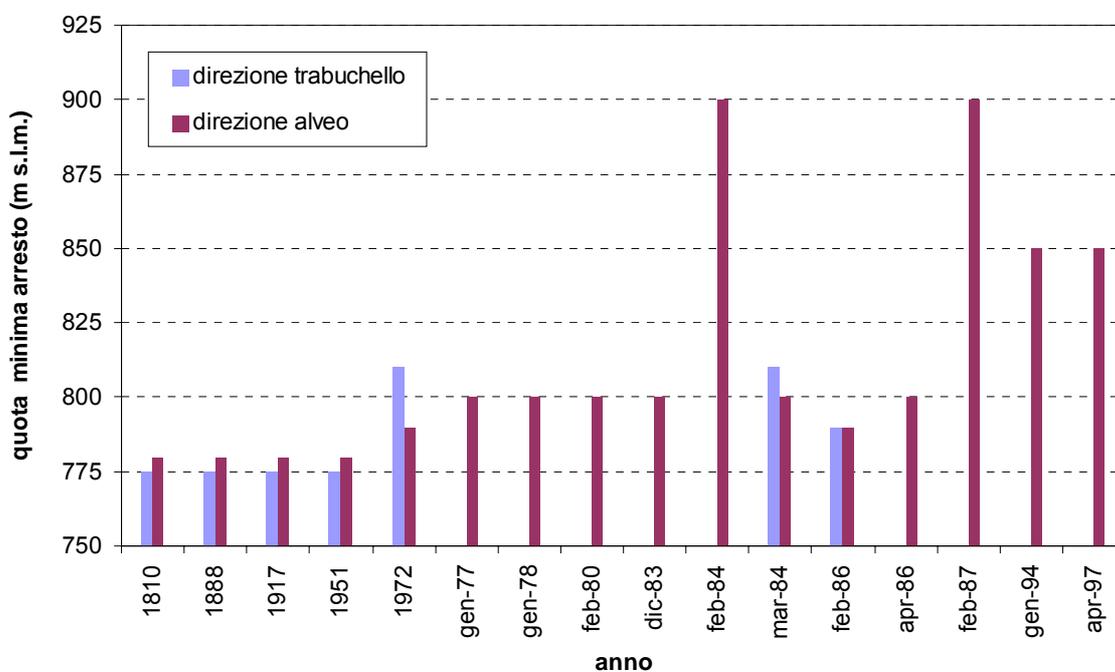
#### **H.4.2 Analisi dei dati storici**

In Figura H.13 sono sintetizzati i principali riscontri storici disponibili per la valanga "Valle di Pietra Quadra", in termini di quota minima raggiunta dalla valanga in corrispondenza di un determinato evento documentato. Tale analisi è stata effettuata, nei limiti di accuratezza delle informazioni disponibili, considerando due direzioni preferenziali di espansione della valanga:

- quella classica, ovvero lungo l'alveo del torrente;
- quella più occasionale, ovvero in direzione della chiesa e dell'abitato di Trabuchello.



**Figura H.12 -** Perimetrazione di massima del deposito dell'evento del 31/1-01/2 1986, effettuata sulla base della documentazione fotografica. Con il tratteggio è indicato il limite di espansione dell'evento dell'inverno 1888, ottenuto interpretando la rappresentazione dell'evento contenuta nel quadro votivo (Figura H.11).



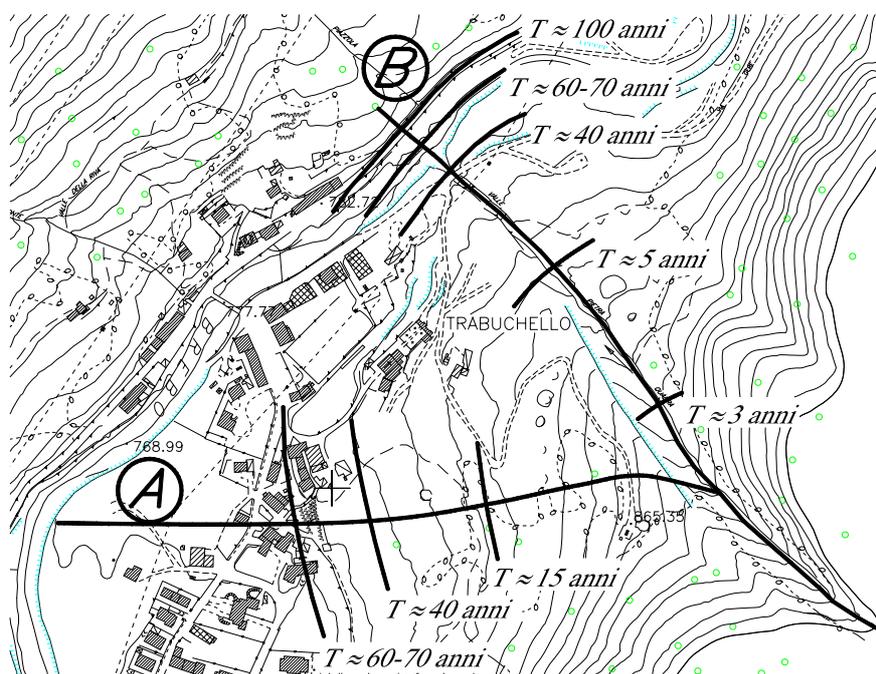
**Figura H.13 -** Quota minima di arresto (asse delle ordinate) per eventi storici documentati (in ascisse è indicato l'anno di accadimento degli eventi conosciuti)

Sulla base di tali dati ed in accordo ai criteri descritti in Appendice B - § B.2.3, è stato possibile effettuare una caratterizzazione di prima approssimazione della periodicità con cui, sul sito in esame, si può manifestare un evento di determinata "magnitudo", intesa in questo caso come quota minima di arresto della valanga (equazione B.9).

Nel fare tale quantificazione si è avuta l'accortezza di considerare un numero di intervalli di tempo differente in dipendenza della tipologia di evento considerato. In particolare per gli eventi di magnitudo maggiore (interessamento dell'abitato di Trabuchello – quota di arresto pari a circa 775-790 m s.l.m. - e raggiungimento dell'alveo del fiume Brembo – quota di arresto pari a circa 780-790 m s.l.m.) si è considerata tutta la serie storica disponibile (le registrazioni di tali eventi possono essere considerate sistematiche a partire dal primo evento conosciuto, ovvero dal 1810); viceversa per eventi di magnitudo minore (arresto lungo l'alveo in corrispondenza del muro di deviazione – quota di arresto pari a circa 820-850 m s.l.m.) l'intervallo di registrazione considerato è stato ritenuto sistematico solo a partire dal 1975 (cioè in corrispondenza dell'inizio delle registrazioni delle valanghe sul fondovalle da parte della forestale), ovvero si è ritenuto sensato ammettere che prima del 1975 (è ancor più nel corso dell'800) qualche evento possa essere arrivato sulla parte alta del conoide senza essere peraltro registrato, vista la sua limitata "minaccia" per le infrastrutture e abitazioni poste sul fondovalle. Per eventi di magnitudo intermedia (quali ad esempio quelli che hanno comportato il sormonto dell'argine sinistro all'entrata del conoide senza tuttavia interessare l'abitato – quota di arresto pari a circa 810-820 m s.l.m.) si è ritenuto sensato considerare sistematico l'intervallo di registrazioni relative all'ultimo secolo. I risultati di tale analisi sono sintetizzati nella Figura H.14.

Con riferimento alla direzione di espansione più ordinaria, ovvero lungo l'alveo del torrente, si è ottenuto un tempo di ritorno per le valanghe in grado di raggiungere quota 850 m s.l.m. circa (ovvero la parte apicale del conoide) pari a circa 2÷3 anni, mentre il raggiungimento della parte mediana del conoide (820 m s.l.m. circa, in corrispondenza della fine dell'argine di deviazione) appare verificato con un intervallo di tempo medio di circa 5 anni. Il raggiungimento della strada agro-silvo-pastorale di fondovalle risulta verificato con un tempo di ritorno medio di circa 40 anni, mentre il raggiungimento dell'alveo del Brembo con un tempo di ritorno medio di circa 60÷70 anni. Sulla base dei dati disponibili

si può inoltre osservare che l'ostruzione del Brembo con interessamento della strada provinciale sembra essere un accadimento a cadenza quantomeno secolare. La direzione di espansione più occasionale, ovvero quella relativa al sormonto dell'argine sinistro con deflusso in direzione dell'abitato di Trabuchello, appare caratterizzata da una periodicità di circa 15 anni. L'arresto in prossimità dell'abitato (790 m s.l.m. circa) ha un tempo di ritorno medio di circa 40 anni, mentre la possibilità che le masse nevose interessino le abitazioni prossime alla chiesa (quota di arresto di circa 775 m s.l.m.) risulta caratterizzata da una periodicità di circa 60÷70 anni.



**Figura H.14** - Distanze di arresto della valanga in funzione del tempo di ritorno, stimate sulla base delle informazioni storiche disponibili: (lungo le due direzioni principali di espansione della valanga, indicate con le lettere "A" e "B").

Appare importante osservare che le rilevanti bonifiche effettuate in zona di distacco ed in zona di arresto (vedi § H.3) hanno mutato in maniera sostanziale le condizioni del sito valanghivo rispetto a quelle relative agli eventi del passato utilizzati per effettuare la perimetrazione su base storica. Il risultato di tale analisi ha pertanto valenza puramente indicativa, e non appare pienamente rappresentativo della situazione attuale. Peraltro, come discusso in maggior dettaglio nel seguito, tali risultati hanno rappresentato un utile ausilio in fase di taratura del modello ed hanno fornito un utile controllo sui risultati delle

simulazioni di dinamica. In effetti la caratterizzazione dei limiti massimi di espansione di eventi valanghivi caratterizzati da fissata periodicità finalizzata alla redazione del P.Z.E.V. è stata effettuata simulando la dinamica di valanghe di progetto caratterizzate da scenari di distacco rappresentativi di tempi di ritorno prefissati (§ H.6); in tale contesto è stato possibile tenere in debito conto le attuali condizioni morfologiche e vegetative del sito valanghivo, nonché delle opere di difesa realizzate.

## **H.5 ANALISI NIVOMETEOROLOGICHE**

Le analisi nivometeorologiche sono state divise in due sezioni distinte. La prima (§ H.5.1) è relativa allo studio di parametri nivometrici (in particolare della precipitazione nevosa su tre giorni consecutivi) mentre la seconda (§ H.5.2) si riferisce ai dati di ventosità.

### **H.5.1 Dati nivometrici (*DH3gg*)**

#### *H.5.1.1 Introduzione*

In questa parte dello studio viene effettuata una analisi statistica a “scala regionale” del parametro nivometrico di progetto con riferimento al calcolo della dinamica delle valanghe (vedi Appendice D): l'incremento di spessore del manto nevoso su tre giorni consecutivi di precipitazione nevosa (nel seguito indicato con *DH3gg*). La regionalizzazione è effettuata con riferimento al versante meridionale delle Alpi Orobiche, in particolare al territorio montano della Provincia di Bergamo rappresentato dall'Alta Val Brembana e dall'Alta Val Seriana. Un approccio di tipo “regionale” all'analisi statistica dei dati di innevamento (Appendice C, § C.6) rispetto alla classica statistica inferenziale “sito-specifica” (ovvero basata sui dati registrati da un'unica stazione di misura) consente di combinare i dati relativi a differenti stazioni di rilevamento nivometeorologico (una volta verificatane, mediante opportuni test statistici, l'omogeneità), con il duplice vantaggio di:

- ✓ estendere il campione di dati, migliorando l'accuratezza della stima delle variabili nivometriche di progetto in siti strumentati (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);

- ✓ consentire adeguate stime delle variabili nivometriche di progetto in siti non strumentati (tipicamente le zone di distacco delle valanghe).

La scelta di effettuare la "regionalizzazione" sul territorio rappresentato dall'Alta Val Brembana e dall'Alta Val Seriana ha una duplice motivazione: (i) l'area valanghiva oggetto del presente studio è compresa in tale ambito territoriale; (ii) in un recente studio avente per oggetto l'analisi della distribuzione spaziale delle precipitazioni nevose in Lombardia (Brancaccio, 2000) le caratteristiche di innevamento di tale area si sono mostrate relativamente omogenee e comunque ben distinte da quelle relative ad altre zone delle Alpi Lombarde (quali ad esempio la Valtellina, la Val Chiavenna e la Val Camoinica).

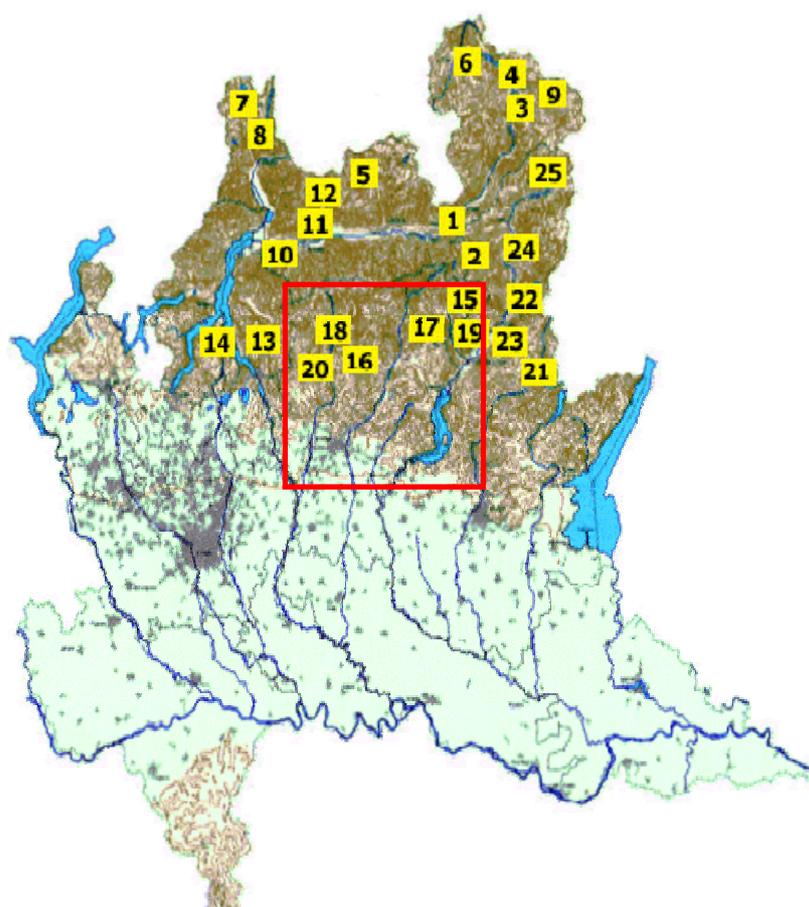
#### H.5.1.2 Dati utilizzati

L'elenco delle stazioni manuali di riferimento adottate nello studio a "scala regionale", con la relativa ubicazione altimetrica, è riportato nella Tabella H.3. Tali stazioni appartengono alla rete di rilevamento gestita, con l'ausilio di osservatori esterni, dal Centro Nivometeorologico di Bormio (SO). Alle Figure H.15 e H.16 è evidenziata, a differenti scale, l'ubicazione geografica delle stazioni utilizzate.

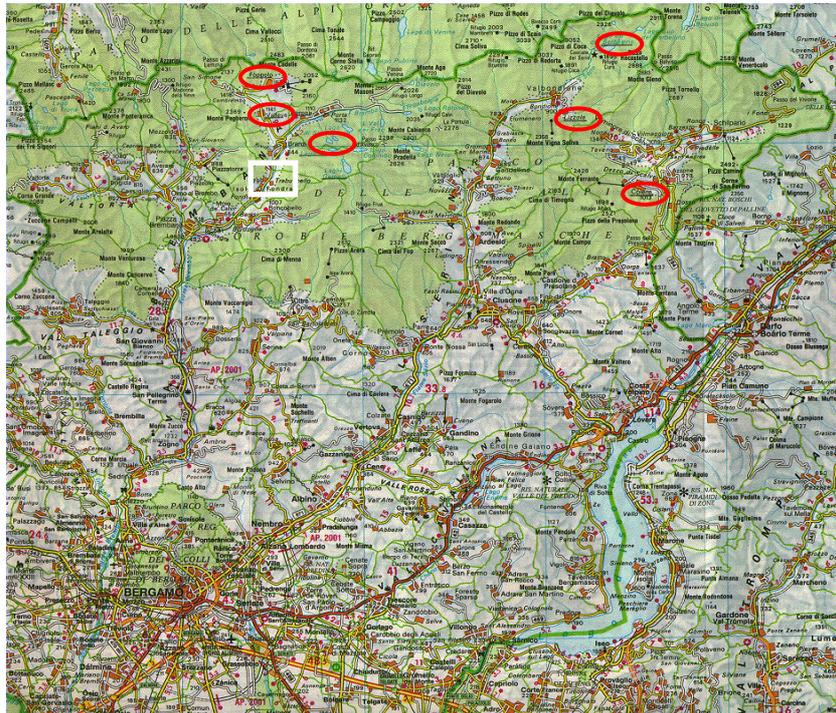
Codice Stazione	Nome Stazione	Quota (m s.l.m.)	No. anni disponibili	Serie Storica
BAR	Barbellino	1880	21	1981/82-2001-02
CAR	Carona	1850	27	1974/75-2001-02
FOP	Foppolo	1695	23	1974/75-2001-03
LIZ	Lizzola	1560	14	1983/84-2001-02
POL	Colere M. Polzone	1580	19	1983/84-2001-03
VAL	Valleve S. Simone	1650	22	1977/78-2001-02

**Tabella H.3 -** *Dati generali delle stazioni di rilevamento nivometeorologico utilizzate nello studio. Per serie storica si intende l'ampiezza massima dell'intervallo di registrazione; in alcuni casi le serie storiche indicate presentano però dei "buchi", ovvero degli anni privi di registrazioni, e conseguentemente il numero di anni disponibili risulta inferiore dell'ampiezza della serie storica.*

Si deve rilevare innanzitutto come nell'area in esame vi sia un buon numero di stazioni nivometeorologiche (6) con una distribuzione spaziale piuttosto omogenea (Figure H.15 e H.16). Tali stazioni presentano serie storiche piuttosto omogenee, con dati registrati su un periodo variabile tra 20 e 25 anni. La Tabella H.3 evidenzia inoltre come l'ubicazione altimetrica delle stazioni sia distribuita tra circa 1500 e 2000 m s.l.m.; la definizione dei dati nivometrici di progetto a quote superiori o inferiori all'intervallo di quote caratteristico delle stazioni considerate andrà pertanto effettuata con le opportune cautele, come discusso più in dettaglio al § H.5.1.3.



**Figura H.15 -** Ubicazione delle stazioni di rilevamento nivo-meteorologico (manuali) gestite dal Centro di Bormio. In particolare in rosso è evidenziato l'ambito territoriale a cui si riferisce l'analisi regionale svolta nel presente studio (Alta Val Brembana e Alta Val Seriana), e le stazioni di riferimento adottate (15: Barbellino; 16: Carona; 17: Colere M. Polzone; 18: Foppolo; 19: Lizzola; 20: Valleve S. Simone). Nella successiva Figura G.16 è fornita una visione ad una scala superiore della zona delimitata in rosso



**Figura H.16 -** Ubicazione delle stazioni di rilevamento nivometeorologico dell'Alta Val Brembana e Alta Val Seriana considerate nel presente studio (in rosso); in bianco è indicata l'ubicazione dell'area di studio.

### H.5.1.3 Analisi regionale

I dati relativi alla variabile di interesse ( $DH3gg$ ) sono stati informatizzati ed elaborati. Dai dati giornalieri di  $H_s$  (altezza del manto nevoso al suolo) sono stati ricavati per le 6 stazioni utilizzate nello studio i valori massimi mensili, e quindi i valori massimi annui, di  $DH3gg$ , riportati in Tabella H.4.

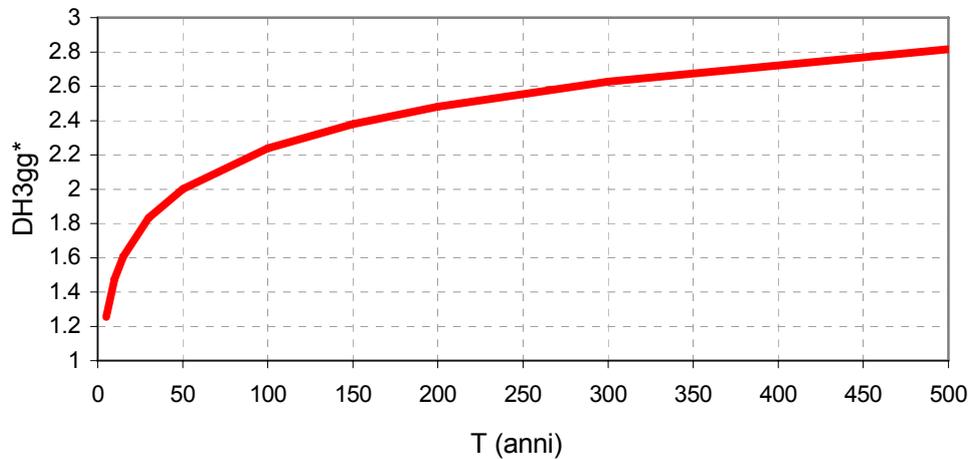
L'analisi regionale è stata condotta su tutte le stazioni di Tabella H.3; i dati relativi a tali stazioni, pur risultando caratterizzati da un modesto grado di disomogeneità (CV dei CV pari a circa 0.26, vedi Tabella H.4) verificano infatti il criterio: "CV dei CV < 0.4". L'analisi regionale è stata condotta utilizzando il "metodo del valore indice" (Appendice C - § C.6.1); i parametri della curva di crescita regionale sono stati stimati come media dei PWM (Appendice C - § C.6.3).

<b>DH3gg: massimi annuali (cm)</b>						
Anno	Stazione					
	Barbellino 1880 mslm	Carona 1850 mslm	Foppolo 1695 mslm	Lizzola 1560 mslm	Colere 1580 mslm	Valleve 1650 mslm
74-75	-	67	106	-	-	-
75-76	-	98	67	-	-	-
76-77	-	113	98	-	-	-
77-78	-	148	114	-	-	109
78-79	-	73	67	-	-	68.6
79-80	-	130	100	-	-	105
80-81	-	95	77	-	-	79.1
81-82	85	73	83	-	-	68.6
82-83	102	78	65	-	-	71.0
83-84	114	123	113	90	81	108
84-85	116	155	100	88	80	110
85-86	158	260	190	88	100	144
86-87	123	110	91	102	107	102
87-88	76	72	66.3	63	54	69
88-89	88.5	50.7	52.4	68.7	60	58
89-90	85.7	69	64.4	66.6	57	49
90-91	141	58	57.2	101.0	106	61.5
91-92	143	150	93	112.3	122	109
92-93	93.3	63	55	72.2	65	69
93-94	154	203	185	114.4	125	121
94-95	74	50	46	56	47	47
95-96	91	78	60	92	79	68
96-97	80	44	57	60	50	46
97-98	92	113	77	58	47	103
98-99	111	120	103	100	104	87
99-00	114	95	84	90	98	80
00-01	95	50	79	69.4	61	50
01-02	65	66	62.4	61.0	49	67
media	104.8	103.1	86.5	81.7	78.5	82.8
dev.st	26.7	50.3	35.2	19.1	26.5	26.5
max	158	260	190	114	125	144
min	65.0	44.0	46.0	56.0	47.0	46.0
CV	0.255	0.488	0.407	0.234	0.338	0.320

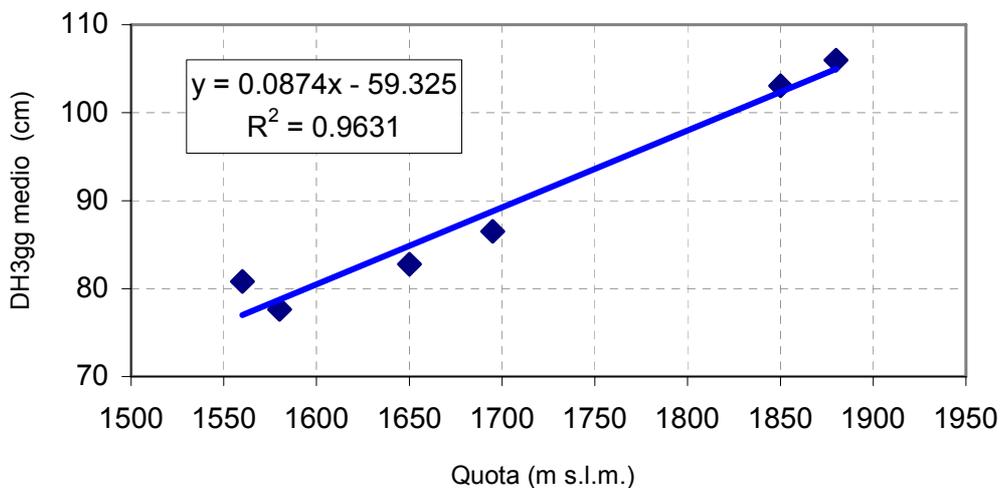
**Tabella H.4 -** *Massimi annui di DH3gg per le 6 stazioni di misura considerate*

In Figura H.17 si riporta la *Curva di Crescita Regionale* ottenuta per *DH3gg\**, mentre in Figura H.18 si riporta l'andamento del valore medio di *DH3gg* in funzione della quota, ottenuto regredendo i valori medi di *DH3gg* relativi alle 6 stazioni considerate con le relative quote. Si è ottenuta una buona correlazione tra il valore medio di *DH3gg* e la quota ( $R^2=0.96$ ); la retta di regressione di Figura H.18, che ha validità con riferimento al territorio dell'Alta

Val Brembana e dell'Alta Val Seriana, fornisce un tasso di incremento di  $DH3gg$  medio con la quota pari a circa 10 cm ogni cento metri di dislivello.



**Figura H.17** - Curva di crescita regionale per  $DH3gg^*$ , valida per il territorio dell'alta Val Brembana e Alta Val Seriana. Legge di ripartizione utilizzata: GEV (Equazione C.40). Metodo di stima dei parametri: media regionale dei momenti pesati in probabilità (PWM). Valori dei parametri:  $k=-0.052$ ,  $\alpha=0.270$ ,  $u=0.832$ .



**Figura H.18** - Andamento di  $DH3gg$  medio con la quota. L'equazione in Figura si riferisce alla regressione sulle sei stazioni.

Nella Tabella H.5 si riporta la sintesi dei risultati dell'analisi regionale per le grandezza nivometrica in esame, ottenuti combinando i risultati di Figura H.17 e H.18 (Appendice C - equazione C.41). I risultati presentati, alla luce di quanto esposto, hanno validità su tutto l'ambito territoriale rappresentato dall'Alta Val Brembana ed Alta Val Seriana.

Appare inoltre utile osservare che i dati tabulati in Tabella H.5 possono essere ritenuti relativamente accurati con riferimento alle estrapolazioni temporali, ovvero ai tempi di ritorno coperti (proprio grazie alla regionalizzazione effettuata sui dati di partenza), mentre minore accuratezza va attribuita alle estrapolazioni spaziali, in particolare ai dati relativi a quote molto differenti da quelle delle stazioni campione (che come detto coprono l'intervallo approssimativo 1500-2000 m s.l.m.); pertanto i valori tabulati relativi a quote inferiori a 1300-1200 m s.l.m. e superiori a 2200-2300 m s.l.m. sono puramente indicativi e vanno presi con le dovute cautele.

DH3gg(T,z) (cm)	Tempo di ritorno (anni)									
	Quota (mslm)	5	10	15	30	50	100	150	200	300
1000	35	41	45	51	56	63	67	70	74	79
1100	46	54	59	67	74	82	88	91	97	104
1200	57	67	73	83	91	102	108	113	120	128
1300	68	80	87	100	109	121	129	135	143	153
1400	79	93	101	116	126	141	150	156	166	178
1500	90	106	115	132	144	161	171	178	189	202
1600	101	119	129	148	161	180	192	200	212	227
1700	112	132	143	164	179	200	212	221	235	251
1800	123	145	158	180	196	219	233	243	257	276
1900	134	158	172	196	214	239	254	265	280	301
2000	145	171	186	212	231	258	275	287	303	325
2100	156	184	200	228	249	278	296	308	326	350
2200	167	196	214	244	266	298	316	330	349	374
2300	178	209	228	260	284	317	337	352	372	399
2400	189	222	242	276	301	337	358	373	395	424
2500	200	235	256	292	319	356	379	395	418	448

**Tabella H.5** - *Precipitazione nevosa su tre giorni consecutivi (DH3gg) in Alta Val Brembana e Alta Val Seriana per prefissate periodicità e tempi di ritorno; tecnica di regionalizzazione di tipo "metodo del valore indice" ("index-flood"), metodo di stima della curva di crescita regionale di tipo GEV/RAPWM (distribuzione GEV, con parametri stimati come media regionale dei momenti pesati in probabilità).*

## H.5.2 Dati di ventosità

### H.5.2.1 Introduzione

In questa parte dello studio si analizzano i dati di ventosità relativi all'area in esame. Tale tipo di analisi è importante in quanto consente di valutare i possibili effetti legati al trasporto di neve da vento nelle zone di

distacco; è infatti ben nota l'influenza che il vento ha nella redistribuzione delle masse nevose, e quindi sia sulla propensione alla valangosità dei pendii che sull'entità dei sovraccarichi da vento da utilizzare nella definizione delle relative altezze di distacco. In questo paragrafo si affronterà pertanto un'analisi dei venti relativi all'area di studio con il duplice scopo di:

- (a) caratterizzare le direzioni prevalenti dei venti, in maniera da individuare nel sito in esame le zone di potenziale distacco maggiormente esposte ai sovraccarichi da vento;
- (b) caratterizzare l'intensità dei venti, parametro essenziale per quantificare i sovraccarichi indotti dal trasporto di neve ventata da considerare nella definizione delle altezze di distacco sui pendii sottovento. La caratterizzazione dell'intensità dei venti verrà affrontata statisticamente, in maniera tale da poter associare la stima di tali sovraccarichi al tempo di ritorno dell'evento di progetto considerato.

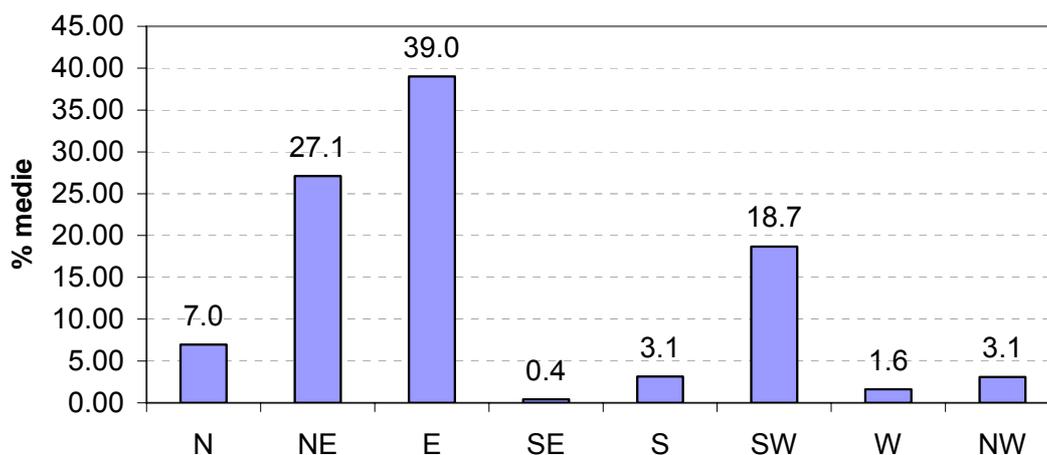
#### H.5.2.2 Grandezze esaminate e dati utilizzati

Nel contesto del presente rapporto è stata effettuata l'analisi statistica dei seguenti dati di ventosità: velocità del vento (media giornaliera); (ii) direzione del vento (valore modale giornaliero). Sono stati utilizzati i dati relativi alla stazione automatica di Carona Carisole (dotata di anemometro e ubicata alla quota 1950 m s.l.m.), che per quota e posizione può essere ritenuta rappresentativa delle caratteristiche dei venti sul sito in esame. A titolo esemplificativo sono stati considerati i dati relativi agli anni 1993-1998 (sei anni), pur consapevoli della limitata accuratezza di analisi inferenziali effettuate su serie storiche così limitate.

Come detto la statistica descrittiva sulla direzione del vento consente di individuare le zone di distacco che hanno maggiore probabilità di risultare sottovento e quindi di essere esposte ai fenomeni di trasporto di neve ventata. La caratterizzazione della velocità del vento consentirà invece di stimare il sovraccarico di neve ventata da aggiungere alla precipitazione nevosa (*DH3gg*) per la corretta stima dell'altezza di distacco degli eventi di progetto (vedi Appendice D, § D.2).

### H.5.2.3 Elaborazioni e risultati

Si è osservato che per tutti gli anni considerati la direzione prevalente del vento risulta quella relativa ai quadranti orientali e nord-orientali, con un valore di circa il 50% dei giorni dell'anno in cui il vento proviene da tali direzioni. Poiché però per l'analisi dei sovraccarichi di neve da vento quello che interessa sono i mesi invernali si è cercato di vedere se su tali mesi l'andamento percentuale della direzione del vento fosse differente rispetto a quello su scala annuale. L'analisi relativa ai primi quattro mesi dell'anno (Gennaio, Febbraio, Marzo e Aprile) ha fornito il risultato sintetizzato in Figura H.19. Il trend osservato su scala annua risulta ancora più accentuato se riferito ai soli mesi invernali, con un valore di circa il 70% dei giorni invernali (Gennaio-Aprile) in cui il vento proviene dai quadranti orientali e nord-orientali. Tale analisi permette di ritenere critici, con riferimento ai sovraccarichi di neve ventata, i pendii della zona di distacco esposti a Ovest ed a Sud-Ovest.



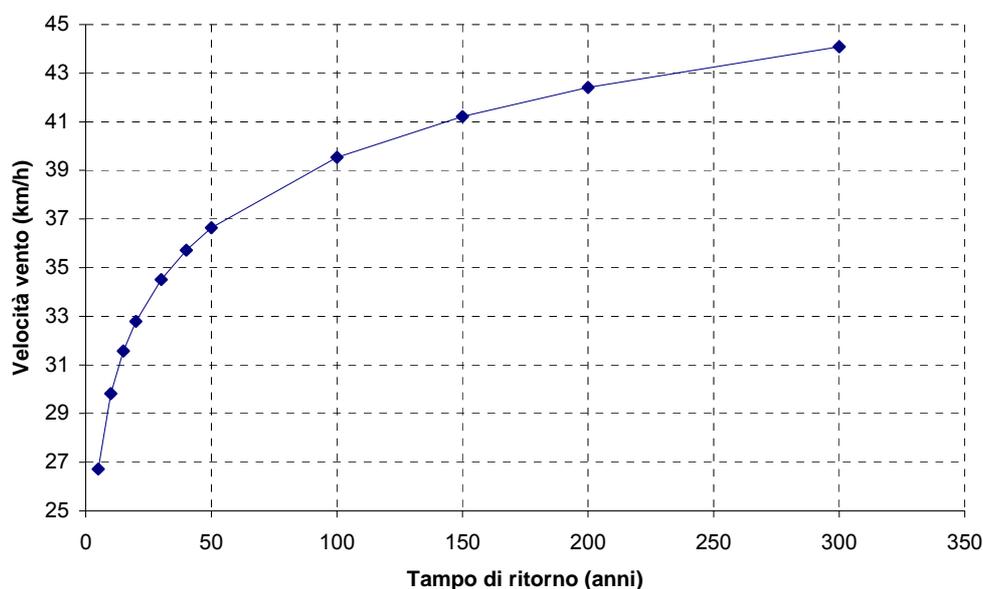
**Figura H.19 -** Stazione di Carona Carisole (1959 m s.l.m.): distribuzione percentuale delle direzioni del vento relativamente ai primi quattro mesi dell'anno (periodo di registrazione 1993-1998).

Con riferimento all'intensità del vento, i dati giornalieri di velocità media del vento relativi ai 6 anni disponibili per la stazione Carona Carisole sono stati informatizzati ed elaborati. Dai dati giornalieri di velocità media del vento sono stati ricavati i valori massimi mensili, e quindi i valori massimi annui (anche in questo caso per i motivi sopra esposti l'analisi è stata limitata ai soli mesi invernali). I risultati sono sintetizzati nella Tabella H.6.

Anno	1993	1994	1995	1996	1997	1998
$V_{\max}$ (km/h)	16.5	22.5	27.0	24.6	17.1	29.7

**Tabella H.6** - *Stazione Carona Carisole: massimi annui (limitatamente ai primi quattro mesi dell'anno) del valore medio giornaliero della velocità del vento.*

L'analisi inferenziale sulla serie storica dei massimi annui di Tabella H.6 (condotta in accordo ai criteri esposti in Appendice C - § C.1 e C.3), con i limiti legati al numero estremamente limitato dei dati disponibili, ha consentito di caratterizzare il legame tra il valore massimo invernale della velocità media giornaliera del vento ed il tempo di ritorno. A tal proposito i dati di Tabella H.6 sono stati regolarizzati mediante la funzione di distribuzione di probabilità di Gumbel (Appendice C - equazione C.27). I risultati sono presentati nella figura H.20. Si è ottenuto un valore massimo invernale della velocità media giornaliera del vento per tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni pari rispettivamente a circa 34.5, 39.5 e 44 km/h. Una analisi del tutto analoga è stata svolta con riferimento al valore medio sui tre giorni della velocità media giornaliera del vento. In questo caso l'analisi inferenziale sui dati disponibili (utilizzando sempre la legge di Gumbel) ha fornito un valore massimo invernale della media sui tre giorni della velocità media giornaliera del vento per tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni pari rispettivamente a 20.8, 23.2 e 25.4 km/h.



**Figura H.20** - *Stazione di Carona Carisole: valore massimo invernale della velocità media giornaliera del vento in funzione del tempo di ritorno (dati adattati con Legge di Gumbel, parametri stimati con il Metodo dei Momenti, MOM).*

## **H.6 MODELLISTICA MATEMATICA**

### **H.6.1 Introduzione**

La valutazione delle attuali condizioni di esposizione al pericolo di valanghe del sito, ai fini della redazione del P.Z.E.V., è stata effettuata mediante l'utilizzo di un modello "idraulico" di tipo "continuo" per la simulazione della dinamica dei moti valanghivi (vedi Appendice B - § B.3.2). E' stato utilizzato a tal proposito il modello VARA1D, messo a punto nel corso degli anni '90 dai ricercatori dell'Università degli Studi di Pavia e adatto per la simulazione di valanghe di tipo radente (VARA è infatti l'acronimo di VALanghe RAdenti). Per dettagli e approfondimenti in merito al modello VARA1D si vedano i seguenti riferimenti bibliografici: Barbolini, 1998 e 1999; Barbolini *et al.*, 2000; Barbolini e Cappabianca, 2003. L'utilizzo di tale modello ha valenza puramente esemplificativa e non rappresenta in alcun modo una indicazione di preferenza rispetto ad altri strumenti modellistici disponibili in letteratura e/o sul mercato.

Si deve osservare che nel contesto delle simulazioni di dinamica l'informazione ottenuta mediante la raccolta e l'analisi dei dati storici (§ H.4.) è risultata comunque molto utile. Infatti una volta effettuata una valutazione preliminare degli spazi di arresto raggiungibili da eventi con prefissate periodicità (vedi Figura H.14), questa informazione può essere utilizzata come supporto e/o verifica della taratura dei modelli di dinamica, la cui successiva applicazione è peraltro essenziale per ottenere tutte le informazioni necessarie in fase di mappatura (velocità, pressioni di impatto, distribuzione finale del deposito, ecc.). L'utilizzo del modello di dinamica VARA1D ha consentito anche di valutare opportunamente l'efficacia delle opere di difesa attualmente presenti in zona di distacco e di arresto (vedi § successivi).

### **H.6.2 Definizione degli scenari di simulazione**

La definizione dei dati di "input" del modello VARA1D, ovvero dei cosiddetti "scenari di simulazione", avviene attraverso la definizione delle variabili di seguito elencate.

1) *Profilo longitudinale di calcolo.*

Tale profilo è stato scelto sulla base delle caratteristiche morfologiche del sito (conformazione delle zone di distacco e di arresto), dei dati storici e dei rilievi "in situ". Nel caso di zone di distacco caratterizzate da distinti bacini di apporto e zone di scorrimento incanalate che terminano in conoidi alluvionali (come nel caso in esame), tipicamente vengono utilizzati differenti profili di riferimento per il calcolo della dinamica della valanga, in modo da considerare opportunamente sia le differenti possibili zone di distacco che le differenti possibili direzioni di espansione nella zona di arresto che la valanga può mettere in gioco (si veda ad esempio la Figura H.14 per quanto attiene alle direzioni di espansione utilizzate nella zona di arresto).

2) *Estensione e ubicazione della zona di distacco.*

L'estensione areale (lunghezza e larghezza) e l'ubicazione della zona di distacco utilizzata negli scenari di simulazione della dinamica della valanga è stata definita sulla base dall'analisi morfologica, vegetativa e clivometrica del sito (carta delle pendenze), nonché sulla base delle evidenze dedotte dai rilievi sul terreno e dall'analisi delle informazioni storiche. Nelle simulazioni in cui si è tenuto conto della presenza di zone bonificate mediante opere di ritenuta, le aree di distacco sono state ridotte in accordo ai criteri di Appendice F - § F.2.1.

3) *Altezza del manto nevoso al distacco.*

L'altezza di distacco delle valanghe di progetto,  $H_d$ , è stata calcolata mediante la relazione (D.1) di Appendice D. L'analisi statistica condotta a scala regionale dei dati di precipitazione nevosa (§ H.5.1) ha consentito di caratterizzare la variabile DH3gg in funzione della quota media di distacco e del tempo di ritorno (vedi Tabella H.5). Per quanto riguarda la stima del sovraccarico di neve ventata,  $H_{sd}$ , si è utilizzata la relazione empirica proposta da Fohn (Appendice D - Equazione D.3). Dalle analisi condotte al § H.5.2.3 sulla velocità media giornaliera del venti (vedi Figura H.20), si è ottenuto un valore giornaliero di  $H_{sd}$  pari a circa 7, 10 e 15 cm per tempi di ritorno rispettivamente di 30, 100 e 300 anni. Su un intervallo di tempo pari a tre giorni (cioè quello della nevicata critica), considerando sui restanti due giorni un contributo associato al valore medio della velocità del vento sui tre giorni

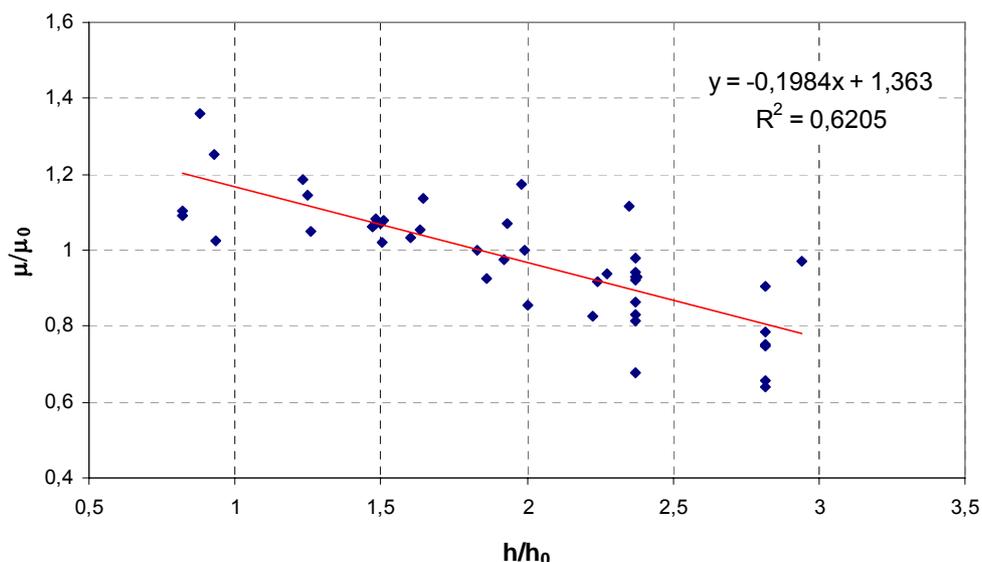
(Appendice D - Equazione D.5), si ha un valore complessivo di sovraccarico da vento sui pendii sottovento pari a 10, 15 e 20 cm per tempi di ritorno rispettivamente pari a 30, 100 e 300 anni. Tali valori andranno aggiunti alla nevicata sui tre giorni nella stima dell'altezza di distacco per tempi di ritorno di progetto (equazione D.1). In virtù delle direzioni prevalenti del vento ottenute al § H.5.2.3 (Est e Nord-Est), i profili ritenuti soggetti ai sovraccarichi da vento sopra determinati risultano quelli caratterizzati da porzioni rilevanti delle zone di distacco esposte a Ovest e Sud-Ovest e da vicinanza a creste o pendii sopravento che favoriscono l'apporto eolico di neve. Si deve osservare che nelle simulazioni che considerano la presenza delle opere di difesa in zona di distacco, i sovraccarichi di neve ventata per il profilo di calcolo afferente alla Valle Mencucca sono stati posti uguali a zero, in virtù della presenza delle barriere frangivento poste alla sommità stessa (vedi Figure H.7b e H.10).

#### 4) *Parametri modellistici* (coefficienti di resistenza).

Le caratteristiche fisiche specifiche della neve che costituisce la valanga e della relativa superficie di scorrimento sono modellate nel modello VARA1D attraverso due specifici coefficienti che sono: (i) il coefficiente di attrito Coulombiano, indicato con  $\mu$ , (ii) il coefficiente di attrito turbolento, indicato con  $n$  (analogo al coefficiente  $\xi$  del modello di Voellmy, crf Appendice B - § B.3.1.2). La corretta stima di questi due parametri richiede una preliminare operazione di taratura del modello. La taratura del modello ha per obiettivo la definizione della coppia di coefficienti di resistenza  $\mu$  e  $n$  più appropriati in relazione alle dimensioni dell'evento considerato ed alla specifica situazione morfologico-topografica del sito valanghivo (grado di incanalamento, caratteristiche del profilo longitudinale del pendio, scabrezza del letto di scorrimento). Usualmente nelle applicazioni pratiche i coefficienti di resistenza  $\mu$  e  $n$  sono stimati mediante taratura diretta del modello, ovvero ricostruendo con il modello eventi storici documentati relativi al sito in esame. Nel caso specifico dello studio in oggetto, al fine di aumentare la "robustezza" dei risultati, l'operazione di taratura è stata affrontata in un'ottica "regionale", accorpono opportunamente i dati di taratura relativi a numerosi siti valanghivi appartenenti a differenti zone dell'arco alpino montane - in particolare Val di Rabbi (TN), Valmalenco (SO), Val Brembana (BG) - e derivando una legge di taratura generale per il modello, che legghi i valori dei coefficienti di resistenza (in particolare del coefficiente  $\mu$ ) ai volumi di distacco, ovvero ai tempi di ritorno (in realtà supponendo l'area di distacco

deterministica e legata semplicemente alle caratteristiche morfologiche della zona di distacco, è possibile ritenere  $\mu$  legato alle altezze di neve che si movimentano durante un evento valanghivo).

In sintesi, la procedura di taratura adottata è stata la seguente. Per ogni sito campione i valori di taratura di  $\mu$ , relativi ai diversi eventi valanghivi documentati, sono stati adimensionalizzati con il valore medio del  $\mu$  di taratura sul sito ( $\mu_0$ ), e così anche i valori dell'altezza di neve al distacco per i singoli eventi di taratura sono stati resi adimensionali mediante il valore medio dell'altezza al distacco del sito ( $h_0$ ). Le coppie di valori  $\mu/\mu_0$  e  $h/h_0$  così trovate per i differenti siti campione sono state riportate su un piano cartesiano (Figura H.21), ed è stato possibile definire la retta di regressione dei valori adimensionali di  $\mu$  in funzione dei valori adimensionali di  $h$ , data dalla relazione:  $(\mu/\mu_0) = -0.1984(h/h_0) + 1.363$ , con  $R^2 = 0.62$ , che rappresenta la curva di taratura del modello VARA1D.



**Figura H.21** - Curva di taratura del modello VARA1D per il coefficiente di resistenza  $\mu$  (numero siti campione:20; numero eventi di taratura: 45)

Questa regressione è stata ottenuta utilizzando i dati sia di eventi estremi, caratterizzati quindi da alti valori del tempo di ritorno, che da eventi di entità minore e più frequenti, ed ha carattere "regionale", in quanto è stata ottenuta considerando siti valanghivi relativi a differenti regioni dell'arco alpino (quest'ultimo aspetto conferisce alla legge di taratura maggiore robustezza). Si può osservare, come il valore di  $\mu$  decresca al crescere dell'altezza di distacco,

ovvero al crescere del tempo di ritorno (ciò è in accordo con il fatto che al crescere del tempo di ritorno aumentano le distanze di arresto delle valanghe). Si può anche osservare come il legame tra  $\mu$  ed  $h$ , una volta scalate opportunamente le variabili con un fattore di scala "sito-specifico", risulti comune a differenti siti valanghivi, anche provenienti da ambiti montani differenti.

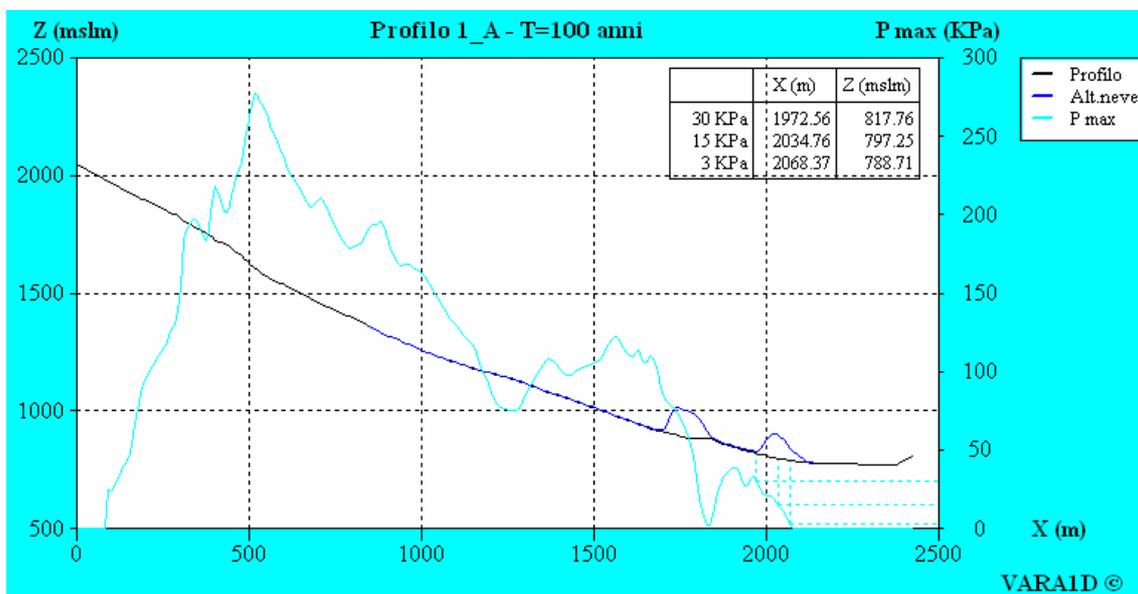
Il valore medio del coefficiente di resistenza  $\mu$  da utilizzare sul sito in esame è stato determinato mediante la taratura diretta del modello VARA1D sugli eventi storici disponibili sul sito (§ H.4). È stato ottenuto un valore medio di  $\mu$  ( $\mu_0$ ) pari a 0,276. Il valore medio dell'altezza di distacco sul sito in esame,  $h_0$ , ottenuto dall'analisi statistica dei dati di innevamento (§ H.5.1) è risultato pari a circa 62 cm. Utilizzando tali valori, la retta di taratura adimensionale di Figura H.21 è stata scalata e ricondotta ad una curva del tipo  $\mu = \mu(h)$ , valida specificamente per il sito in esame; da tale curva si è passati poi ad una curva del tipo  $\mu = \mu(V)$  (con  $V$  che indica il volume di distacco). Tale relazione ha consentito di determinare i valori di progetto del coefficiente di resistenza  $\mu$  con riferimento a tutti gli scenari di calcolo utilizzati (cioè sia per le differenti zone di distacco, ovvero aree di distacco, che per i differenti tempi di ritorno, ovvero altezze di distacco). Tale relazione è stata utilizzata anche per correggere il valore del coefficiente  $\mu$  per un dato scenario di calcolo (area di distacco e tempo di ritorno fissati), in relazione alla diminuzione dell'area di potenziale distacco conseguente all'ipotesi di realizzazione di opere di ritenuta.

Per il coefficiente di resistenza  $n$  (che in genere non viene fatto dipendere dal tempo di ritorno dell'evento, cioè dai volumi di neve al distacco) è stato utilizzato in tutte le simulazioni di dinamica effettuate il valore  $n=0.017 \text{ s/m}^{0.5}$ , valore medio per le simulazioni di taratura effettuate sul sito in esame.

### **H.6.3 Risultati delle simulazioni**

Le simulazioni degli eventi di progetto (ovvero con tempi di ritorno  $T=30, 100$  e  $300$  anni) sono state effettuate sia nell'ipotesi di assenza di opere di difesa che nell'ipotesi di piena efficienza dell'intervento di bonifica in zona di distacco; in quest'ultimo caso le aree di distacco sono state prese a valle dell'ultima fila di opere attualmente realizzate. Per quanto concerne l'argine di

deviazione in zona di arresto (Figura H.8), cautelativamente si è considerata una condizione di completo riempimento dell'alveo, con creazione di un tratto approssimativamente pianeggiante che precede il deflusso in direzione di Trabuchello. Tale ipotesi modellistica è motivata dalla presenza di numerose zone di distacco, in grado di generare valanghe che possono raggiungere la zona apicale del conoide, e ridurre considerevolmente l'efficienza dell'opera di contenimento, soprattutto nella sua zona di monte. A titolo di esempio si riporta in Figura H.22 il risultato della simulazione di una valanga con tempo di ritorno  $T=100$  anni, proveniente dalla Valle di Pietra Quadra, nell'ipotesi di opere di ritenuta efficaci e direzione di espansione verso Trabuchello (A in Figura H.14).



**Figura H.22** - Modello VARA1D: simulazione di una valanga proveniente dalla Valle di Pietra Quadra e deflusso in direzione di Trabuchello ( $T=100$  anni, ipotesi di opere di difesa attiva pienamente efficienti). Sono graficati la distribuzione finale del deposito e l'involuppo delle pressioni di impatto; nella tabella sono indicati la progressiva ( $x$ ) e la quota ( $z$ ) dove sono raggiunte le soglie di pressione pari rispettivamente a 3, 15 e 30 kPa.

## H.7 REDAZIONE DEL P.Z.E.V.

### H.7.1 Procedura

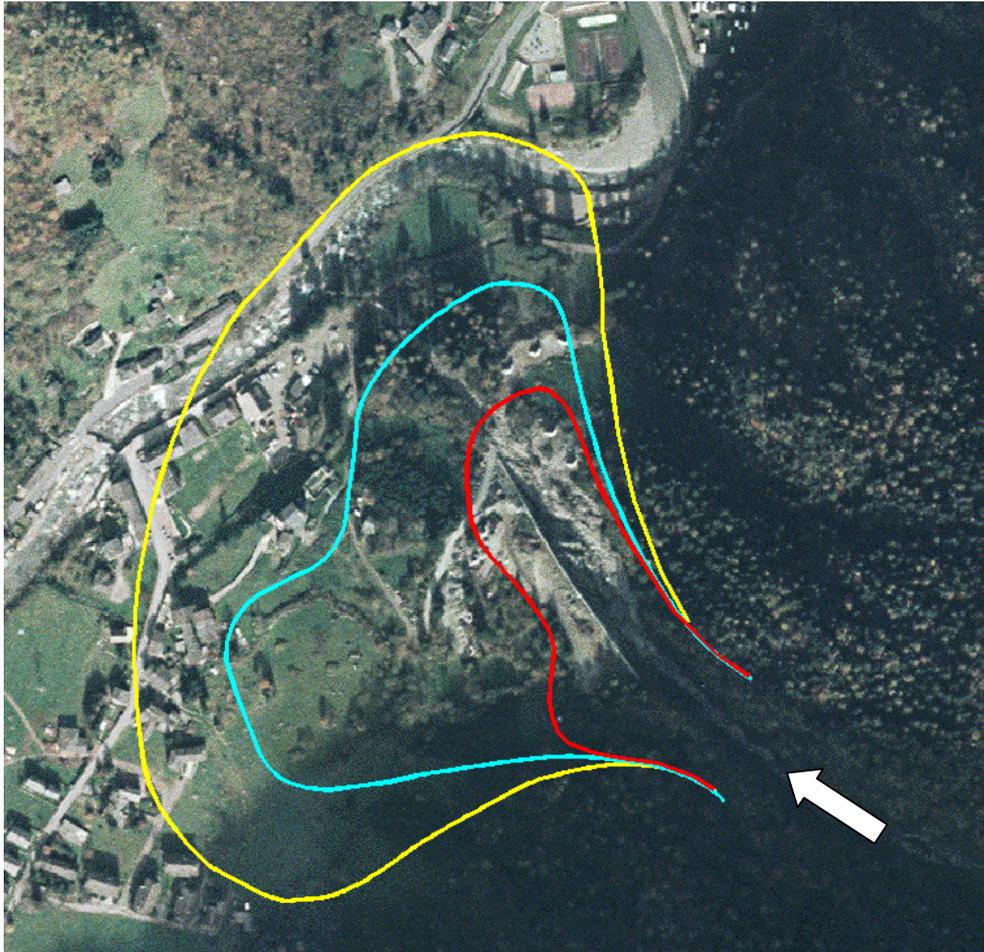
Il procedimento seguito per la stesura del P.Z.E.V. è sintetizzato dalla sequenza di operazioni descritta di seguito.

- 1) Sulla base dell'insieme delle informazioni ricavate nelle varie attività di indagine e studio sono stati determinati gli scenari di progetto da adottare nelle simulazioni (§ H.6.2), in termini di: (a) condizioni al distacco (quote massime e minime di distacco, altezze di distacco per tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni); (b) traiettorie della valanga nelle zone di distacco, scorrimento e arresto (profili di calcolo); (c) parametri di resistenza ( $\mu$  ed  $n$  per i vari profili e tempi di ritorno).
- 2) Sono stati eseguiti i calcoli di dinamica delle valanghe per ogni scenario di progetto (su tutti i profili di calcolo individuati e per tutti i tempi di ritorno considerati) a mezzo del modello VARA1D (vedi esempio in Figura H.22). Tali simulazioni sono state effettuate sia nell'ipotesi di assenza di opere di difesa in zona di distacco, che nell'ipotesi di intervento di bonifica pienamente efficiente.
- 3) Sono stati tabulati i risultati ottenuti in termini di distanza di arresto e limite inferiore per le soglie di pressione rispettivamente pari a 3 kPa, 15 kPa e 30 kPa per tutte le simulazioni effettuate (vedi Figura H.22).
- 4) Sui diversi profili utilizzati in zona di arresto si sono cartografati, per ciascuno degli scenari di distacco considerati, i punti corrispondenti ai limiti delle zone "rossa", "blu" e "gialla", in accordo ai criteri di mappatura indicate ai § 1.2.2.2, 1.2.2.3 e 1.2.2.4 di Parte 1.
- 5) L'estensione areale delle zone "rossa" "blu" e "gialla" riferite a ciascuno degli scenari di distacco è stata delimitata per inviluppo sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni. La delimitazione finale del P.Z.E.V. è stata poi effettuata tenendo conto delle seguenti considerazioni.
  - La delimitazione della zona gialla (area "massimale" potenzialmente interessata dalla valanga) è stata fatta nell'ipotesi di assenza di opere di difesa (in accordo ai criteri di § 1.2.2.6, Parte 1), con riferimento alla condizione più critica generata dai differenti scenari di distacco.

- La delimitazione delle zone blu e rossa è stata invece fatta considerando la presenza dell'intervento di bonifica in zona di distacco che, alla luce delle analisi condotte al § H.3.3, allo stato attuale può essere ritenuto in buono stato di conservazione ed efficienza. Per quanto riguarda l'opera di difesa passiva in zona di arresto, verificata la possibilità di avere a breve scansione temporale valanghe provenienti da differenti zone di distacco in grado di raggiungere la zona apicale del conoide (anche in presenza delle opere di ritenuta), si è considerata cautelativamente una condizione di riempimento completo dell'alveo.
- Nella delimitazione dei limiti laterali delle zone a differente grado di pericolo sono state tenute in debita considerazione: le possibili interazioni tra valanghe provenienti da differenti bacini di apporto; le evidenze sul terreno; i massimi limiti storici cartografati nella C.L.P.V. (Figura H.2); le informazioni desumibili dalla documentazione storica e fotografica disponibile (Figura H.12); le informazioni desumibili da interviste con abitanti del posto.

## **H.7.2 Risultati**

Il risultato dell'applicazione della procedura di redazione dei P.Z.E.V. sul sito di studio è rappresentato nella Figura H.23. Il P.Z.E.V. evidenzia che una porzione relativamente ampia del fondovalle, comprensiva di insediamenti abitativi, manufatti isolati, vie di comunicazione e infrastrutture varie, risulta esposta, con differenti gradi di pericolo, all'azione delle valanghe. In realtà l'area interessata dalle valanghe con grado di pericolo elevato e moderato (aree rosse e blu), per quanto relativamente estesa, non interessa, se non in piccola misura, aree antropizzate; la parte urbanizzata esposta alle valanghe, allo stato attuale, risulta infatti caratterizzata prevalentemente da un grado di pericolo basso (zona gialla).

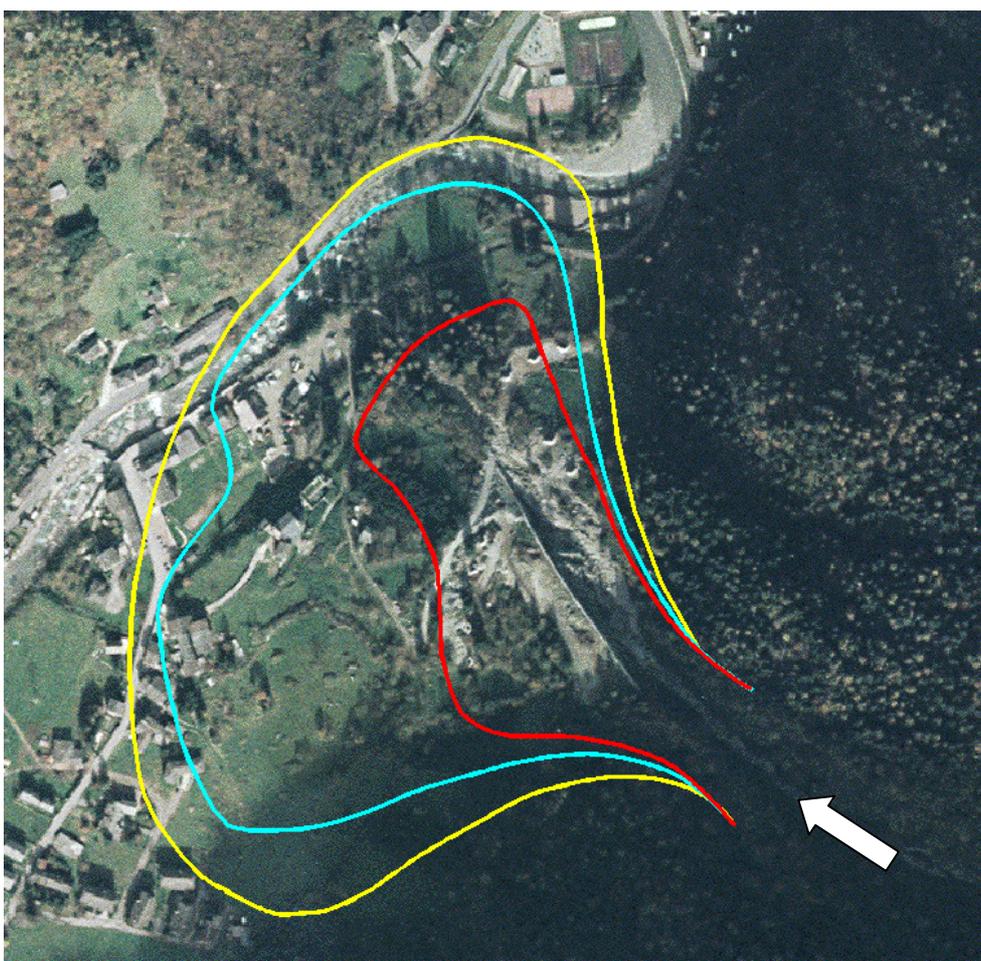


**Figura H.23 - PZEV per l'area in esame**

Alla luce dei risultati del P.Z.E.V. di Figura H.23 appare importante fare due considerazioni conclusive.

- (1) I limiti della zona gialla risultano più ampi di quelli cartografati nella C.L.P.V. (Figura H.2) e di quelli indicati nelle riproduzioni di alcuni eventi storici di notevole intensità (Figura H.12); ciò appare plausibile, alla luce delle ipotesi modellistiche che determinano tale delimitazione e del fatto che, come discusso, il limite relativo alla massima espansione storica conosciuta ha un tempo di ritorno stimabile intorno al secolo, pertanto decisamente inferiore di quello di progetto relativo alla perimetrazione delle aree gialle ( $T=300$  anni).
- (2) Le delimitazioni delle zone blu e rosse della mappa di pericolosità di Figura H.23 tengono in conto dell'effetto sul moto della valanga delle

opere di difesa attiva realizzate in zona di distacco. E' stato effettuato anche un P.Z.E.V. nell'ipotesi di assenza di opere di ritenuta (reti da neve e barriere frangivento) in zona di distacco (vedi Figura H.24). Si è osservata una rilevante riduzione del grado di pericolo per l'area di fondovalle conseguente alla realizzazione degli interventi di bonifica in zona di distacco, con significativo arretramento dei limiti delle zona rossa e blu. E' pertanto importante rimarcare ancora una volta che la cartografia di Figura H.23 fotografa lo stato attuale di esposizione al pericolo delle aree di fondovalle, e presuppone il mantenimento della completa efficienza delle opere di ritenuta. Qualora nel tempo lo stato di conservazione ed efficienza delle opere di ritenuta in zona di distacco peggiorasse, e non si provvedesse ai necessari interventi manutentivi, la mappa di pericolosità andrà modificata conseguentemente (ad esempio in accordo alle indicazioni di Figura H.24).



**Figura H.24** - *Mappa di pericolosità per l'area in esame nell'ipotesi di assenza di opere di difesa attiva in zona di distacco.*

# **APPENDICE I**

## **Riferimenti bibliografici**

**Adjel, G. 1995. Methodes statistiques pour la determination de la distance d'arret maximale des avalanches. *La Houille Blanche*, 7, 100-104.**

- Bakkehøi, S., Cheng, T., Domaas, U., Lied, K., Perla, R. e Schieldrop, B. 1981. On the computation of parameters that model snow avalanche motion. *Canadian Geotechnical Journal*, **18**(1), 121-130.
- Bakkehøi, S., Domaas, U. e Lied, K. 1983. Calculation of Snow Avalanche Run-out Distance. *Annals of Glaciology*, **4**, 24-29.
- Bakkehøi, S. e Norem, H. 1993. Comparing topographical and dynamical run-out models by ideas of "Nearest Neighbour Method". *Atti del 2<sup>nd</sup> Avalanche-Dynamics-Workshop in Innsbruck*.
- Barbolini, M. 1996. Sulla modellazione della valanghe di neve densa. Tesi di Laurea. Politecnico di Milano.
- Barbolini, M. 1998. VARA one and two-dimensional models. In: *A Survey of computational models for snow avalanche motion*, Edited by C. Harbitz. NGI Report No. 581220-1, Oslo.
- Barbolini, M. 1999. *Dense snow avalanche: computational models, hazard mapping and related uncertainties*, PhD Thesis, Università di Pavia.
- Barbolini, M., Gruber, U., Keyloch, C., Naaim, M. e Savi, F. 2000. Application and evaluation of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites. *Cold Regions Science and Technology*, **31**(2), 133-149.
- Barbolini, M. e Cappabianca, F. 2002. Determinazione della relazione tra distanze di arresto e tempi di ritorno delle valanghe: un nuovo metodo basato sull'analisi statistica dei dati storici. *Neve e Valanghe*, **46**, 14-23.
- Barbolini, M. e Cappabianca, F. 2003. Calcolo della pericolosità e analisi di rischi: un nuovo metodo basato sull'utilizzo dei modelli di dinamica, *Neve e Valanghe* **50**, 62-71.
- Barbolini, M., Cappabianca, F. e Savi, F. 2005. Risk assessment in avalanche prone areas. *Annals of Glaciology*, **38**.
- Barbolini, M. e Pagliardi, M. 2004. Analisi "costi-benefici" applicata alla gestione del problema valanghe". *Atti del convegno "Interpraevent 2004"*, Riva del Garda, TN.

- Barsanti, M. 1984. Calcolo della distanza di arresto delle valanghe sulla base di parametri topografici del pendio. *Neve e Valanghe* **9**, 86-97
- Bartelt, P., Gruber, U. e Salm, B. 1997a. Numerical Modelling of Dense Snow Avalanches Using a Voellmy-Fluid Flow Law Solved by a Finite Difference Method. *SFISAR Internal Report* No. 716, Davos, CH.
- Bartelt, P., Salm, B. e Gruber, U. 1997b. Modelling dense snow avalanche flow as a Criminale-Ericksen-Filby fluid without cohesion. *SFISAR Internal Report* No. 717, Davos, CH.
- Bartelt, P., Kern, M. e Christen, M. 2000. A mixed flowing/powder snow avalanche model. In: *Proceeding of the International Snow Science Workshop: a merging between theory and practice (ISSW 2000)*. Big Sky, Montana, USA, October 1<sup>st</sup> – 6<sup>th</sup> 2000, 280-289.
- Bartelt, P e Stöckli, V. 2000. The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology* **32**, 209-216.
- Bovis, M.J. e Mears, A. 1976. Statistical Prediction of Snow Avalanche Runout from Terrain Variables in Colorado, *Arctic and Alpine Research* **8**, 145-147.
- Brancaccio, A. 2000. Distribuzione spaziale delle grandezze nivometriche sulle alpi lombarde. Tesi di Laurea, Università di Pavia.
- Brørs, B. 1991. Turbidity current modelling. Division of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Dr.Ing.-Thesis, 38 pp.
- Burkard, A. e Salm, B. 1992. Estimation de l'épaisseur moyenne de déclenchement pour le calcul des avalanches denses. *SLF Internal Bericht* No. 668, 18 pp.
- Buser, O. 1983. Avalanche Forecast with the Method of Nearest Neighbours. An Interactive Approach. *Cold Regions Science and Technology*, **8**(2), 155-163.
- Buser, O. e Frutiger, H. 1980. Observed maximum runout distance of snow avalanche and the determination of the friction coefficients  $\mu$  and  $\xi$ . *Journal of Glaciology*, **26**(94), 121-130.

- Castaldini, R. 1994. Sul Calcolo della distanza di arresto delle valanghe. *Neve e Valanghe* **21**, 50-61.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U. e Filaferro, E. 2002. AVAL-1D: un programma di dinamica delle valanghe per l'uso comune. *Neve e Valanghe* **47**, 36-45.
- Cunnane, C. 1989. Statistical distribution for flood frequency analysis. *WMO-Operational Hydrology Report* No. 33. 61 pp.
- Dent, J.D. e Lang, T.E. 1980. Modelling of snow flow *Journal of Glaciology*, **26**(94), 131-140.
- Dent J.D. e Lang T.E. 1983. A biviscous modified Bingham model of snow avalanche motion. *Annals of Glaciology* **4**, 42-46.
- Direttive Elvetiche. 1990. *Direttive per la costruzione delle opere di premunizione valangaria nella zona di distacco*, UFAFP-FNP, Berna (CH), 75 pp.
- Eglit, M.E. 1998. Mathematical Modelling of Dense Avalanches. In: *Proceedings of the Anniversary Conference for the 25 Years of Snow Avalanche Research at NGI*, Voss, Norway, 12–16 May, 1998, NGI Publications No. 203, 15-18.
- Faug, T., Naain, M., Bertrand, D., Lachamp, P. e Naaim-Bouvet, F. 2003. Varying dam height to shorten the runout of dense avalanche flow: developing a scaling law from laboratory experiments. *Surveys in Geophysics* **24**(5/6), 555-568.
- Fellini, M. 1999. Calcolo della distanza di arresto di valanghe estreme: applicazione di un modello statistico-topografico all'Alta Valtellina ed all'Alta Valmalenco. Tesi di Laurea, Università di Pavia.
- Föhn, P. 1980. Snow transport over mountain crests. *Journal of Glaciology*, **26**(94), 469-480.
- Fujisawa K., Tsunaki R. e Kamiishi I. 1993. Estimating Snow Avalanche Runout Distance from Topographic Data. *Annals of Glaciology* **18**, 239-244.
- Furdada G. e Vilaplana J.M. 1998. Statistical prediction of maximum avalanche runout distances from topographic data in the western Catalan Pyrenees. *Annals of Glaciology* **26**, 285-288.

- Grigorian, S.S. 1979. Novii zakon trenija mehanizm krupnomashtabnih gornih obvalov i opolznei (A new law of friction and mechanism for large-scale slag heaps and landslides). Dokl. Akad. Nauk. SSSR **244**(4), 846-849; English translation in *Soviet Phys. Dokl.* N.24.
- Harbitz, C. 1998. A Survey of computational models for snow avalanche motion. NGI Report No. 581220-1 (Also Deliverable No. 4 of the 4<sup>th</sup> Framework EU Project SAME: Snow Avalanche Mapping, Model Validation and Warning Systems in Europe, published by the European Commission, EUR19069).
- Harbitz, C., Domaas, U e Engen, A. 1999. Design of snow avalanche deflecting dams. *NGI Internal Report* n. 589000-4. (Anche *negli Atti del Convegno Interpraevent 2000*, Villach, Austria).
- Hermann, F. e Hutter, K. 1991. Laboratory experiments on the dynamics of powder-snow avalanches in the run-out zone. *Journal of Glaciology* **37**(126).
- Hopfinger, E.J. 1983. Snow avalanche motion and related phenomena. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **15**, 47-76.
- Hunt, B. 1995. Newtonian fluid mechanics treatment of debris flows and avalanches. *Journal of Hydraulic Engineering*, **120**(12), 1350-1363.
- Hutter, K. 1996. Avalanche Dynamics. In: *Hydrology of Disasters*, V. P. Singh, ed., Kluwer Academic Publishers, 317-394.
- Kite, G.W. 1988, *Frequency and risk analysis in hydrology*, Littleton, CO, Water Resources Publications (Publication 224).
- Johannesson, T. 1998. Iceland avalanche runout models compared with topographical models used in other countries. In: *Proceedings of the Anniversary Conference for the 25 Years of Snow Avalanche Research at NGI*, Voss, Norway, 12–16 May, 1998, NGI Publication n.203. 43-53.
- Johannesson, T. 2001. Run-up of two avalanches on the deflecting dams at Flateyri, northwester Iceland. *Annals of Glaciology* **32**, 350-354.
- Jónasson, K., Sigurðsson S.Þ. e Arnalds, Þ. 1999. *Estimation of avalanche risk*, Reykjavík, Veðurstofu Islands (Report No. R99001-URO.)

- Lang, T., Dawson e Martinelli, M. 1979a. Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow. Part1. Development of the computer program Avalanch". *Journal of Glaciology*, **22**, 107-115.
- Lang, T. e Martinelli, M. 1979b. Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow. Part2. Avalanche modelling and parameter error evaluation. *Journal of Glaciology*, **22**, 117-125.
- Lied, K. e Bakkehøi, S. 1980. Empirical Calculations of Snow Avalanche Run-Out Distance Based on Topographic Parameters, *Journal of Glaciology*, **26**(94), 165-177.
- Lied, K., Weiler, C., Bakkehøi, S. e Hopf, J. 1995. Calculation methods for avalanche run-out distance for the Austrian Alps. *Norwegian Geotechnical Institute*, report 581240-1.
- Maione, U. e Moisello, U. 1993. *Elementi di statistica per l'idrologia*. La Goliardica Pavese Ed., Pavia.
- Martinell, M., Lang, T. e Mears, A. 1980. Calculation of avalanche friction coefficients from field data. *Journal of Glaciology*, **26**(94), 109-119.
- McClung, D. e Schaerer, P. 1983. Determination of avalanche friction coefficients from measured speeds *Annals of Glaciology*, **4**, 170-173.
- McClung, D.M. e Lied, K. 1987. Statistical and Geometrical Definition of Snow Avalanche Runout". *Cold Regions Science and Technology* **13**, 107-119.
- McClung, D.M., Mears, A.I. e Schaerer, P. 1989. Extreme avalanche run-out: Data from four mountain ranges". *Annals of Glaciology* **13**, 180-184.
- McClung, D. M. e Mears, A. 1991. Extreme value prediction of snow avalanche runout. *Cold regions science and technology*, **19**, 163-175
- McClung, D. e Schaerer, P. 1993. *Manuale delle valanghe*. Zanichelli Ed.
- McClung, D. 2001. Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models. *Canadian Geotechnical Journal*, **38**, 1254-1265.
- Mears, 1981, *Design Criteria for avalanche control structures in the runout zones*, USDA Forest Service General Technical Report RM-84, 28 pp.
- Meyer-Grass, M. e Imbeck, H. 1986. Il deperimento dei boschi e il pericolo valanghe. *Neve e Valanghe* **4**, 6-15.

- Naaïm, M. e Ancey, C. 1992. Modelisation of Dense Avalanches, *Proc. of the European Summer University on Snow and Avalanches*, 14-25 September 1992, Chamonix, France, Cemagref Publications, 173-181.
- Naaïm, M. 1999. Modelisation des Avalanche Mixtes de Neige Seche. *La Houille Blanche*, **5**, 54-69.
- Naaïm-Bouvet, F., Pain, S., Naaïm, M. e Faug, T. 2003. Numerical and physical modelling of the effect of a dam on powder avalanche motion: comparison with previous approaches. *Surveys in Geophysics* **24**(5/6), 479-498.
- Natale, L., Nettuno, L., e Savi, F. 1994. Numerical simulation of snow dense avalanche: an hydraulic approach. *Proc. of the 24th Annual Pittsburg Int. Conf. on Modelling and Simulations, Pittsburg* (IASTED 1994), ACTA PRESS, 233-236.
- Norem, H., Irgens, F. e Schieldrop, B. 1987 A continuum model for calculating snow avalanche velocities In: *Avalanche Formation movements and effects, Proceeding of the Davos Symposium, Davos 1986. IAHS Publication No. 162*, 363-379
- Norem, H., Irgens, F. e Schieldrop, B. 1989 Simulation of snow avalanche flow in the runout zones. *Annals of Glaciology* **13**, 218-225
- Perla R.I., Cheng T.T. e McClung, D.M. 1980. A Two-Parameter Model of Snow-Avalanche Motion, *Journal of Glaciology* **26**(94), 197-207.
- Salm, B., Burkard, A. e Gubler, H. 1990. Berechnung von Fließlawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen, Eidg. Inst. Schnee- und Lawinenforsch. Mitt., **47**, 41 pp. ("Calcul des Avalanches: Une Methode pour le Praticien avec des Exemples"; SFISAR Message No 47 - Translated in French by Ancey C., 1994).
- Sampl, P. 1993. Current status of the AVL avalanche simulation model. Numerical simulation of dry snow avalanche. Negli Atti del: *Pierre Beghin international workshop on rapid gravitational mass movements*, 6-10 Dicembre 1993, Grenoble, France, CEMAGREF Ed., 269-275.
- Savage, S. B. e Hutter, K. 1989. The motion of a finite mass of granular materials down a rough incline. *JFM*, **199**, 177-215.

- Savage, S. B. e Hutter, K. 1991. The dynamics of granular avalanche from initiation to runout. Part I: analysis. *Acta Mechanica*, **86**, 201-223.
- Schaerer, 1975. Friction coefficients and speed of flowing avalanches. *IAHS-AISH Publication* n. 114, 425-432.
- Sivardiere, F. e Castelle, T. 1992. Ouvrage à vent en montagne: inventaire et diagnostics en valais. *Manuel EPFL/ Service des Forets et du Paysage du Valais*, 205pp.
- Sivardiere, F. e Castelle, T. 1993. Le opere da vento. *Neve e Valanghe* **18**, 6-17.
- Tabler & Associates. 1991. *Snow Fence Guide*, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Whashington, Dc.
- Tesche, T. 1986. A three dimensional dynamic model of turbulent avalanche flow, *Proceedings of the International Snow Science Workshop 1986*, Lake Tahoe, California, 1-27.
- Voellmy, A. 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen, *Schweiz. Bauzeitung*, 73, 159-165, 212-217, 246-249, 280-285.

