



## Progetto PermaNET *permafrost long term monitoring NETWORK*

# Le “forme” del permafrost alpino

**Alberto Carton**

Dipartimento di Geografia “G. Morandini” – Università di Padova



Provincia Autonoma di Trento  
Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture  
Servizio Geologico

Fotografie: R. Seppi & A. Carton



Università di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



Mountain-eering S.r.l.

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PAVIA



Università di Pavia  
Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente

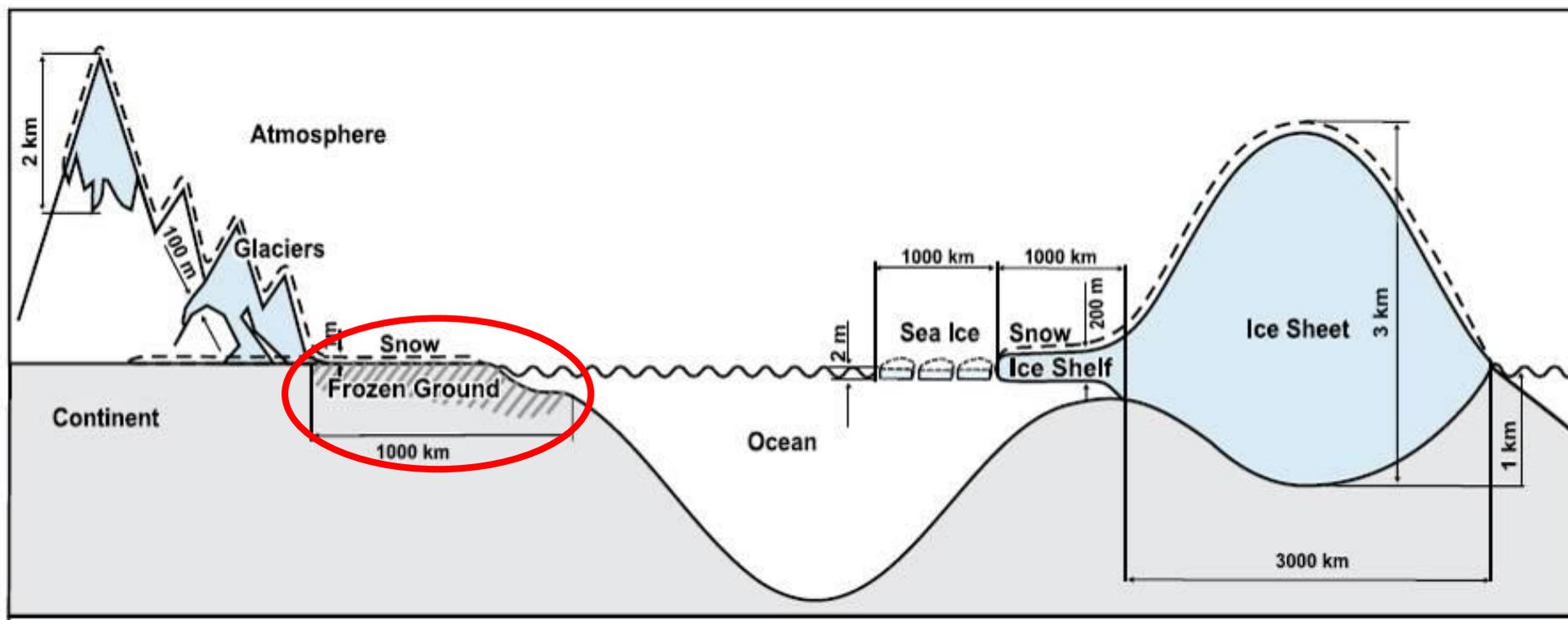


Università di Padova  
Dipartimento di Geografia

## La criosfera terrestre

Il termine **CRIOSFERA** descrive collettivamente gli elementi dell'idrosfera terrestre che contengono **ACQUA allo STATO SOLIDO** e include:

- > manto nevoso,
- > ghiacciai (calotte glaciali polari, ghiacciai montani, ecc.),
- > ghiaccio marino,
- > ghiaccio lacustre e fluviale,
- > terreno stagionalmente e **PERENNEMENTE** congelato.



Dominio **GLACIALE** → processi e forme legate  
all'azione dei **GHIACCIAI**

Dominio **PERIGLACIALE** → processi e forme legate  
all'azione del **GELO**

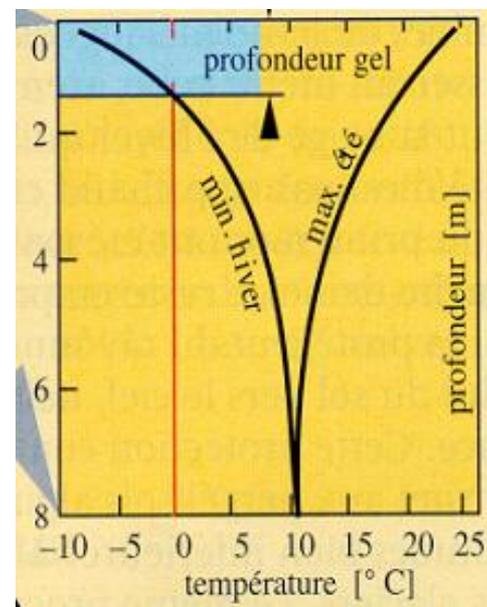
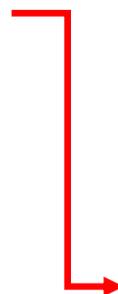
Dominio **NIVALE** → processi e forme legate  
all'azione della **NEVE**

**Diversi gradi di interazione**

Attualmente, il termine **periglaciale** indica **l'ambiente morfogenetico** legato a **climi freddi, dove prevale l'azione del gelo**, indipendentemente dalla collocazione spazio-temporale rispetto ai ghiacciai

L'ambiente periglaciale è caratterizzato da **processi e forme** connessi a condizioni di **GELO STAGIONALE** o alla presenza di **PERMAFROST**

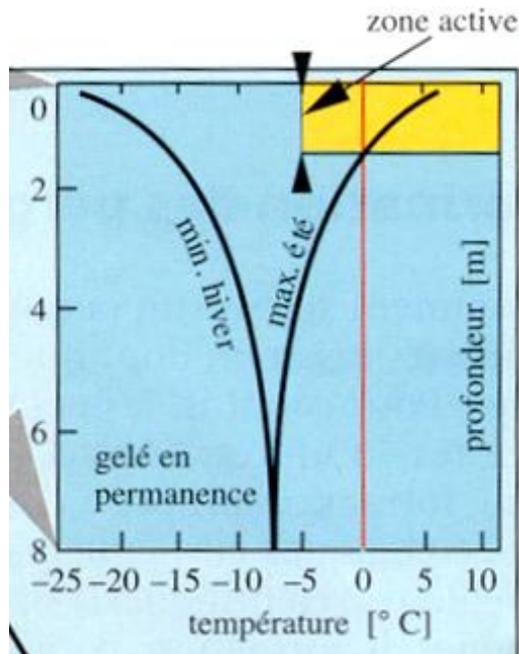
### GELO STAGIONALE



- Interessa le parti più superficiali del suolo
- È presente solo nella stagione fredda

Attualmente, il termine **periglaciale** indica **l'ambiente morfogenetico** legato a **climi freddi, dove prevale l'azione del gelo**, indipendentemente dalla collocazione spazio-temporale rispetto ai ghiacciai

L'ambiente periglaciale è caratterizzato da **processi e forme** connessi a condizioni di **GELO STAGIONALE** o alla presenza di **PERMAFROST**



### PERMAFROST

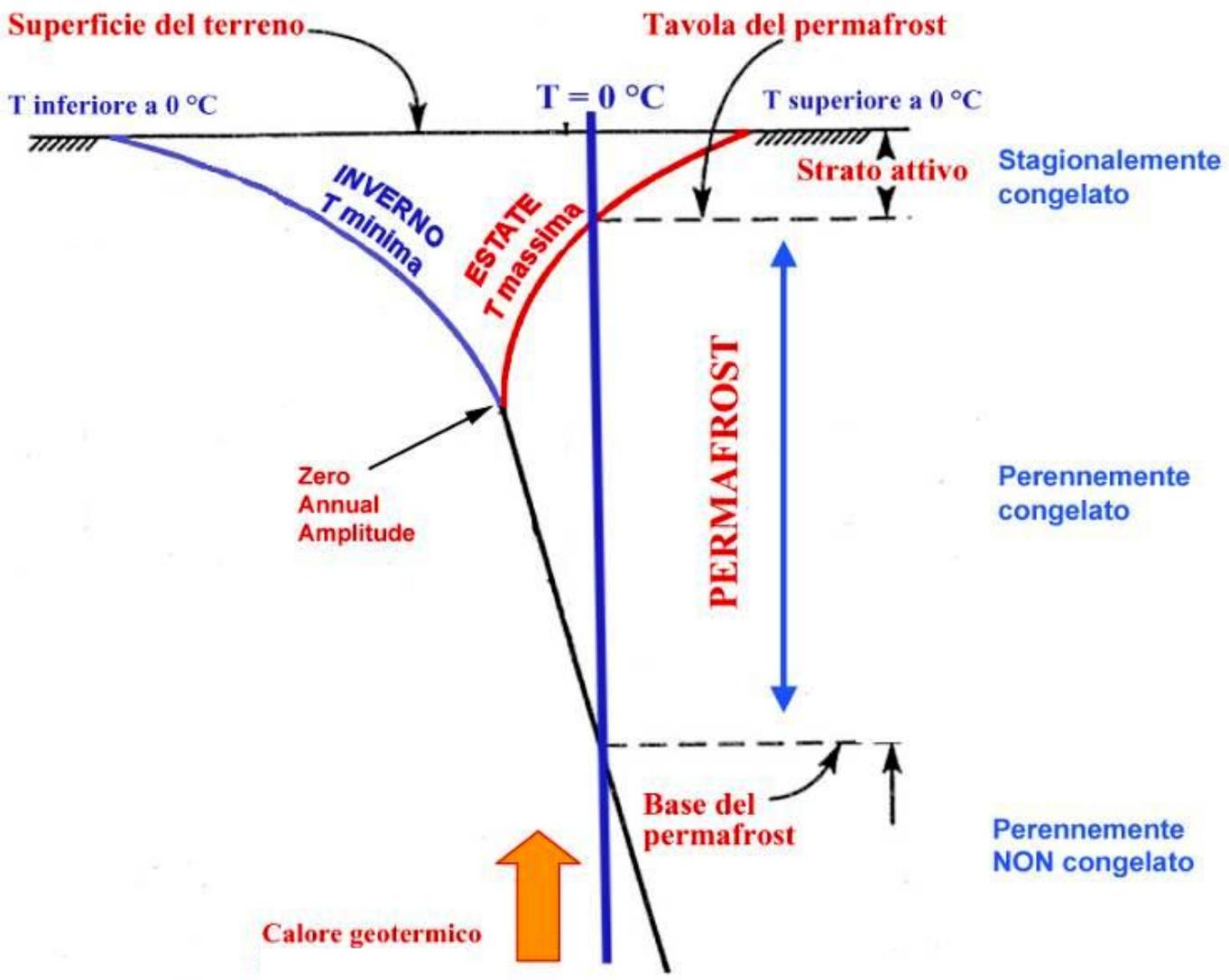
- Interessa il terreno in profondità
- La sua presenza non è legata a cicli stagionali

### PERMAFROST

qualsiasi terreno che rimane ad una **TEMPERATURA inferiore a 0 C** per almeno due anni consecutivi (*Brown & Pewè, 1973*)

- Esprime una **condizione termica del suolo**, indipendentemente dal suo stato fisico (può non essere congelato: presenza di sali; suoli ricchi di argilla)
- Generalmente **contiene ghiaccio** in varie forme e aggregazioni (**ground ice**)
- La formazione e la conservazione del permafrost dipendono dalle condizioni climatiche, in particolare dalla **temperatura media annua dell'aria** (scala regionale)
- Può interessare **terreni di qualsiasi natura** (roccia in posto, terreni sciolti)

# Permafrost: definizioni e caratteristiche



## Permafrost: classificazione

In una certa area il permafrost può essere:

**CONTINUO** (90-100%) → presente **ovunque** → zone **ARTICHE** (MAAT < - 6/-8 C)

**DISCONTINUO** (50-90%) → zone con **permafrost** separate da **zone dove non è presente**

**SPORADICO** e **ISOLATO** (0-50%) → le zone con permafrost sono **isolate**

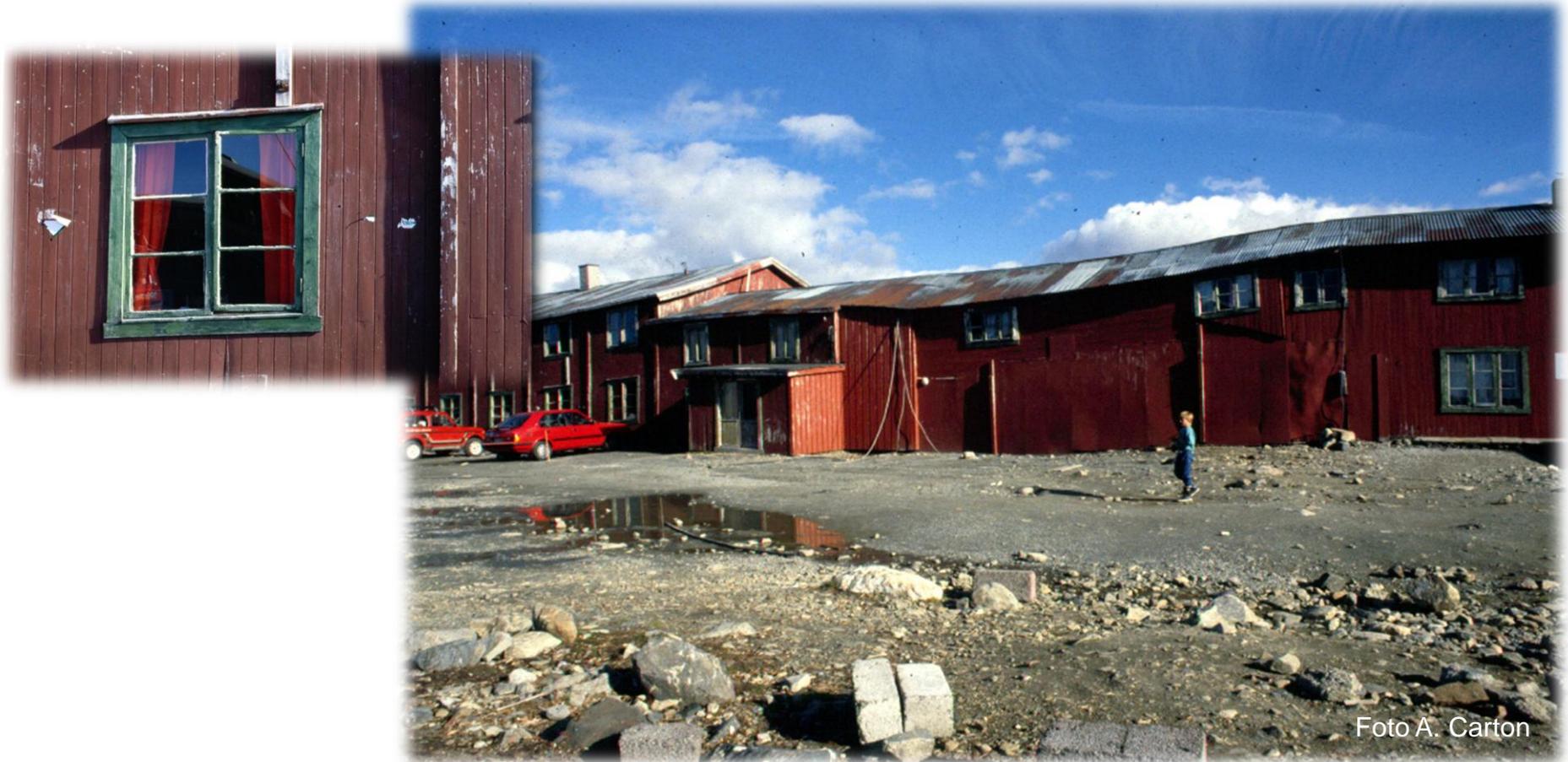
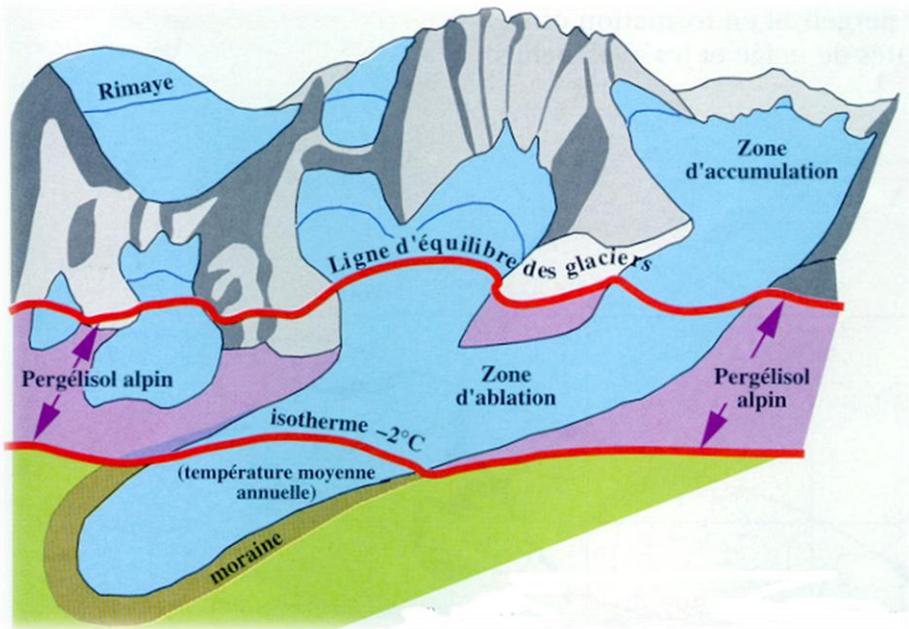
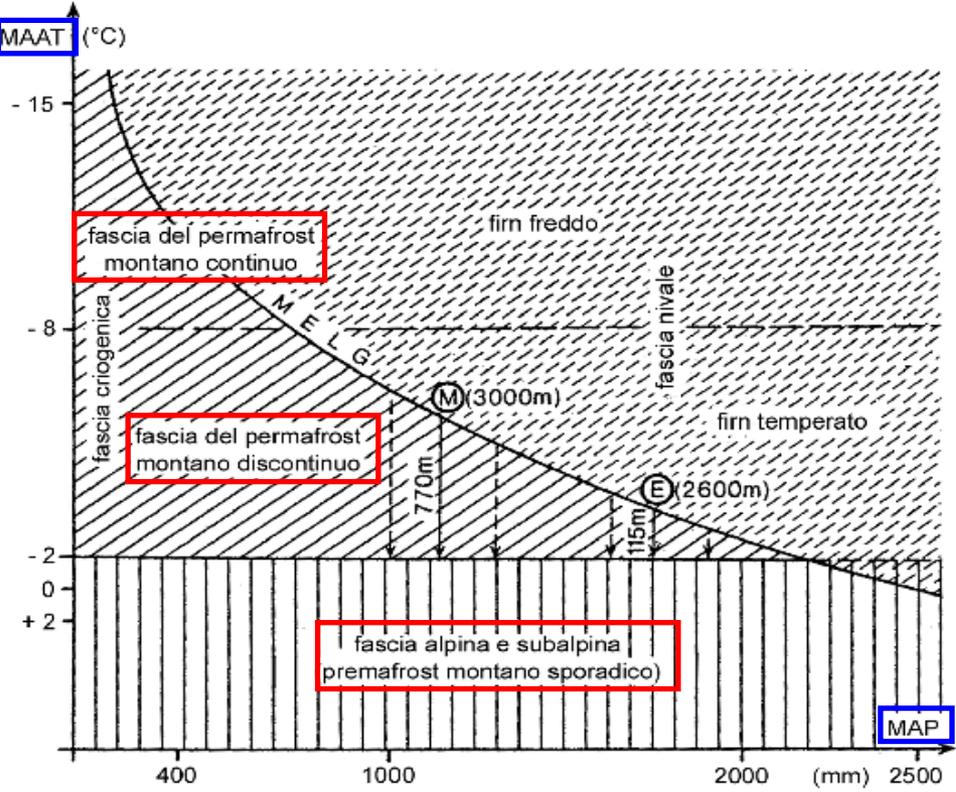


Foto A. Carton

# Permafrost alpino: caratteristiche e condizioni ambientali

- È diffuso sopra i **2500 m di quota**
- Si tratta di permafrost **DISCONTINUO** o **SPORADICO** (continuo sopra i 3500 m di quota)
- T media annua **inferiore a -1/-2 C**
- P medie annue **inferiori a 1500/2000 mm**



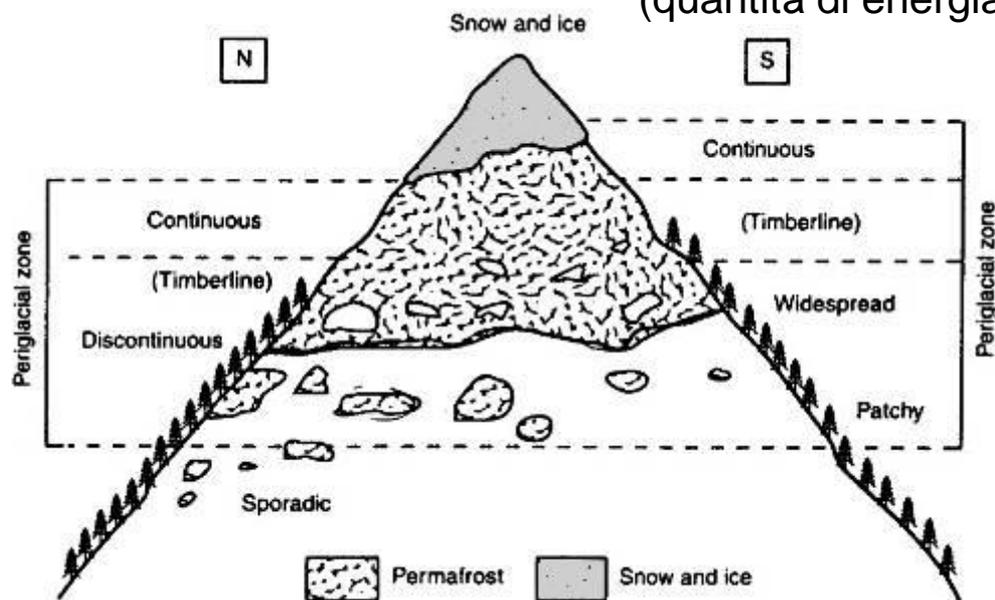
*Schema della criosfera alpina secondo Haerberli, 1985*

## Fattori determinanti a scala regionale:

- Temperatura dell'aria
- media annua ed escursioni termiche

## Fattori determinanti a scala locale:

- Condizioni microclimatiche
- esposizione del versante (quantità di energia solare ricevuta)



Il dominio periglaciale alpino si colloca generalmente vicino alla quota **del limite degli alberi** (sulle Alpi attorno a 2000 – 2300 m) ed è molto influenzato dall'esposizione del versante.

La temperatura ha una forte variabilità diurna e stagionale, con **frequenti oscillazioni attorno agli 0 C.**

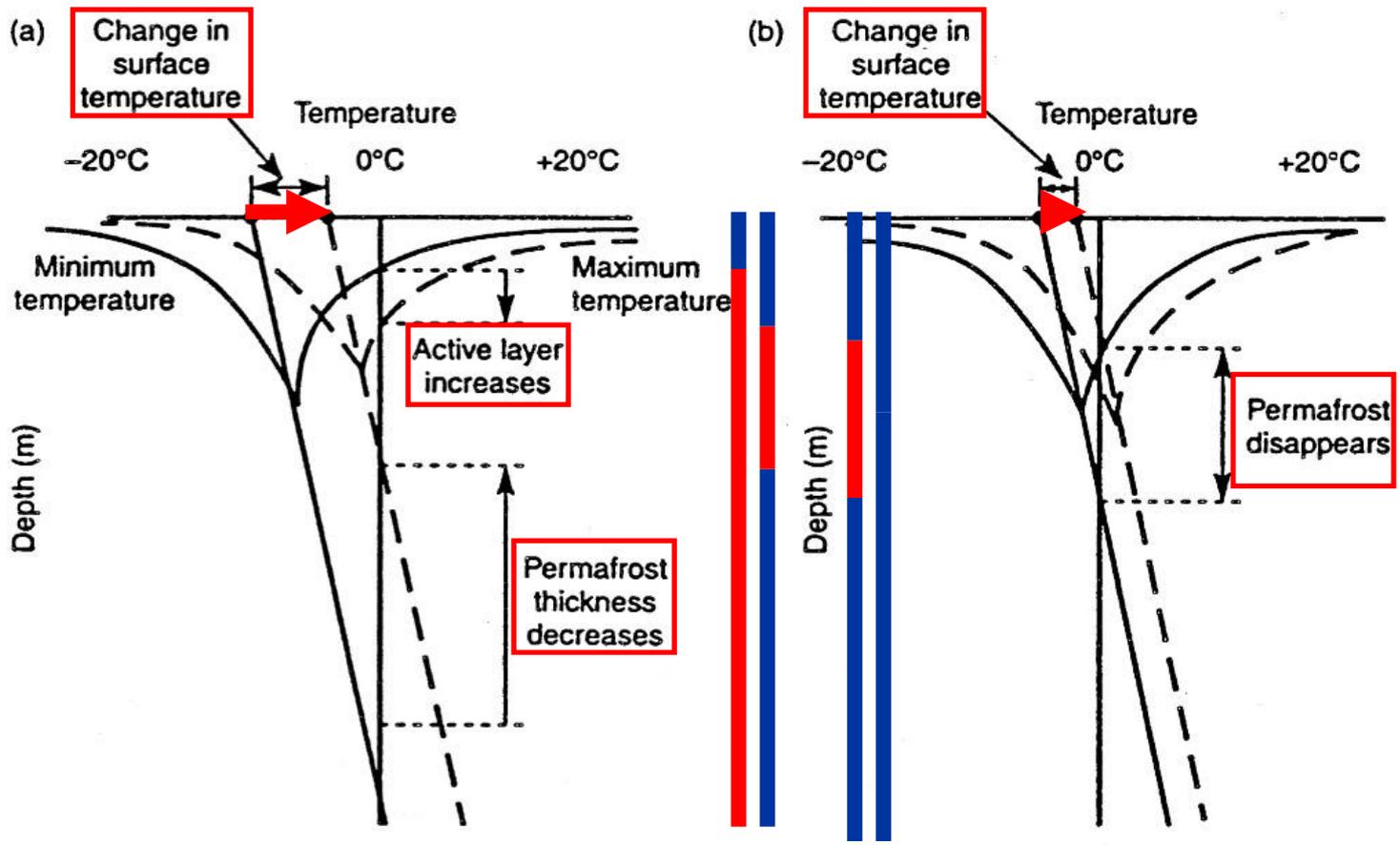
**Può essere presente PERMAFROST**

A scala locale, la sua presenza è fortemente influenzata dalle **condizioni microclimatiche**

- ⊕ **esposizione del versante**
- ⊕ **distribuzione, durata e spessore del manto nevoso**
- ⊕ **caratteristiche substrato (granulometria, proprietà termiche, vegetazione)**



Foto R. Seppi



## PERMAFROST CONTINUO

## PERMAFROST DISCONTINUO

Equilibrium ground temperature profiles showing the long-term effect of a climatic warming of 4 °C in (a) continuous permafrost zone; (b) discontinuous permafrost zone.

*Da: French, 1996*

Il contenuto di ghiaccio nel permafrost differisce per:

- **quantità** (0 – 100% del volume dei pori del terreno)
- **tipologia**
- **struttura**

La **quantità** di ghiaccio dipende dalle caratteristiche del terreno (granulometria, permeabilità) e dalla disponibilità di acqua.

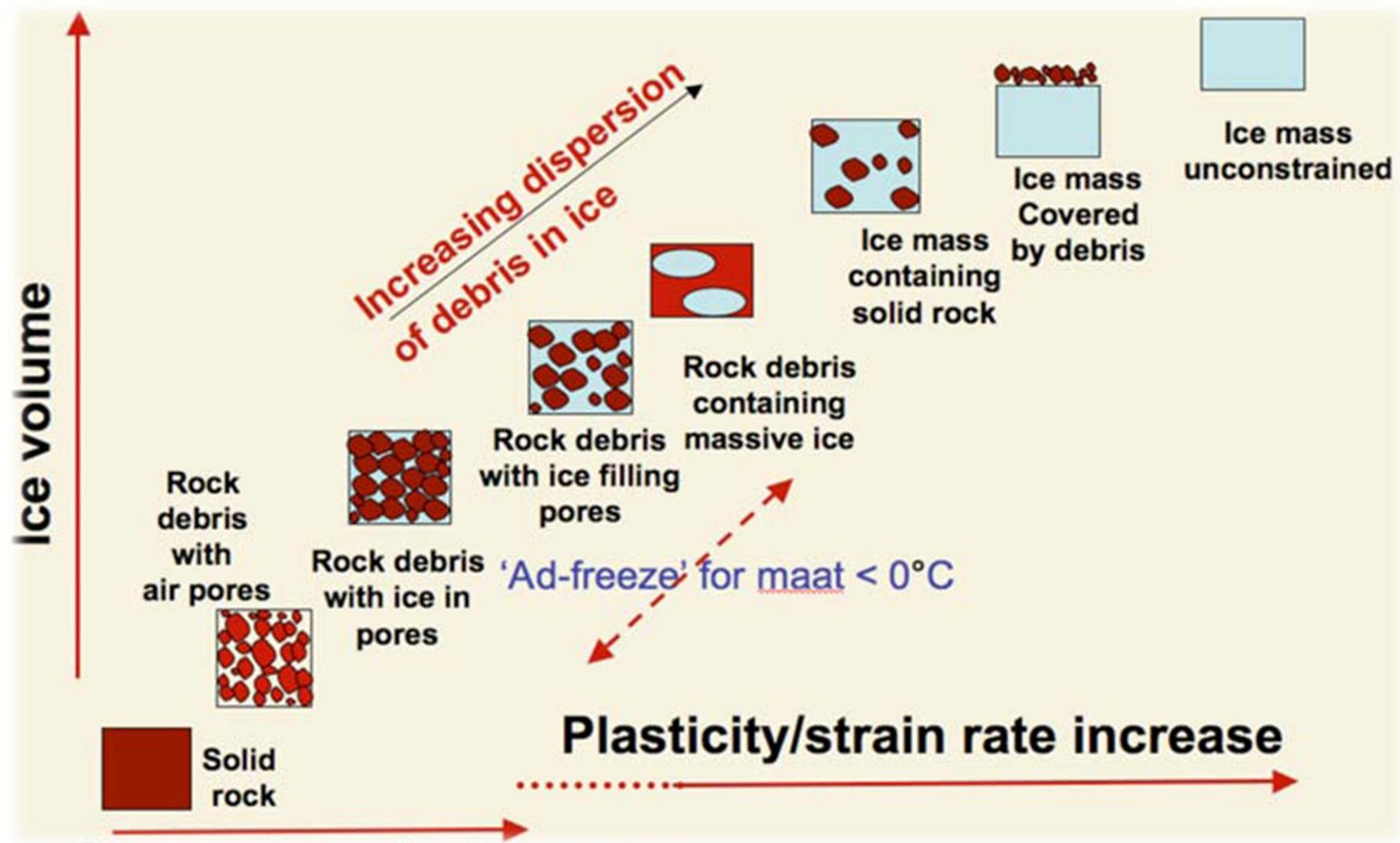
**E' massima in corrispondenza della tavola del permafrost**

Il ghiaccio può essere presente in varie forme:

- ghiaccio **interstiziale** (nei pori liberi del suolo)
- **lenti**
- **vene**
- **corpi di ghiaccio massivo più o meno grandi**

di origine **endogena**  
(aggradazione del permafrost)

di origine **esogena** (ghiaccio sepolto di  
origine glaciale o nivale)



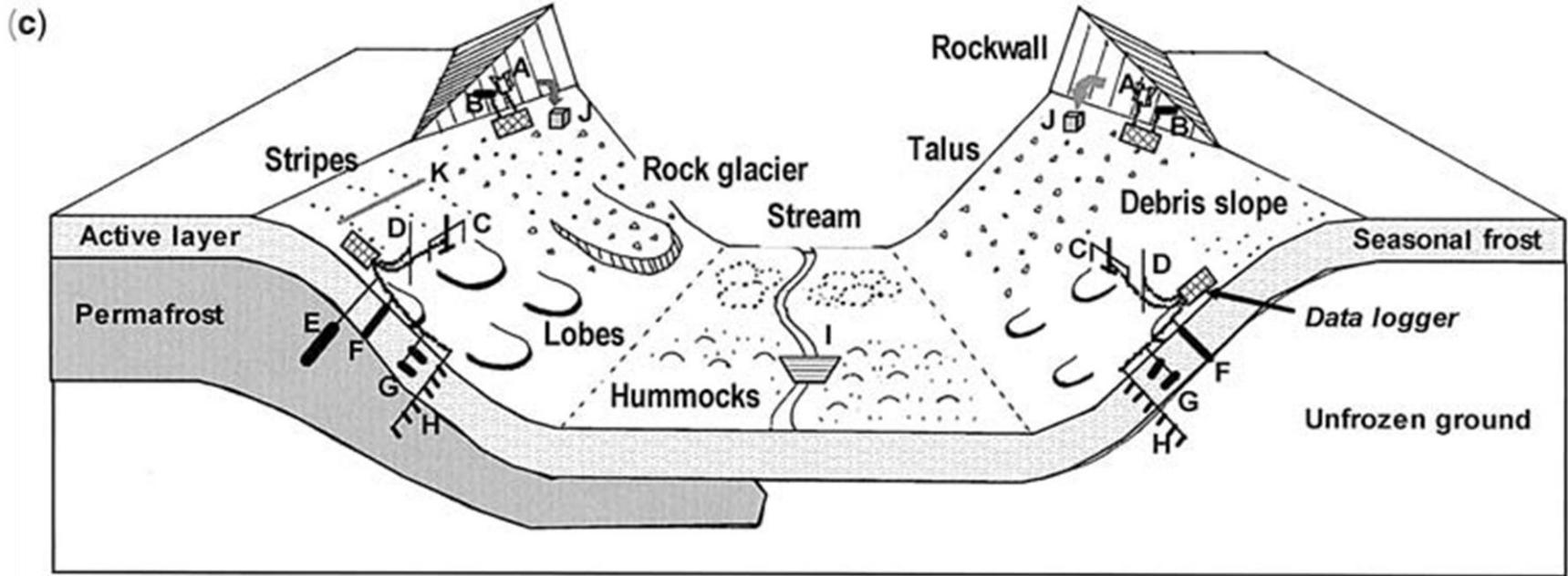
Resistenza al Taglio Diminuisce

## Metodi INDIRETTI per rilevare la presenza e le caratteristiche del permafrost

1. Rilevamento di **Forme geomorfologiche** connesse alla presenza di permafrost
2. Indagini **geofisiche**
3. Indagini **termiche**

## Metodi DIRETTI per rilevare la presenza e le caratteristiche del permafrost

1. Evidenze dirette (**affioramenti**)
2. Perforazioni



## Automatic observations

- A Joint opening
- B Rock temperature
- C Frost heave
- D Snow depth
- E Permafrost creep
- F Solifluction
- G Soil moisture
- H Soil temperature
- I Discharge, turbidity & electric conductivity

## Manual observations

- J Rockfalls
  - K Surface stone movement
- Also, BTS; 3D internal structure by geophysical soundings

Nelle Alpi si tratta soprattutto dei **rock glaciers**



Foto R. Seppi

## I rock glaciers: cosa sono

Sono corpi geologici costituiti da **ghiaccio** e **detrito sciolto** cementati assieme (**permafrost**)

Il ghiaccio può essere **interstiziale** (riempie i pori) o **concentrato** in lenti e corpi

Hanno una caratteristica morfologia superficiale con **rughe, solchi** e **scarpate** ben definite

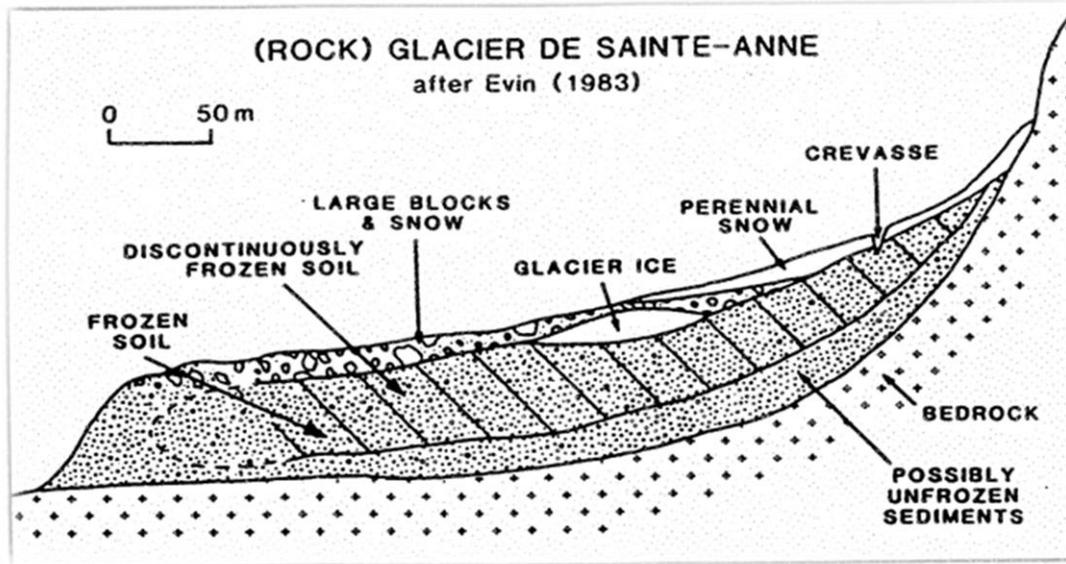


Foto R. Seppi

Sono dotati di **movimento**, dovuto alla deformazione plastica del permafrost

Indicano la presenza di **permafrost** in ambiente alpino

Sono dotati di **movimento**, dovuto al creep del permafrost contenuto al loro interno



## Rock glacier alpini: Classificazione

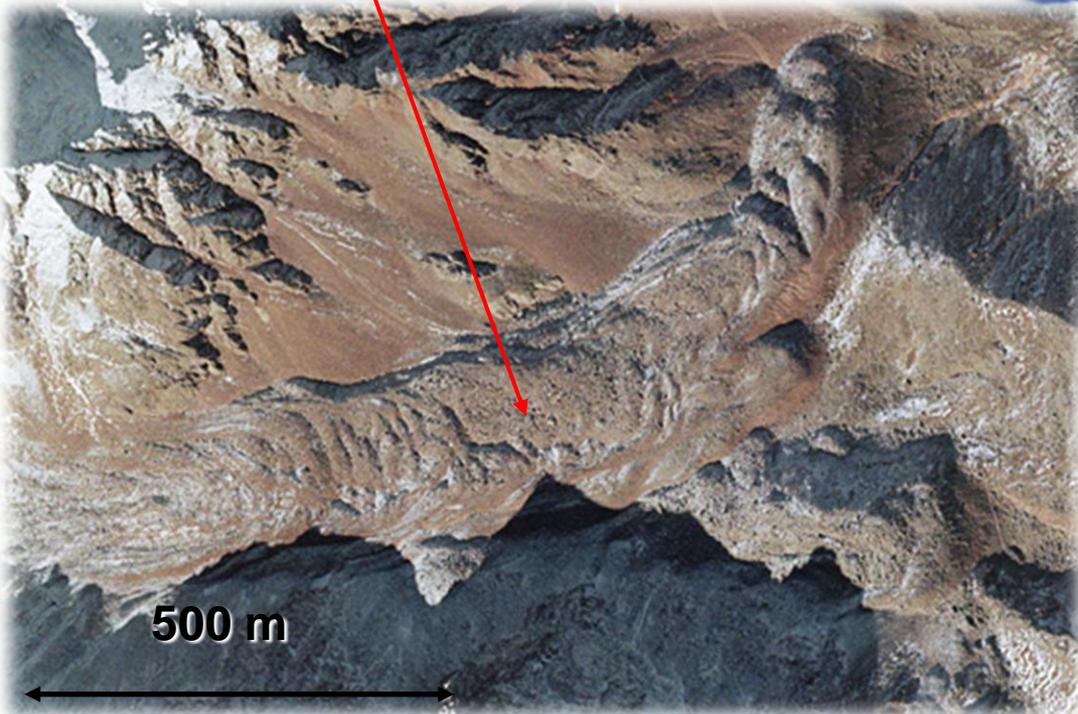
I rock glaciers sono classificati in diversi modi, che cambiano a seconda dei criteri che vengono adottati; non c'è una classificazione univoca e accettata da tutti

Dal punto di vista **morfologico**

- Lobate RG
- Tongue shape RG



Foto R. Seppi



500 m



Rughe e solchi

Foto R. Seppi

Lunghezza: poche decine di m /1-2 km  
Larghezza: 100 200 m  
Spessore: > 50 m

In entrambe le tipologie di rock glacier (lobate e tongue shape) si trovano gli stessi tipi di morfologie, dovute al flusso della massa detritica mista a ghiaccio

Scarpate laterali e frontali



Foto R. Seppi



Foto R. Seppi

# Classificazione: Dal punto di vista morfodinamico

**RG attivi** = contengono permafrost e si muovono

**RG inattivi** = contengono permafrost ma non si muovono

**RG relitti** = non contengono più permafrost e non si muovono

**RG intatti**



Foto R. Seppi

Foto R. Seppi



Foto A. Carton

# Classificazione: Dal punto di vista morfodinamico

RG attivi

RG inattivi

RG relitti



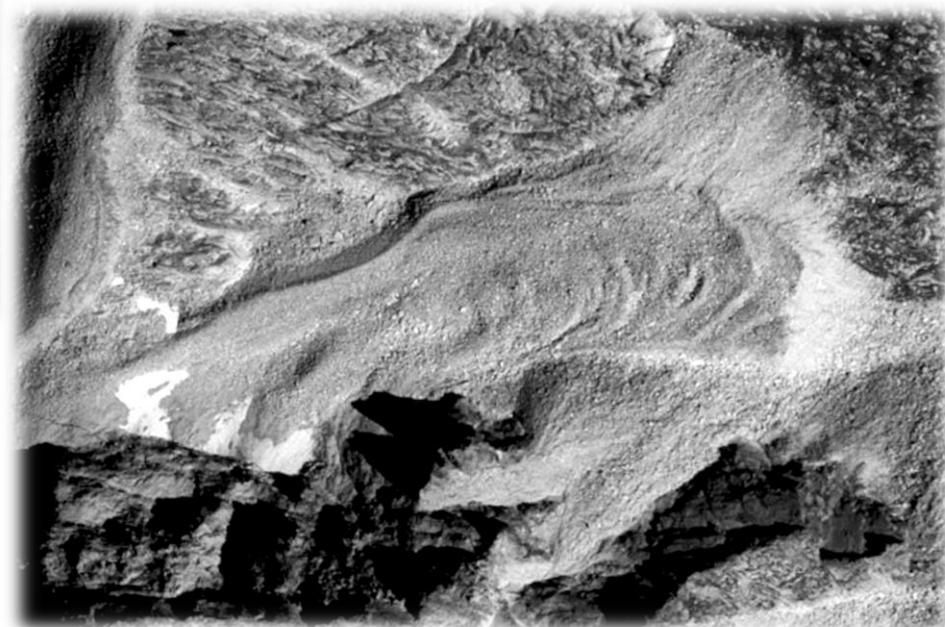
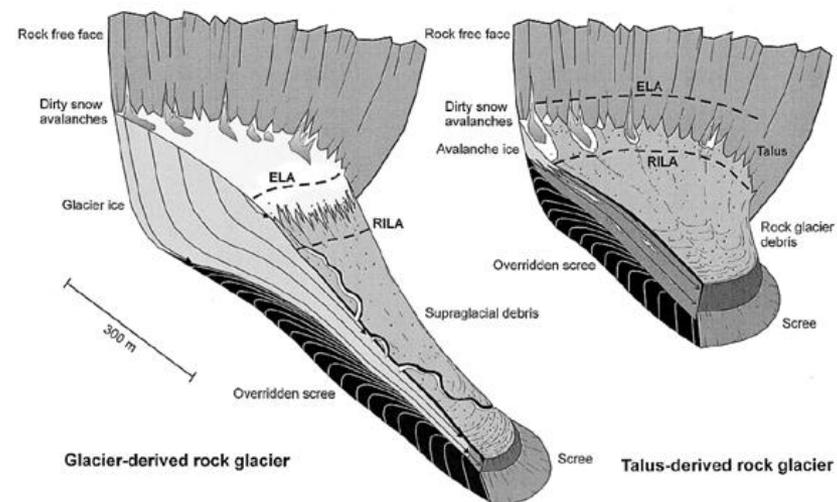
Foto R. Seppi

Foto R. Seppi



Foto A. Carton

- **Talus (o talus-derived) rock glaciers**
- **Debris (o glacier-derived) rock glaciers**



Scuola americana:

- I rock glaciers sono fenomeni di origine glaciale (il ghiaccio che contengono è di origine glaciale)

Scuola europea:

- I rock glaciers sono un fenomeno strettamente periglaciale

La presenza di rock glacier attivi indica la presenza di permafrost e quindi di precise condizioni climatiche e ambientali

La distribuzione dei rock glacier in una certa area consente di stimare la **distribuzione del permafrost** e la quota minima alla quale esso si colloca; sono utilizzati per **verificare e validare** i modelli di mappatura del permafrost

La presenza di rock glacier relitti (senza permafrost) a quote relativamente basse (meno di 2000 m) indica che in passato le condizioni climatiche erano diverse e più fredde di quelle attuali

### Movimenti in massa su versante (*frost creep, geliflussione, permafrost creep*)

movimenti di versante associati al sollevamento da gelo e all'azione della gravità, possono verificarsi anche in presenza di **PERMAFROST** e danno luogo a forme caratteristiche



Foto A. Carton

**Geliflussione: processo di soliflusso associato a terreni stagionalmente gelati (*seasonal frozen ground*) o con presenza di **PERMAFROST****

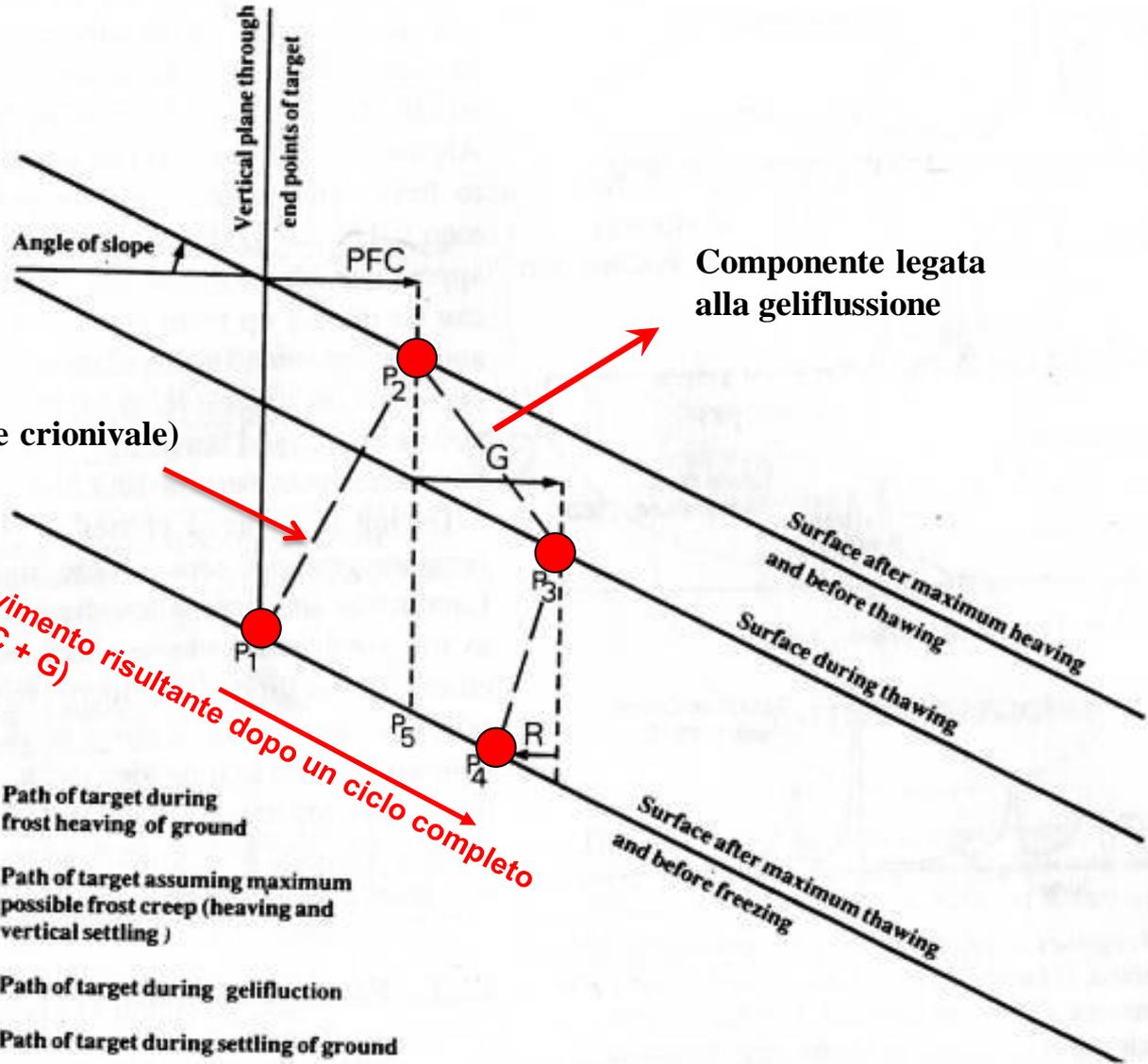
**Il processo di GELIFLUSSIONE è difficilmente separabile da quello di REPTAZIONE CRIONIVALE (*frost creep*)**

# Forme legate alla geliflusione: criosolleamento e geliflusione

Componente legata al frost creep (componente crionivale)

Componente legata alla geliflusione

Movimento risultante dopo un ciclo completo (PFC + G)



- $P_1 \rightarrow P_2$  Path of target during frost heaving of ground
- $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_5$  Path of target assuming maximum possible frost creep (heaving and vertical settling)
- $P_2 \rightarrow P_3$  Path of target during gelifluction
- $P_3 \rightarrow P_4$  Path of target during settling of ground

## Forme legate alla geliflusione: lobi di geliflusso



I fenomeni di geliflusso possono interessare sia suoli soggetti a **gelo stagionale**, sia lo strato attivo di suoli con **permafrost**



# Forme legate alla geliflusione: lobi di geliflusso



Foto A. Carton

# Forme legate alla geliflusione: lobi di geliflusso

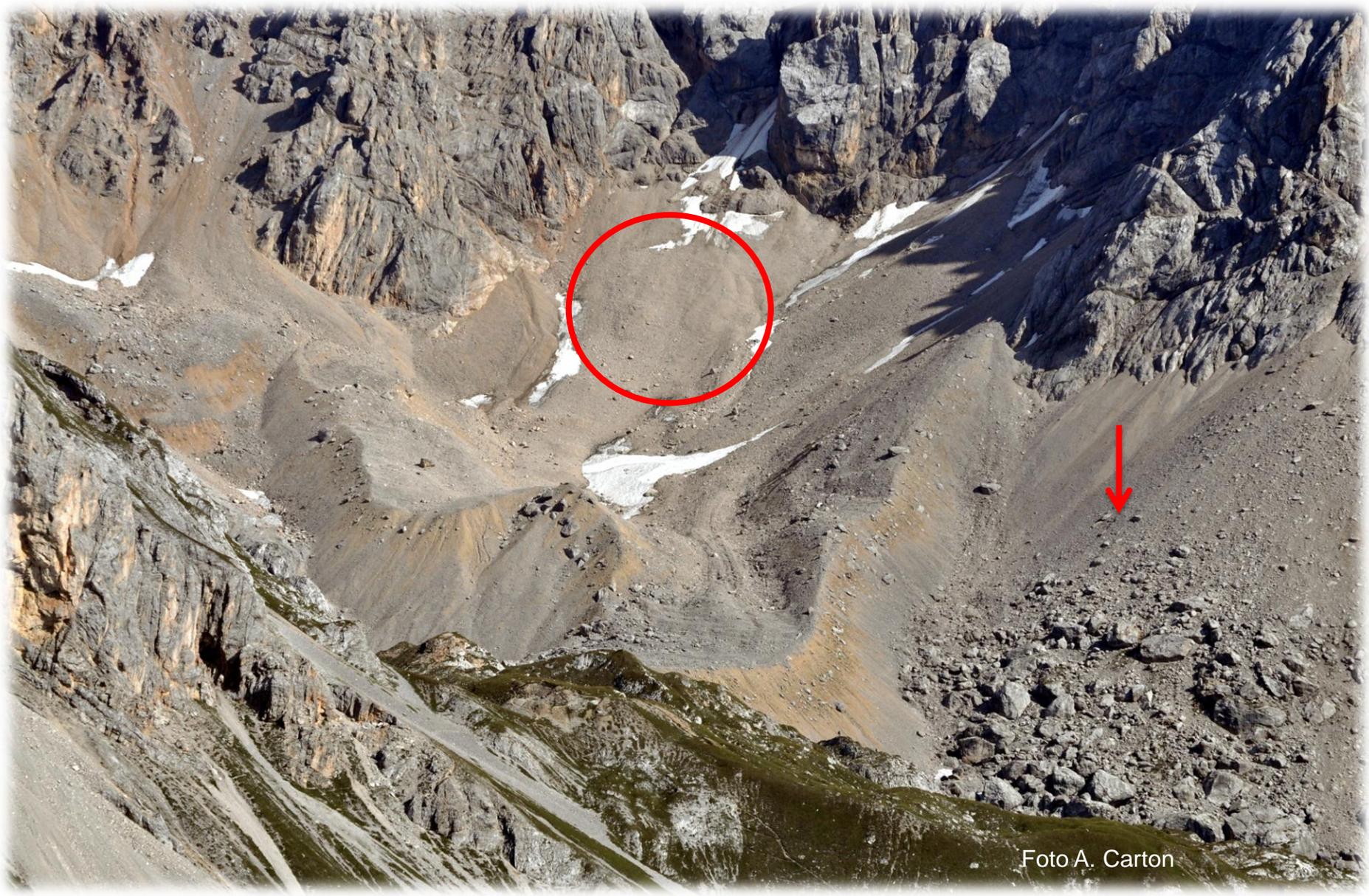


Foto A. Carton

# Forme legate alla geliflusione: lobi di geliflusso



Foto A. Carton

## Uomo\_8

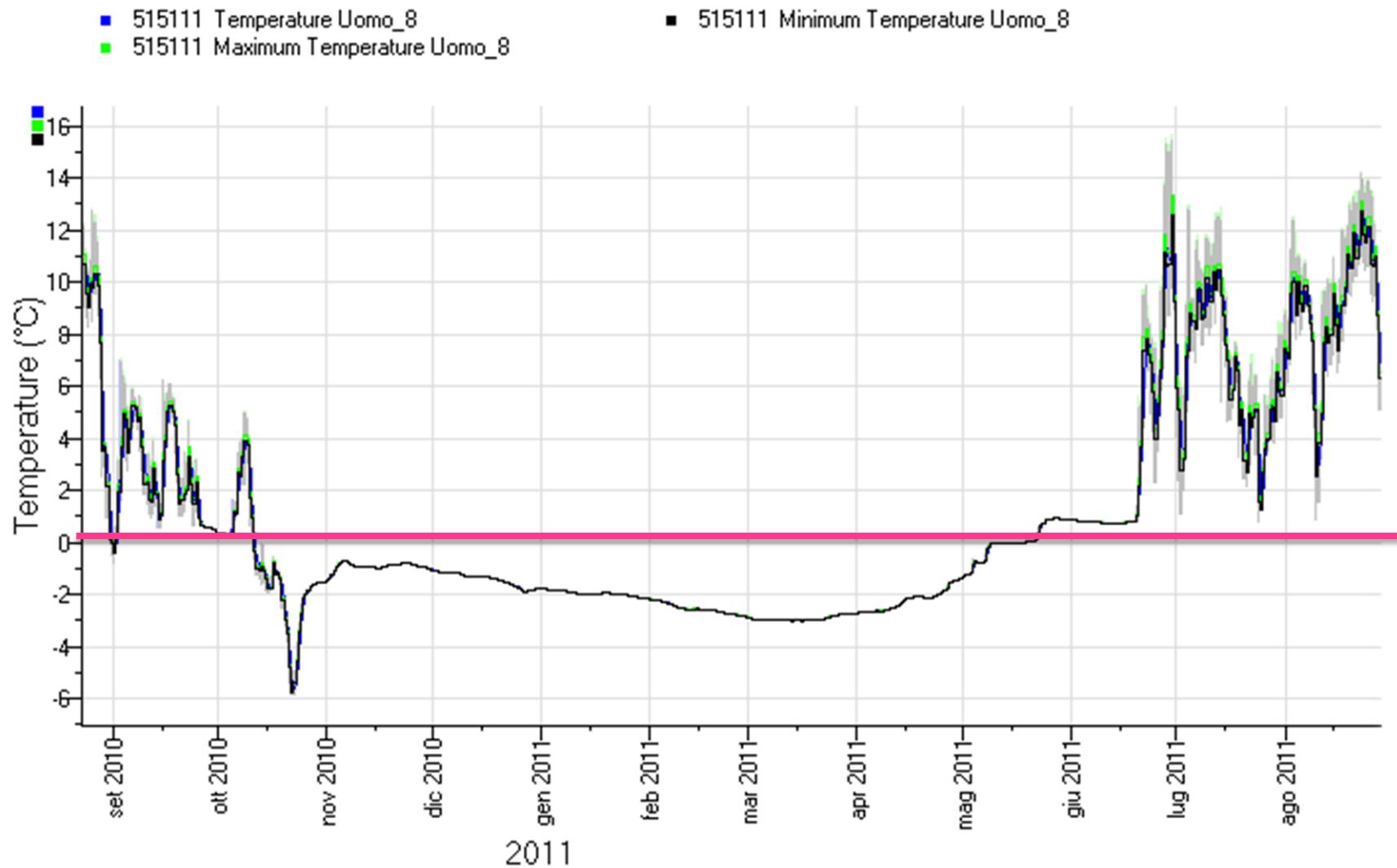
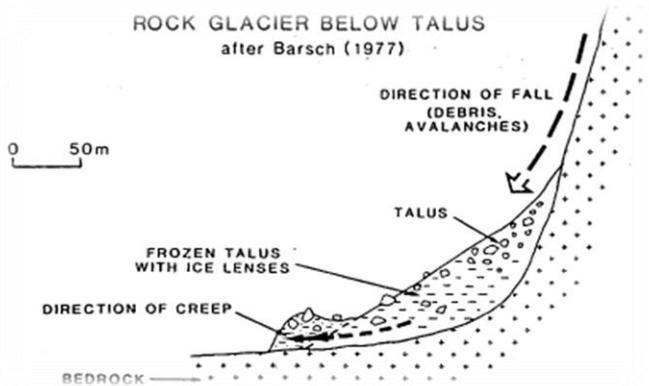
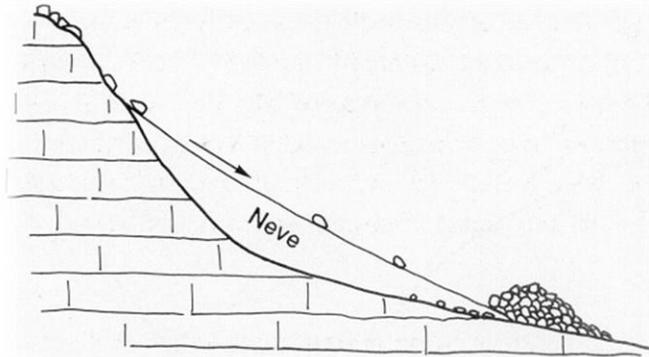




Foto A. Carton

Accumuli detritici ubicati ai piedi di falde caratterizzati da una fronte ripida allungata parallelamente al versante con una depressione tra versante e cresta del corpo.



Da alcuni autori **sono riferite alla presenza di permafrost** (Barsch, 1977; Haeberli, 1985). Indicano queste forme come il prodotto di un **creep del permafrost** presente lungo certe falde detritiche che a causa della morfologia del substrato o dell'insufficiente produzione di detrito non evolvono in "talus rock glacier"

Tof di Malè (Val di Peio)



Foto R. Seppi



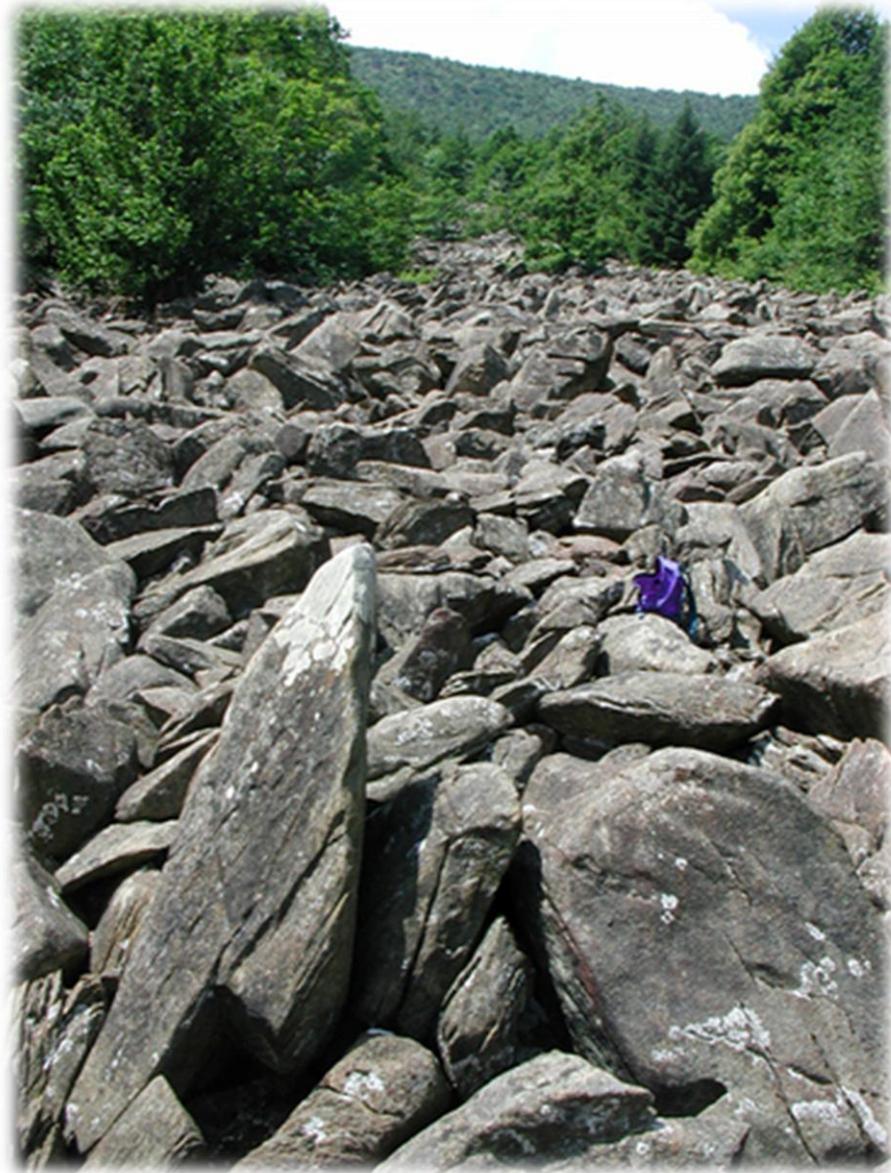
Val d'Amola

Foto R. Seppi

La degradazione del permafrost sta aumentando i **processi di dissesto idrogeologico** e sta creando situazioni di **rischio ambientale** in alta quota (frane, crolli, debris-flow)

## Block stream

Accumuli di blocchi da angolari a sub angolari in movimento lungo un versante. I blocchi presentano strutture di EIEZIONE CRIOGENICA (frost jacking) e limiti abrupti rispetto ai depositi circostanti. Caratteristici blocchi verticalizzati.



- Non presentano a monte evidenze di parteti, falde di alimentazione.
- Blocchi spigolosi non alterati chimicamente.
- Aree di bedrock in situ con evidenze della loro generazione per gelifrazione.
- MOVIMENTO: creep dei blocchi al di sopra del suolo gelato con tenore di ghiaccio > 50%, pertanto sono indicatori di permafrost

## Blocchi aratori (Ploughing boulder)

I blocchi aratori si possono trovare:  
- sia in aree soggette a **gelo stagionale**  
- sia in quelle caratterizzate da **permafrost**; in questo caso la base del masso deve essere meno profonda dello strato attivo



Foto A. Carton

Fluiscono verso valle per la loro massa: solco a monte e ruga a valle. Strato attivo spessore inferiore al diametro del masso

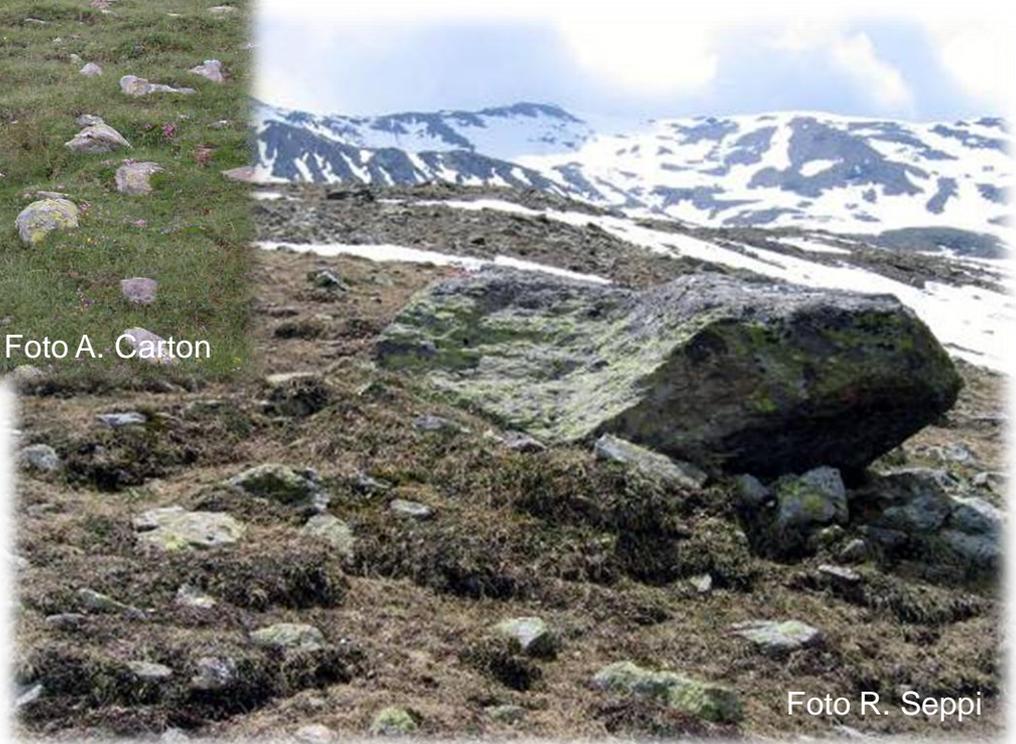


Foto R. Seppi

# Blocchi aratori (Ploughing boulder)



Foto A. Carton



Fessurazione dovuta a **contrazione termica del suolo** a temperature sotto il punto di congelamento; si originano suoli di tipo poligonale (eventualmente con cunei di ghiaccio); processo strettamente connesso con la **presenza di permafrost**

# Suoli strutturati

- In permafrost continuo e discontinuo diametro minimo 2 m
  - Permafrost sporadico o ghiaccio stagionale diametri inf. ai 2 m.
- (Goldthwait, 1976)

Foto C. Baroni



Foto A. Carton

Suoli selezionati : (criosollevarimento)  
Discriminante per la distinzione tra suoli strutturati legati al permafrost è il diametro delle forme.

# Suoli strutturati

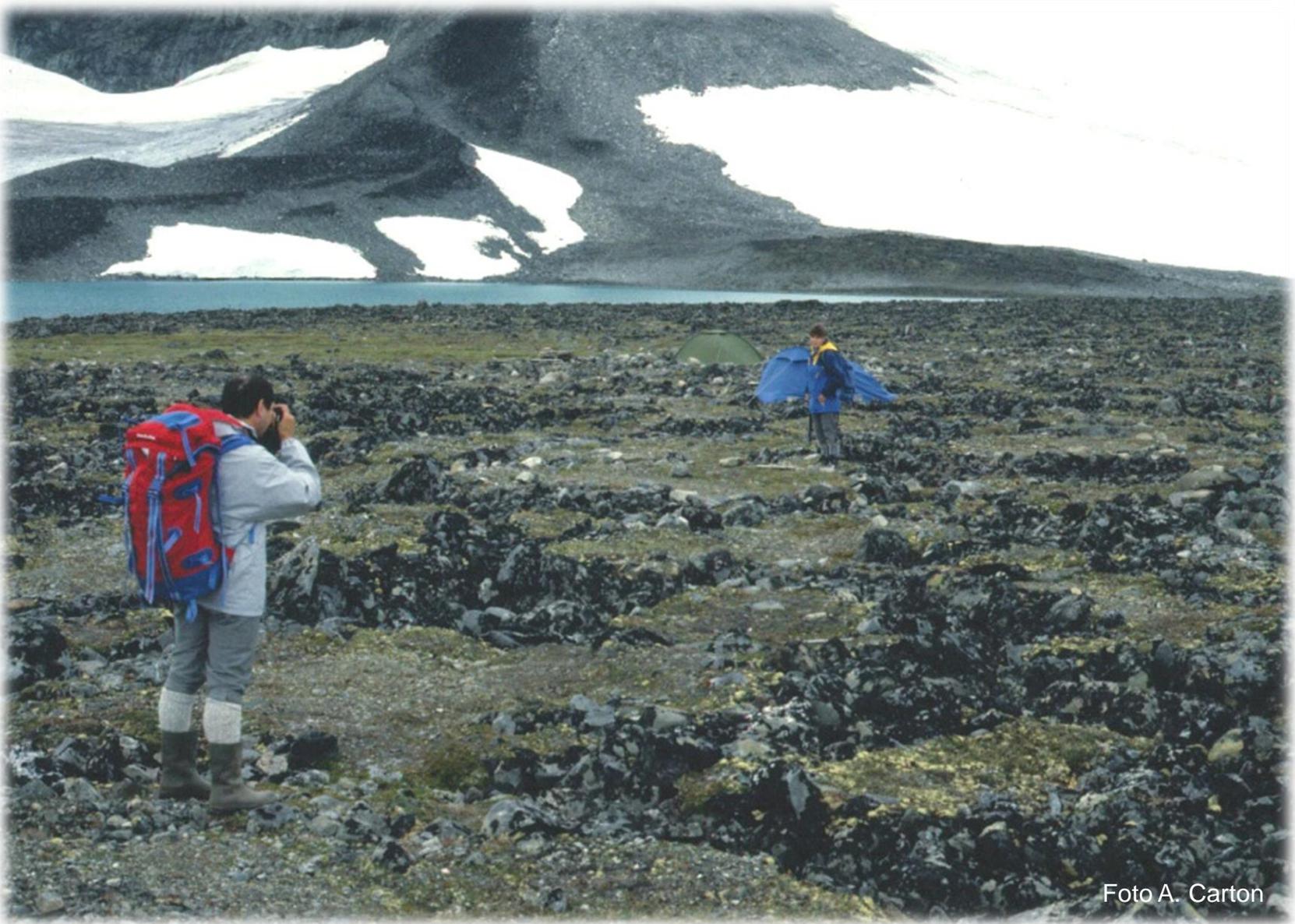


Foto A. Carton



Provincia Autonoma di Trento  
Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture  
Servizio Geologico



## Progetto PermaNET *permafrost long term monitoring NETWORK*

# Le “forme” del permafrost alpino

**Alberto Carton**

Dipartimento di Geografia “G. Morandini” – Università di Padova



Provincia Autonoma di Trento  
Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture  
Servizio Geologico



Università di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



Mountain-eering S.r.l.



Università di Pavia  
Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente



Università di Padova  
Dipartimento di Geografia