



*36° Convegno Nazionale
Trieste 14-16 novembre 2017*

Crio-geofisica

Alberto Godio
DIATI – Politecnico di Torino



36° Convegno Nazionale
Trieste 14-16 novembre 2017

Contenuti

- Significato degli studi della criosfera per l'identificazione del rischio dovuto al collasso in ambienti glaciali e glacializzati
- Panoramica delle ricerche/studi in ambienti glaciali
- Analisi di casistica di studio in ambiente alpino
- Integrazione con gli studi glaciologici



*36° Convegno Nazionale
Trieste 14-16 novembre 2017*

Perché voler conoscere i ghiacciai ...

1. La morfologia, i ghiacciai come modellatori vallivi
2. Ghiacciaio come risorsa idrica e come risorsa idroelettrica..
3. Ghiacciai come indicatori di mutamenti climatici, molto sensibili
4. Identificazione del Rischio in alta quota (crolli in roccia, flooding, laghi effimeri, crolli di ghiaccio...)



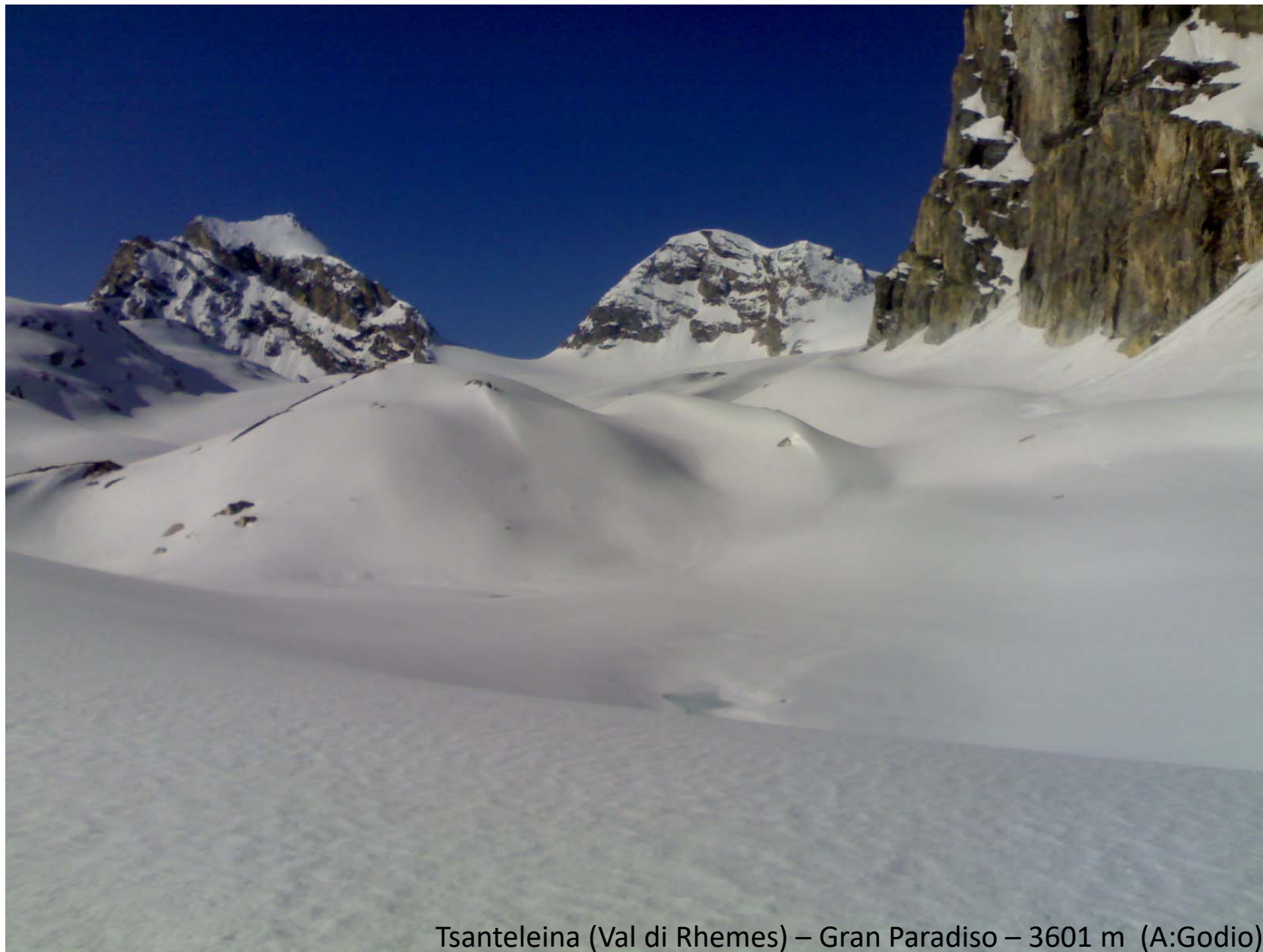
Cortesia M. Diordievic



Alpamayo Cordigliera Blanca – Ande Peruviane – 5950 m

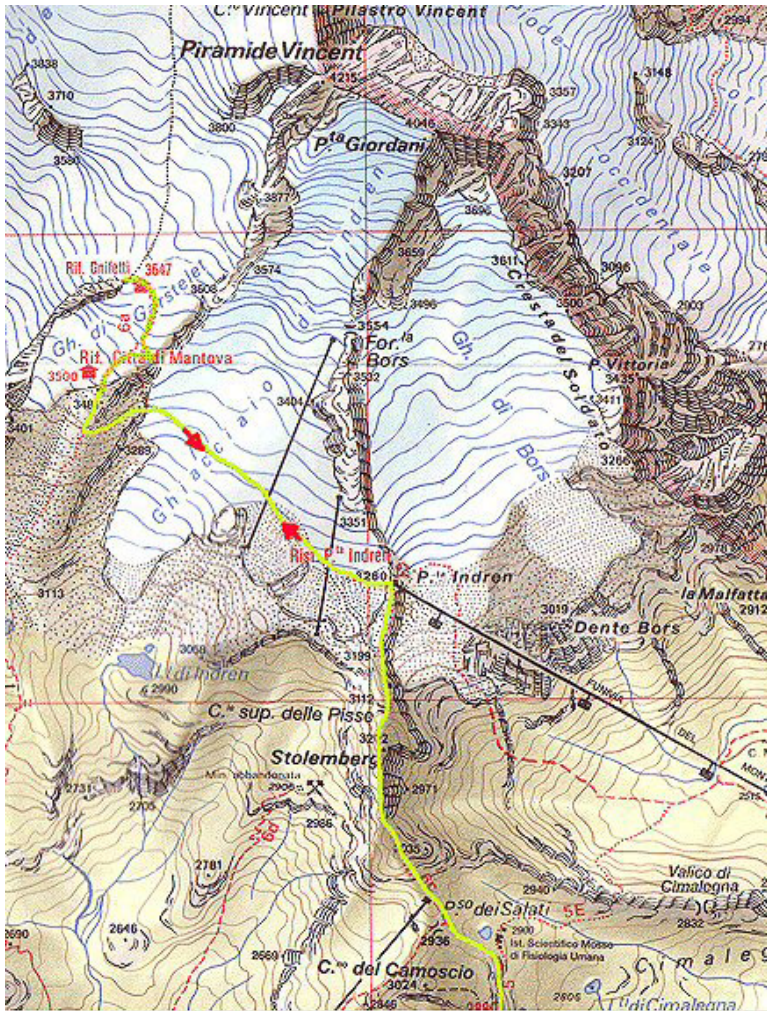


Plateau Rosà - Monte Rosa - Cortesia G. Zanetti

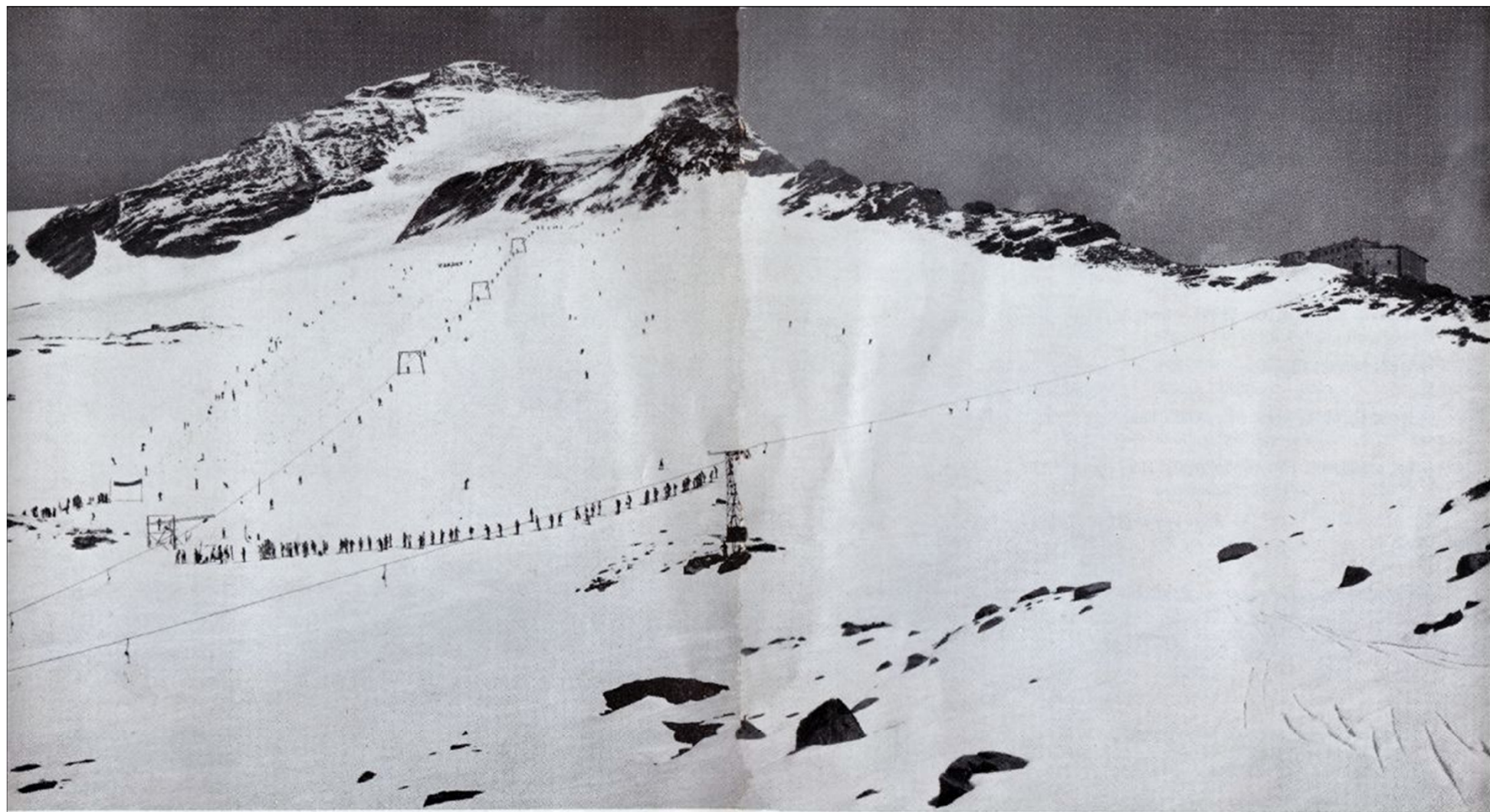


Tsanteleina (Val di Rhemes) – Gran Paradiso – 3601 m (A:Godio)

I ghiacciai come risorsa turistica...



Sci estivo al Ghiacciaio Indren – Monterosa (anni '70)



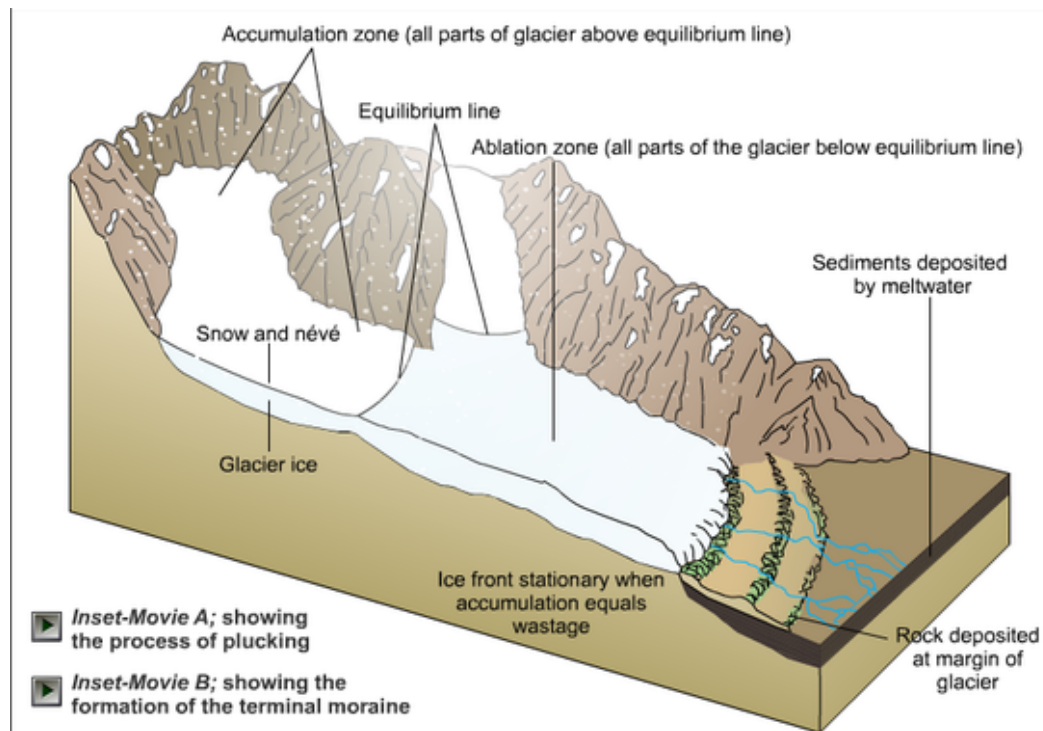
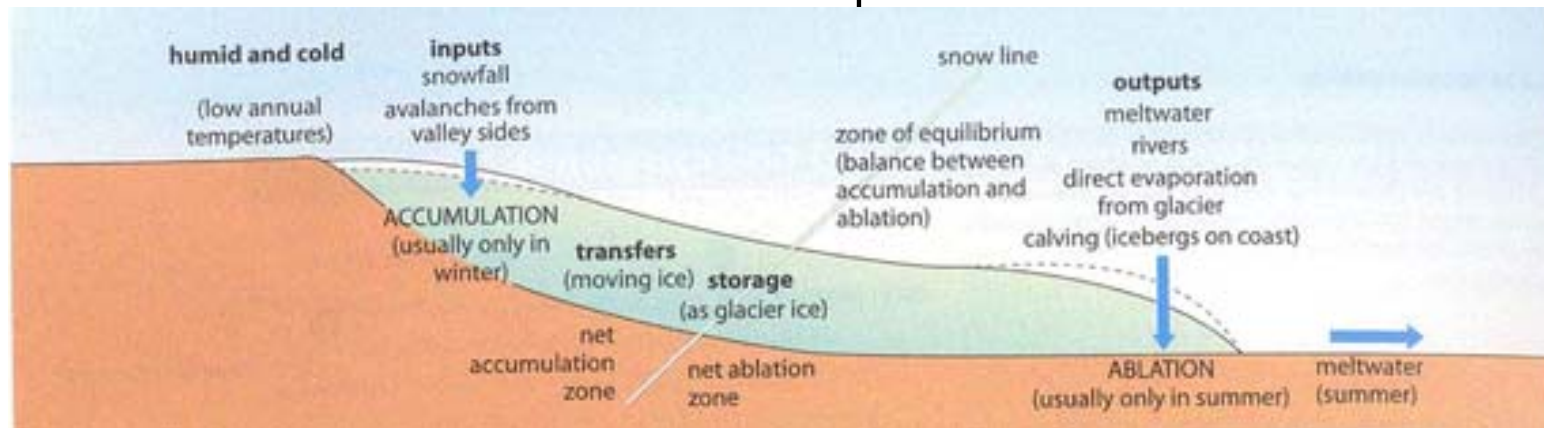
GHIACCIAIO DI INDREN

Sullo sfondo: Piramide Vincent m. 4215 - Punta Giordani m. 4046 - Stazione funivia di Alagna m. 3260

Ghiaccio Indren – Settembre 2012



Sistema termodinamico complesso

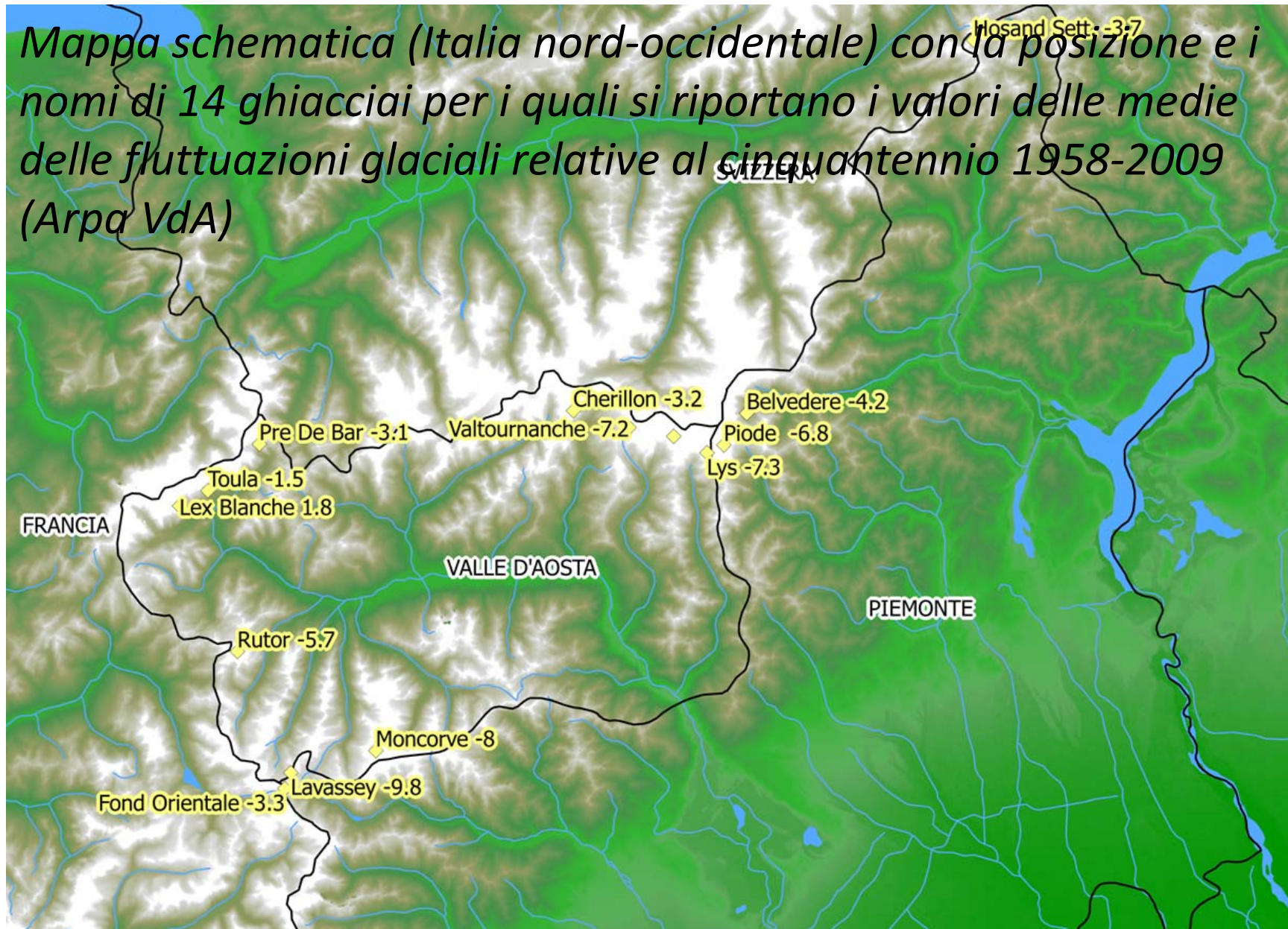


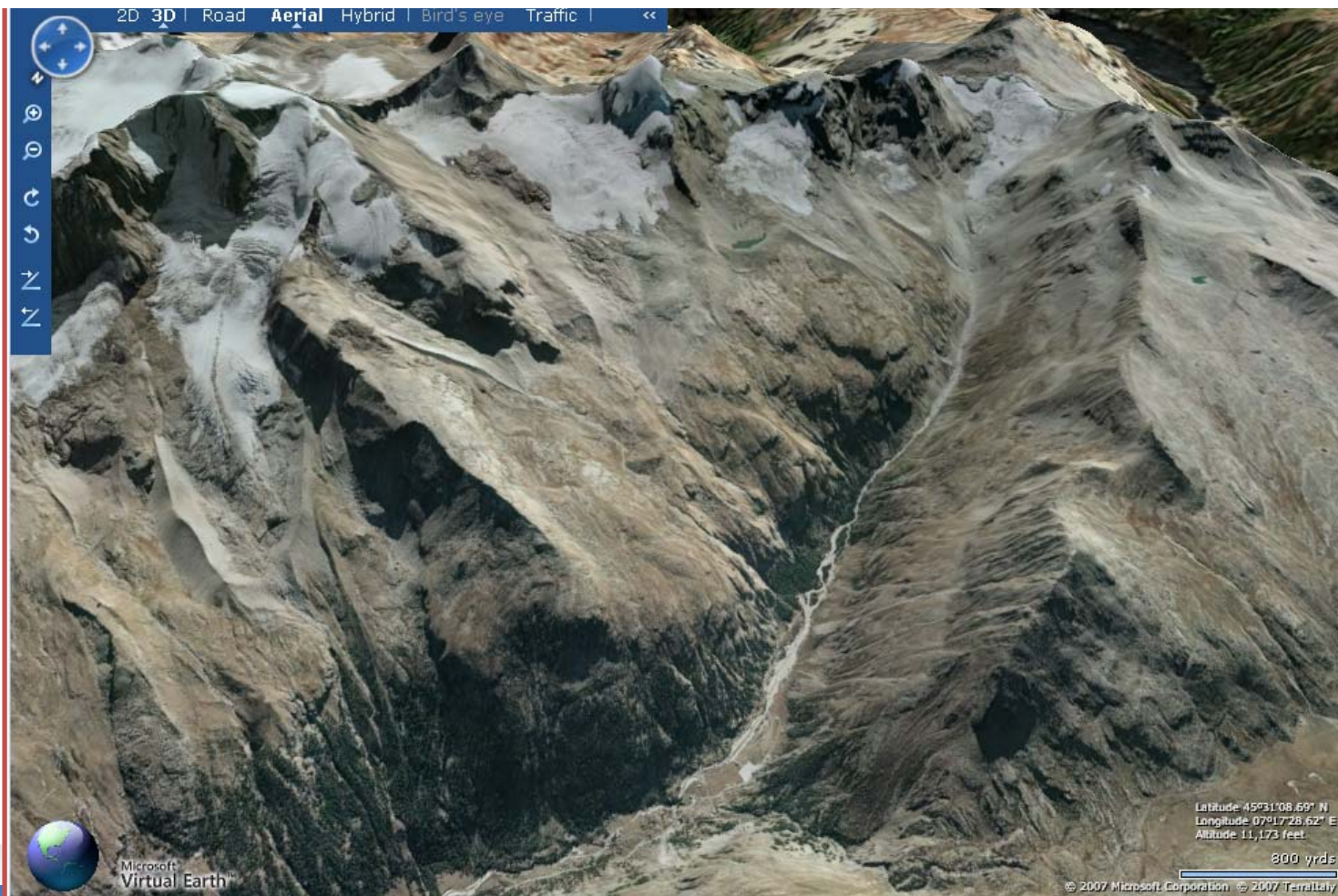


- Cambiamenti delle condizioni atmosferiche (radiazione solare, temperatura dell'aria, precipitazioni, vento, nuvolosità) influenzano il bilancio di massa sulla superficie del ghiacciaio. Tale bilancio è rappresentato dalla differenza tra accumulo e ablazione.
- I cambiamenti cumulativi nel bilancio di massa causano un cambiamento nel volume e nello spessore del ghiacciaio stesso.
- La reazione di un ghiacciaio ai cambiamenti climatici è determinata da una complessa catena di processi: variazioni di lunghezza del ghiacciaio e quindi ad un avanzamento o ad un arretramento del fronte glaciale.

Immagine del ghiacciaio di Pre de Bar (Valle d'Aosta). Immagine tratta dal Catasto Ghiacciai della Regione Valle d'Aosta <http://catastoghiacciai.regione.vda.it/>.

Mappa schematica (Italia nord-occidentale) con la posizione e i nomi di 14 ghiacciai per i quali si riportano i valori delle medie delle fluttuazioni glaciali relative al cinquantennio 1958-2009 (Arpa VdA)





Ghiacciaio Timorion – Gran Paradiso

Arretramento fronte:

1989 - 2014: -151 m (-6 m/y)

2014: - 2 m

2013: - 2 m

2012: - 7 m

2011: - 8 m

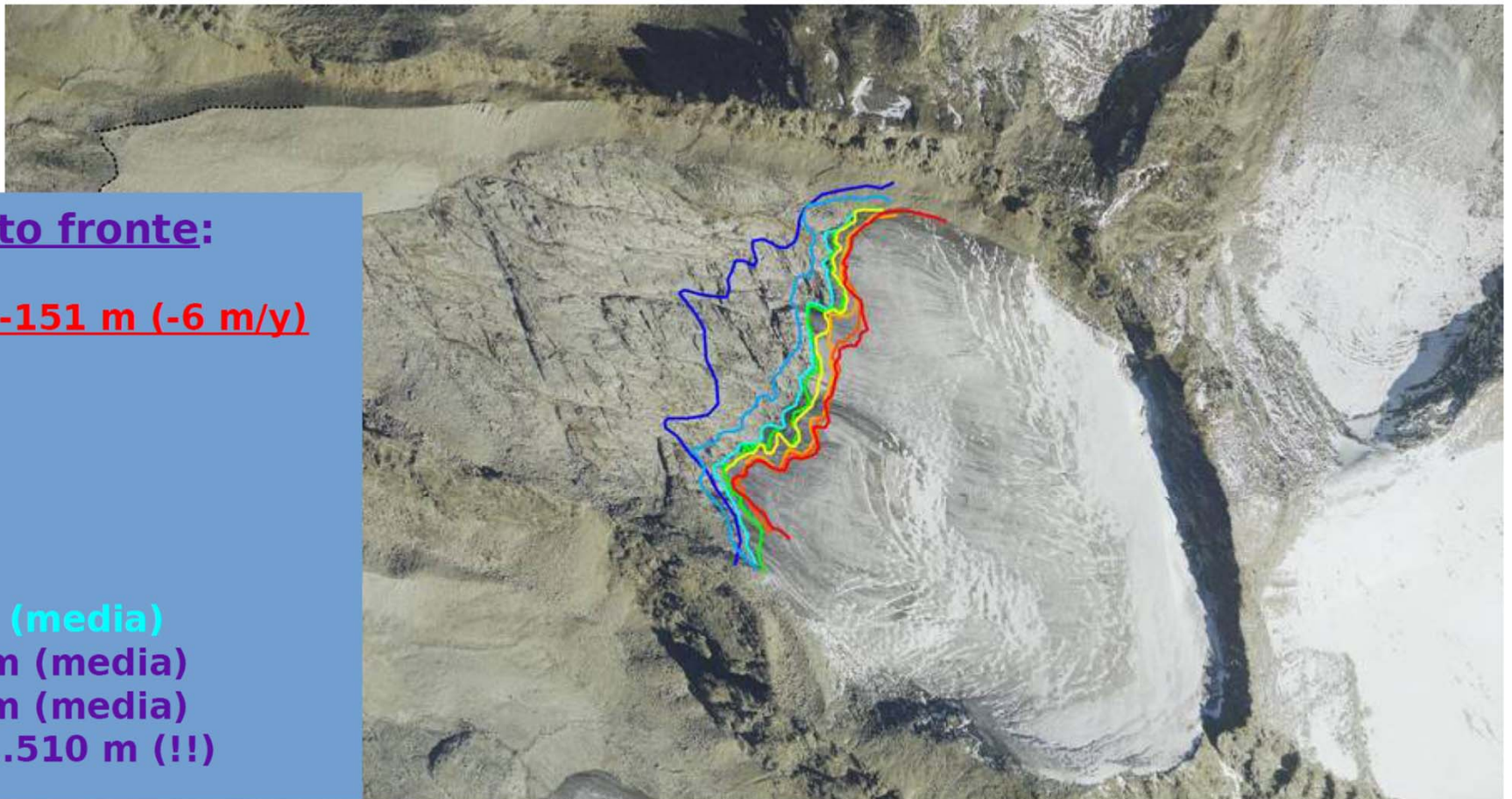
2010: - 13 m

2009: - 3,5 m (media)

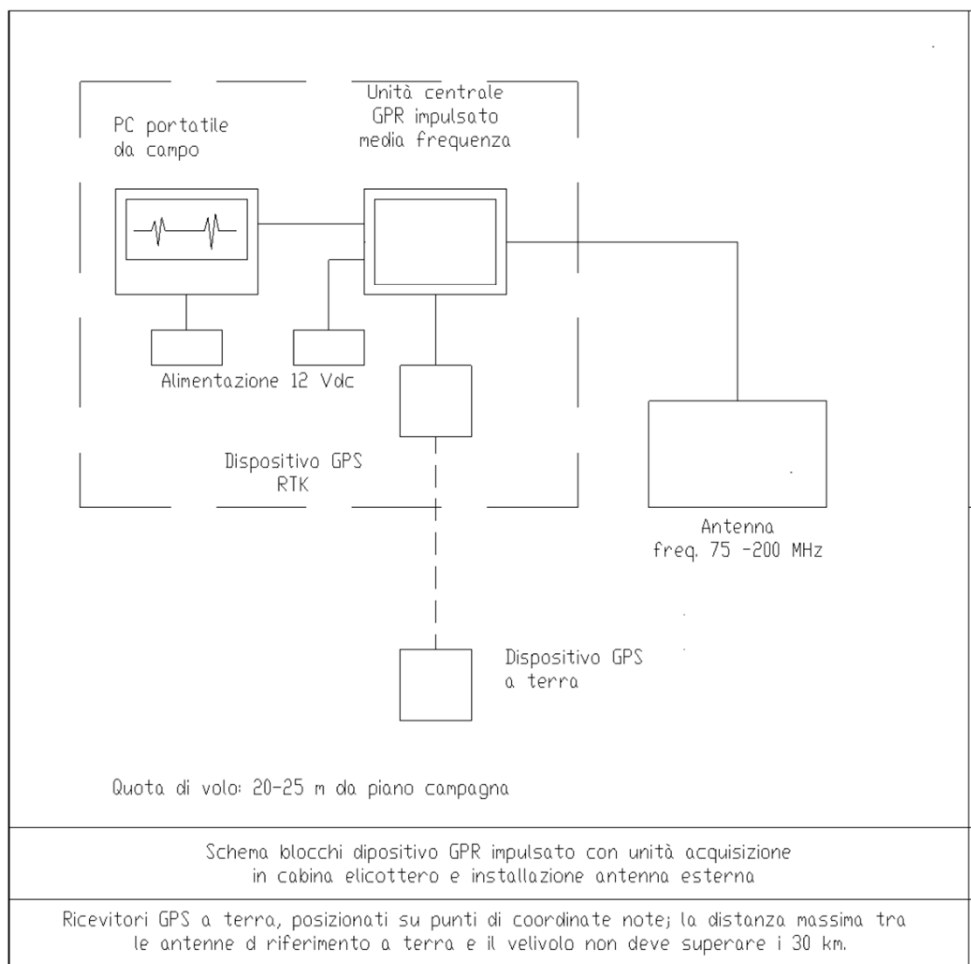
1999/05: - 6 m (media)

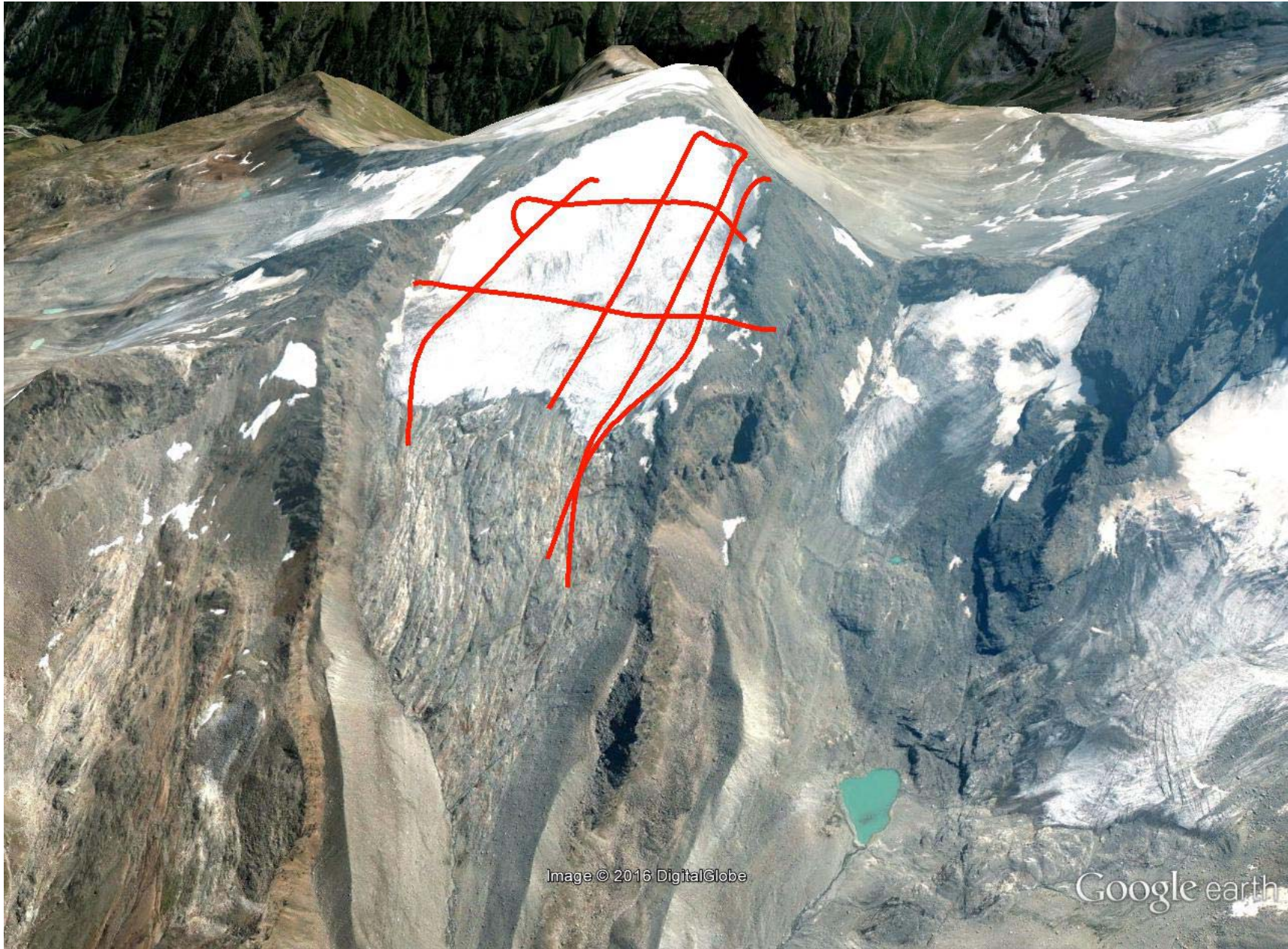
1989/99: - 6 m (media)

PEG/2012: - 1.510 m (!!)

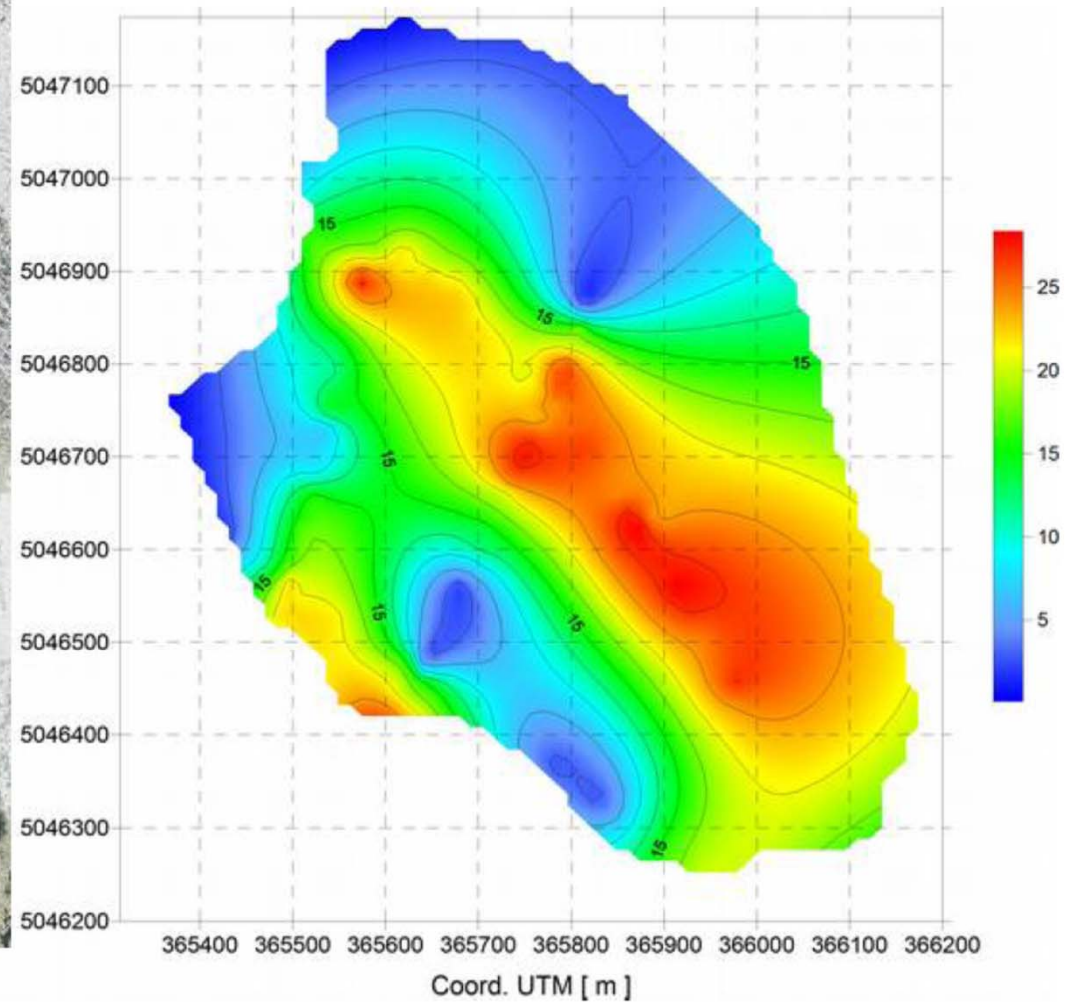


Metodo georadar elitrasportato – Applicazioni in ambiente alpino





Valutazione spessore ghiaccio (Timorion)



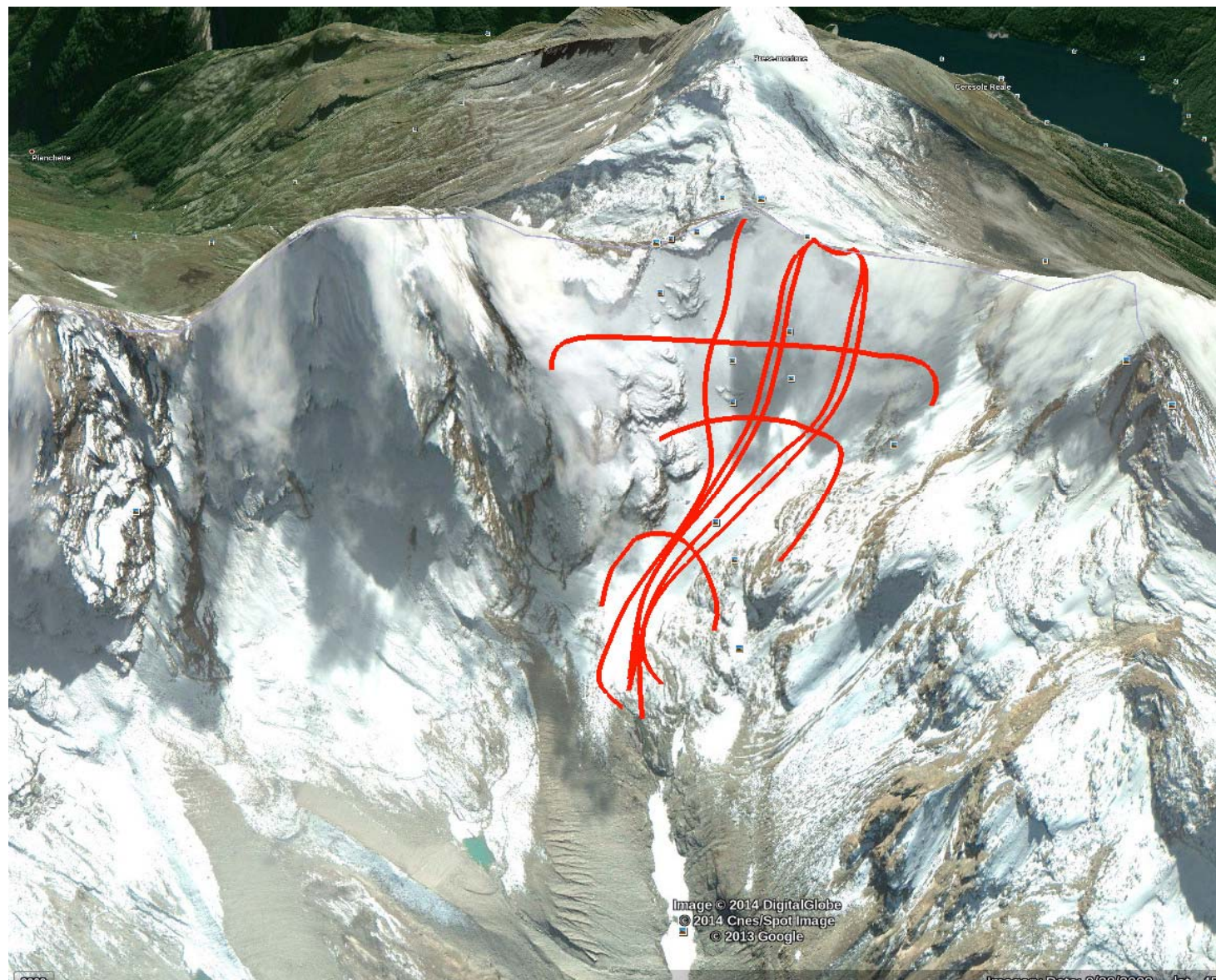
Georadar elitrasportato – Ghiacciaio Grand Etret (Linee di volo - 2013)

Acquisizione dati:

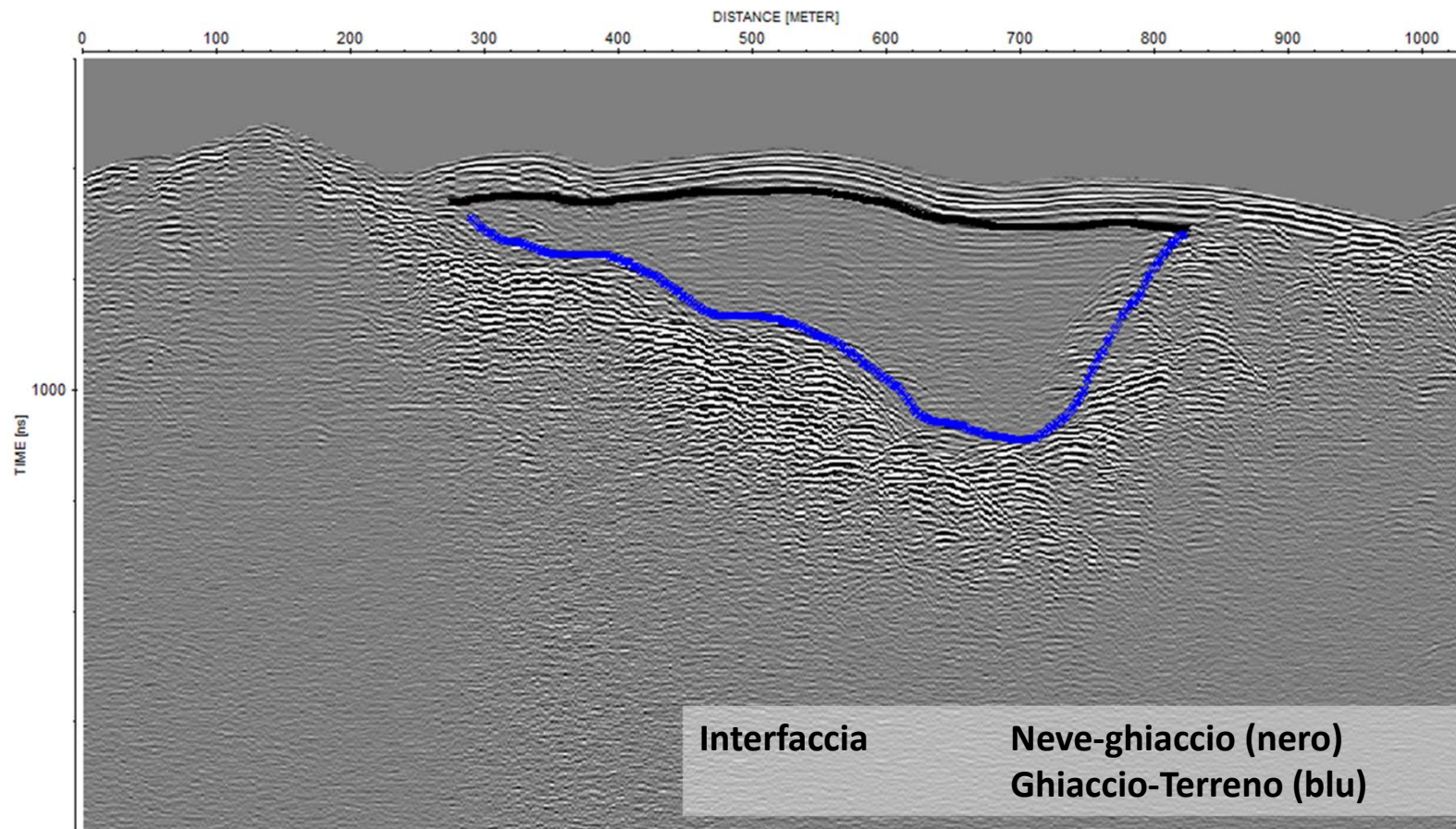
Georadar Impulsato con
antenna dipolo

Frequenza principale: 75 MHz

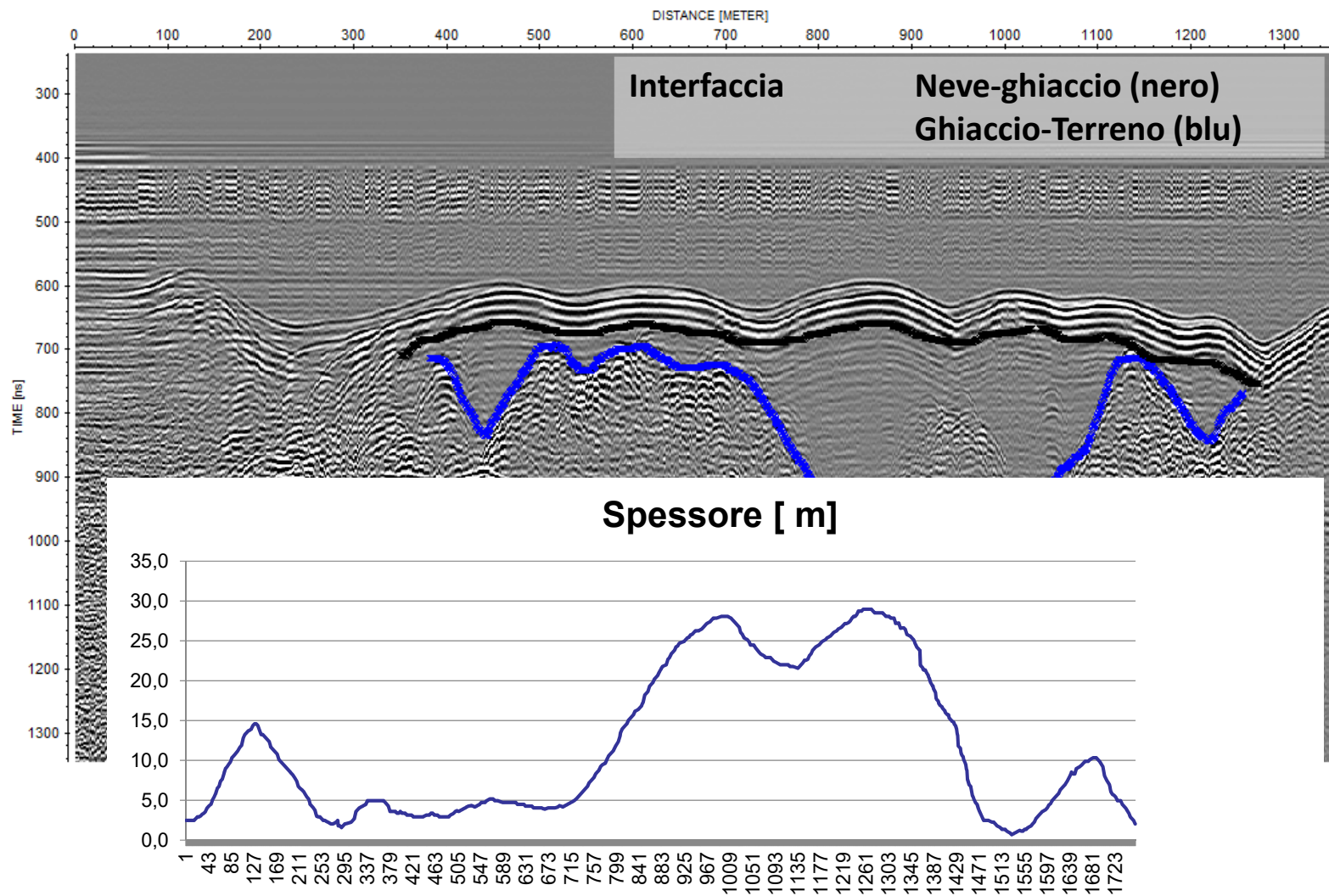
Tracking linee di volo: GPS in
Real Time Kinematic mode
con stazione di riferimento a
terra per correzioni



Georadar elitrasportato – Grand Etret (2013) – Line 5 (75 MHz)



Georadar elitrasportato – Grand Etret - Line 2 (75 MHz)

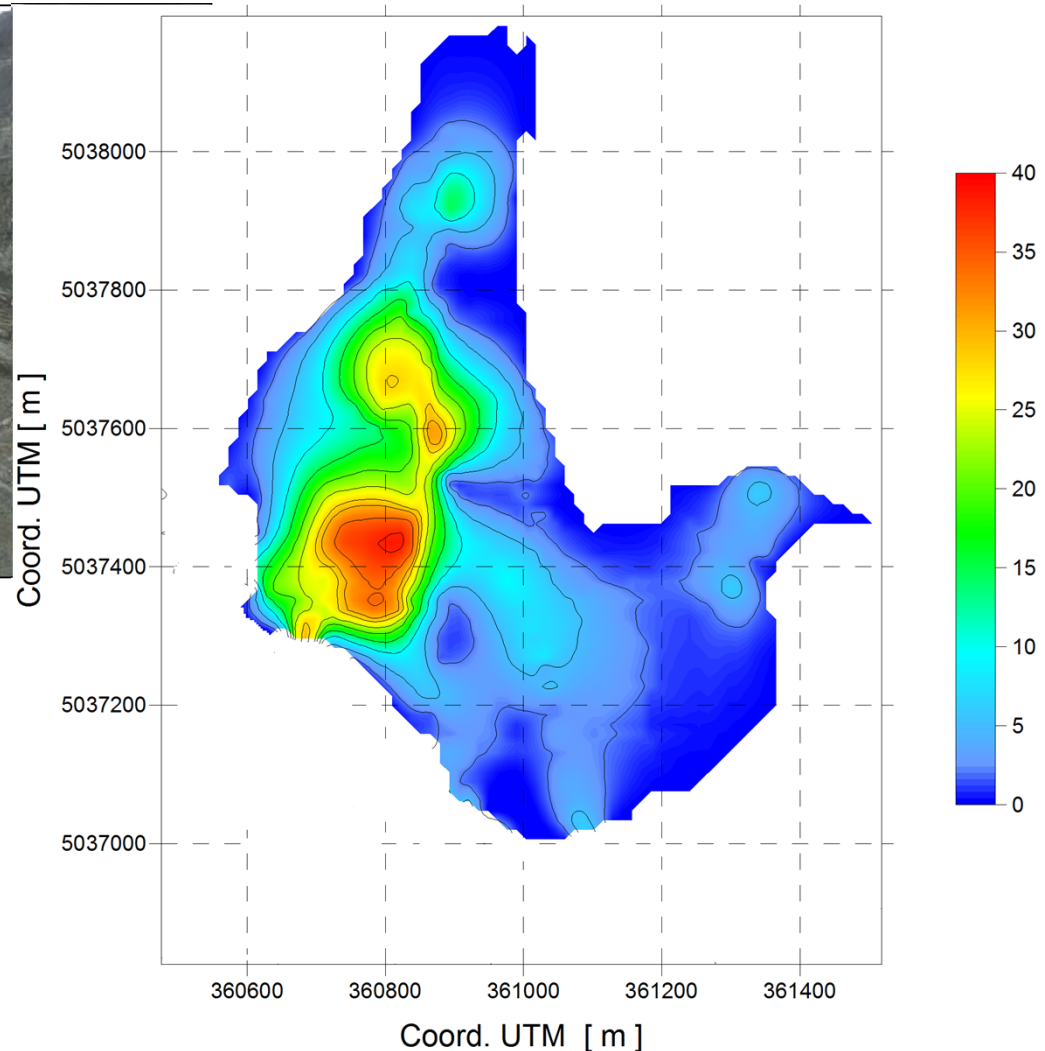




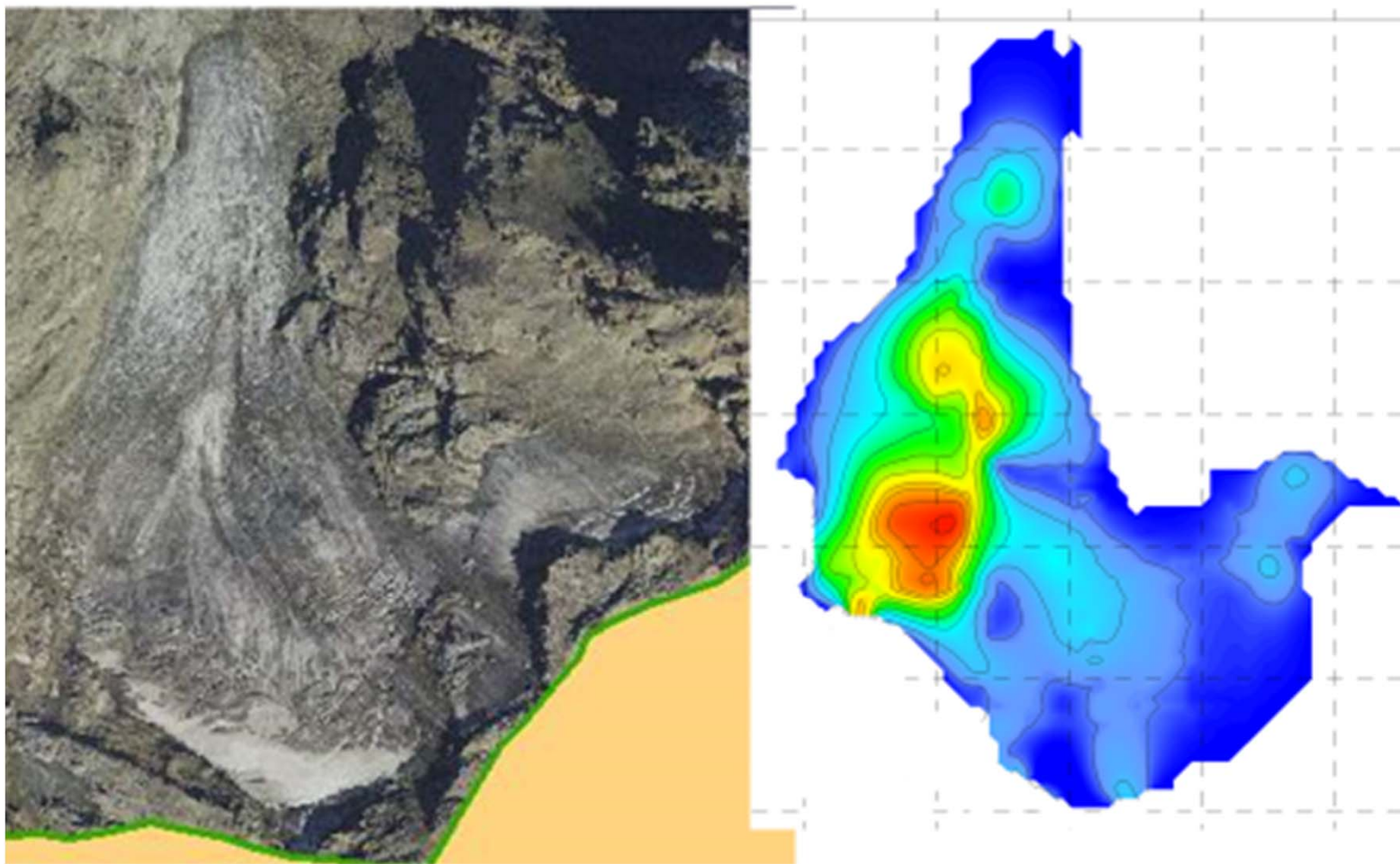
Metodo georadar elitrasportato – Ghiacciaio Grand Etret (2013)



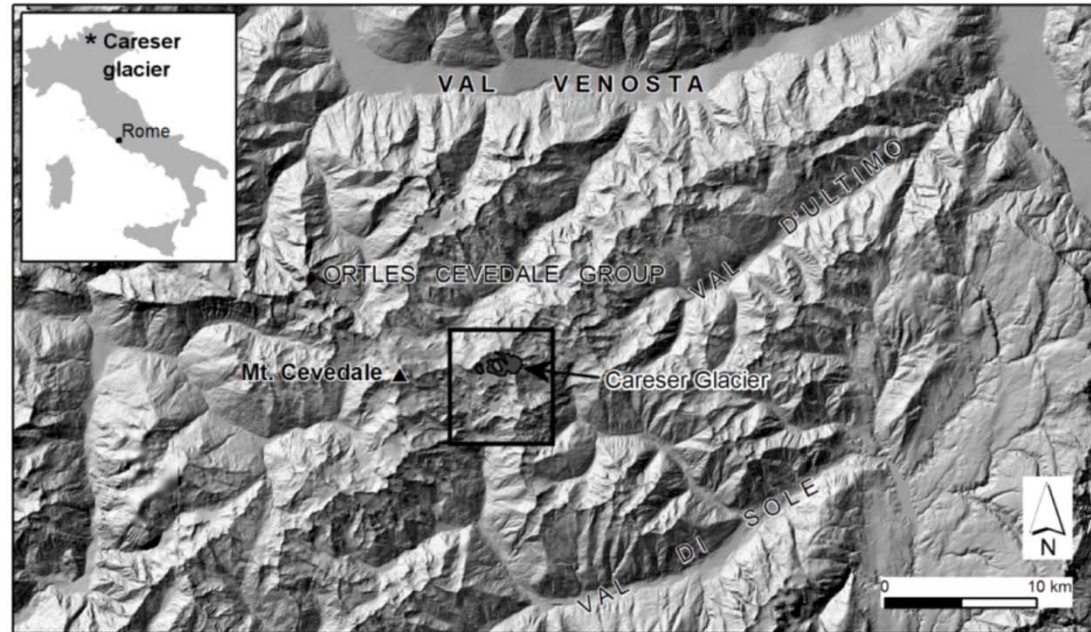
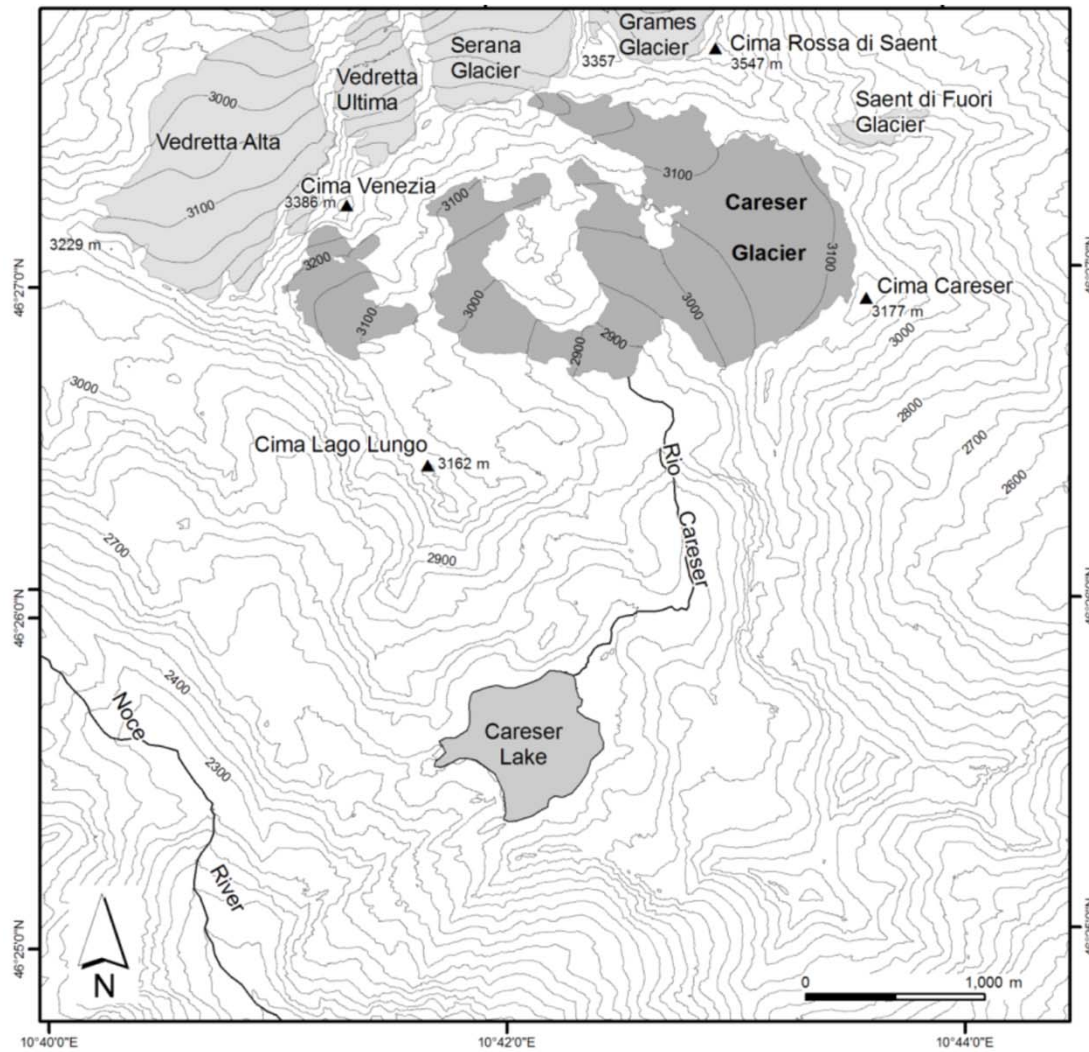
Interpolazione dei valori di spessore del ghiaccio
Mediante procedure di kriging
con vincoli di spessore nullo ai
bordi, ricavati da misure
puntuali GPS lungo il perimetro
del ghiacciaio

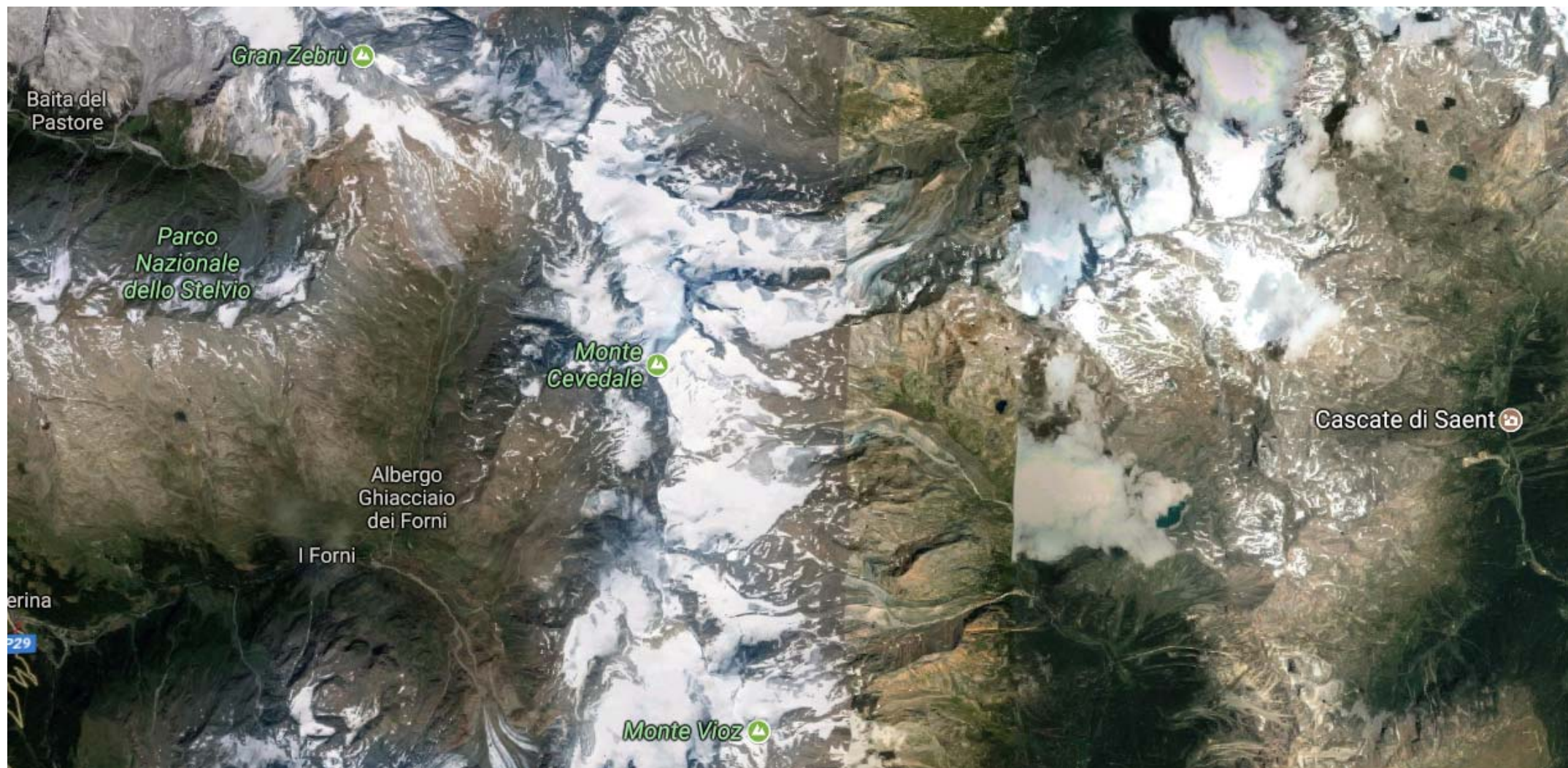


Georadar elitrasportato – Ghiacciaio Grand Etret (2013)

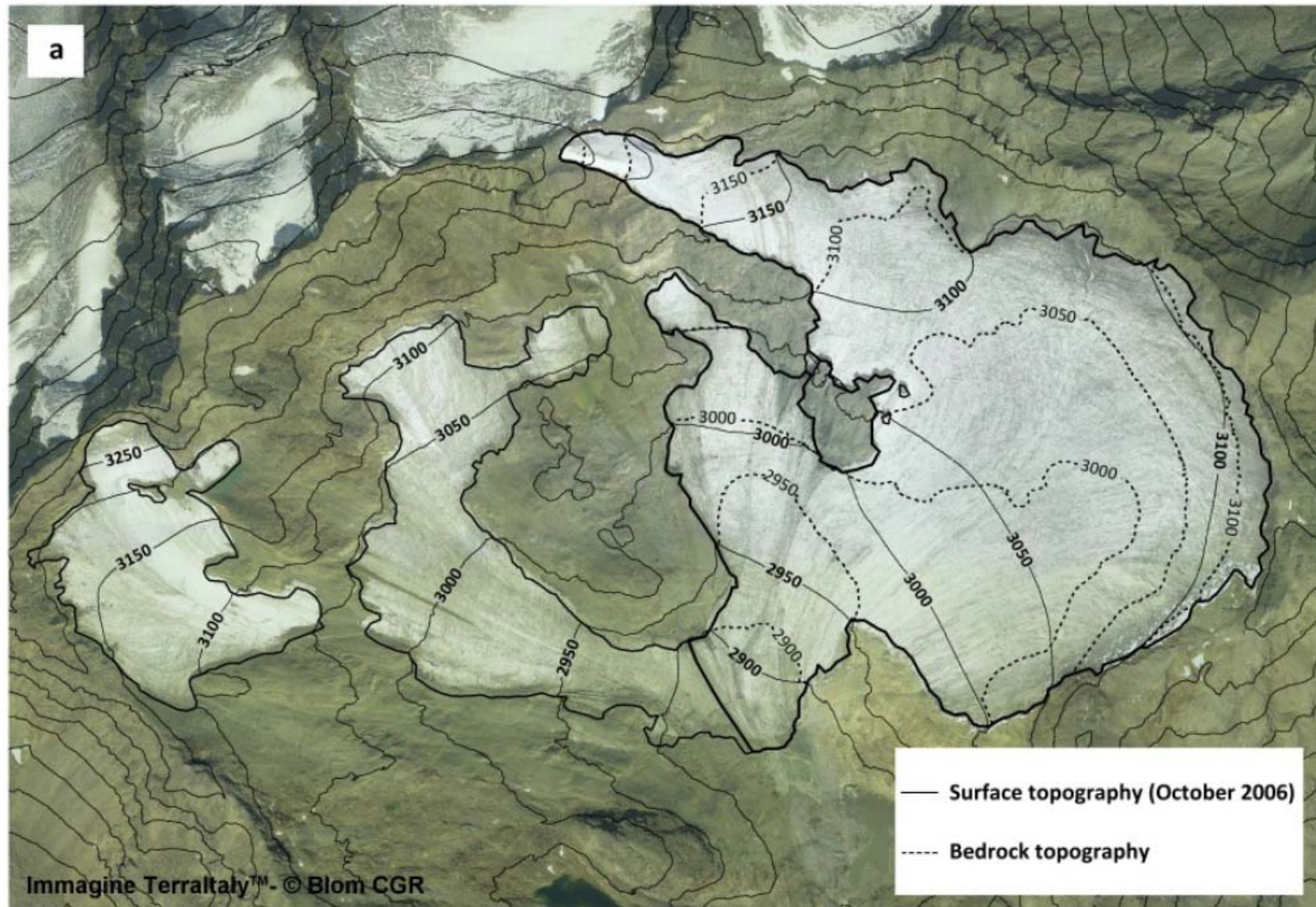


Ghiacciaio Careser – Trentino

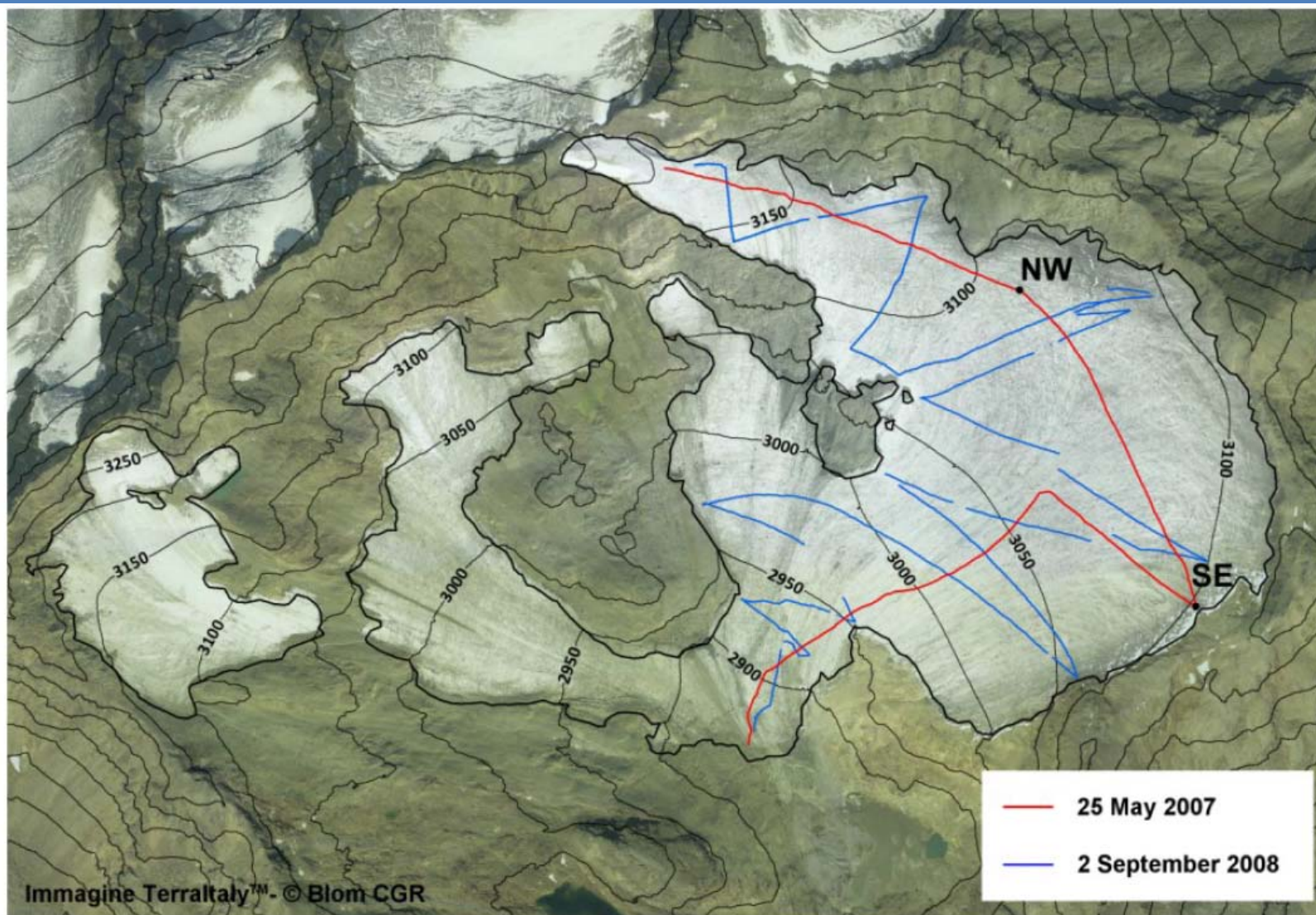




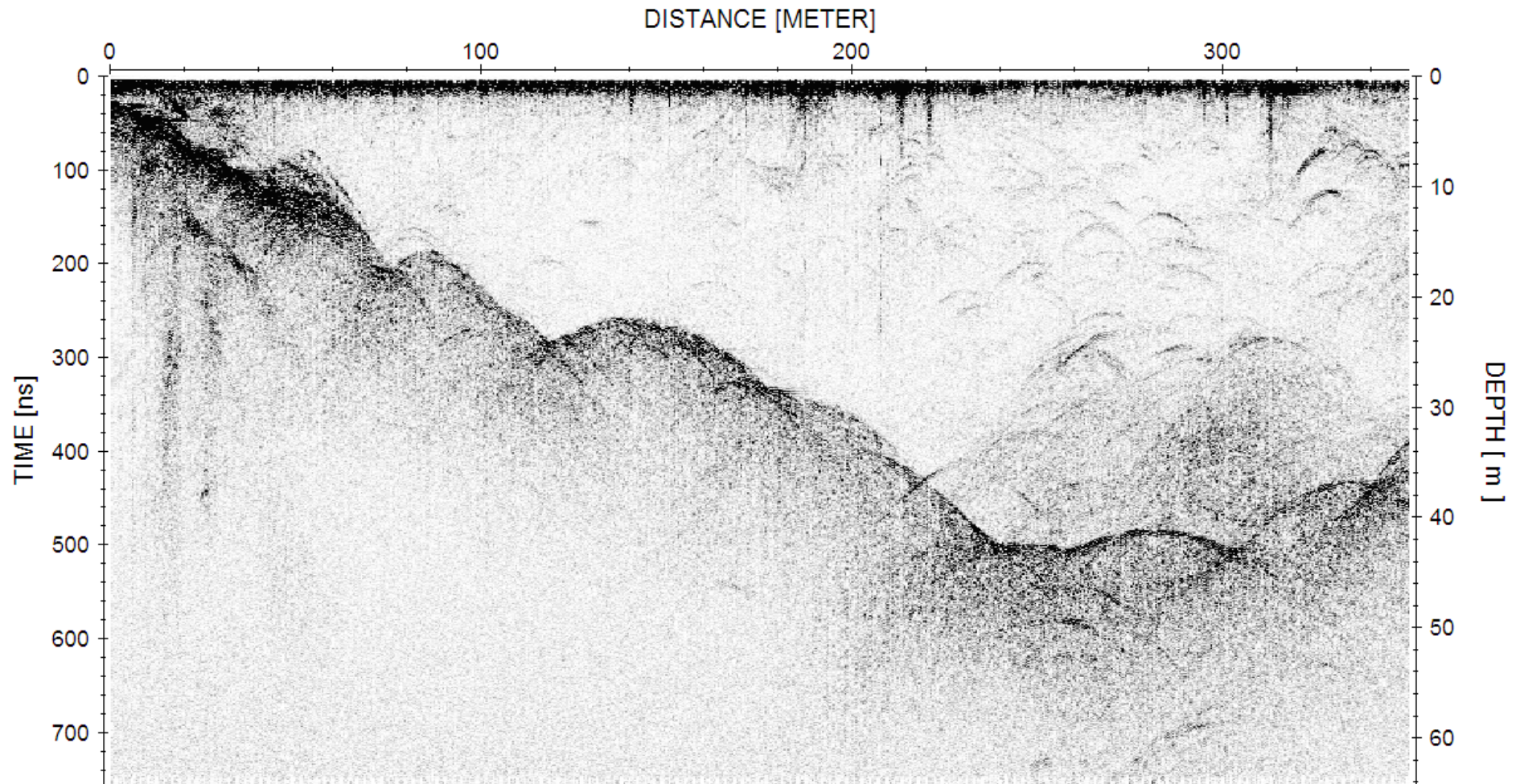
Ghiacciaio Careser – Trentino



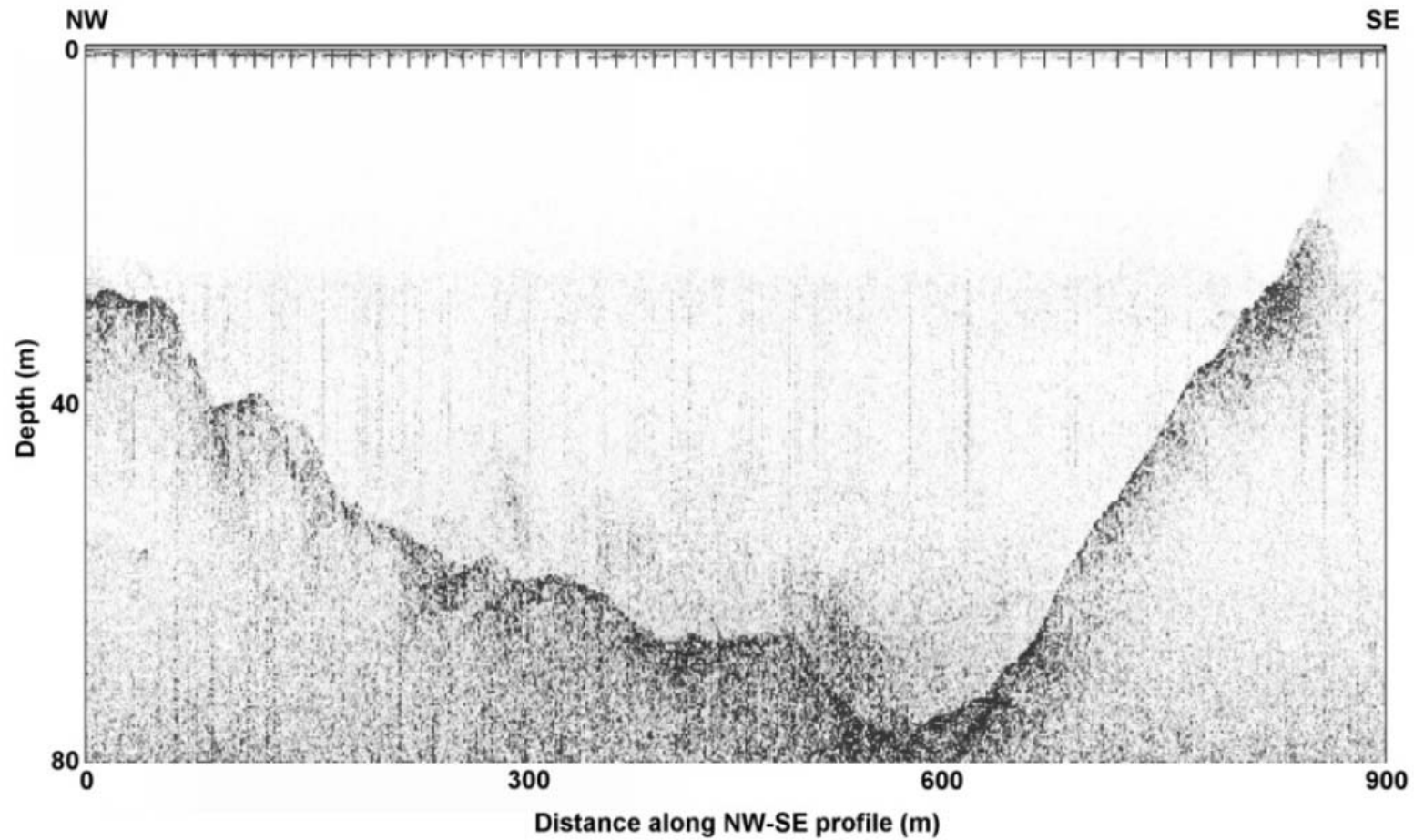
Ghiacciaio Careser – Trentino – Acquisizione dati georadar



Ghiacciaio Careser (Trentino) – Acquisizione GPR – 200 MHz

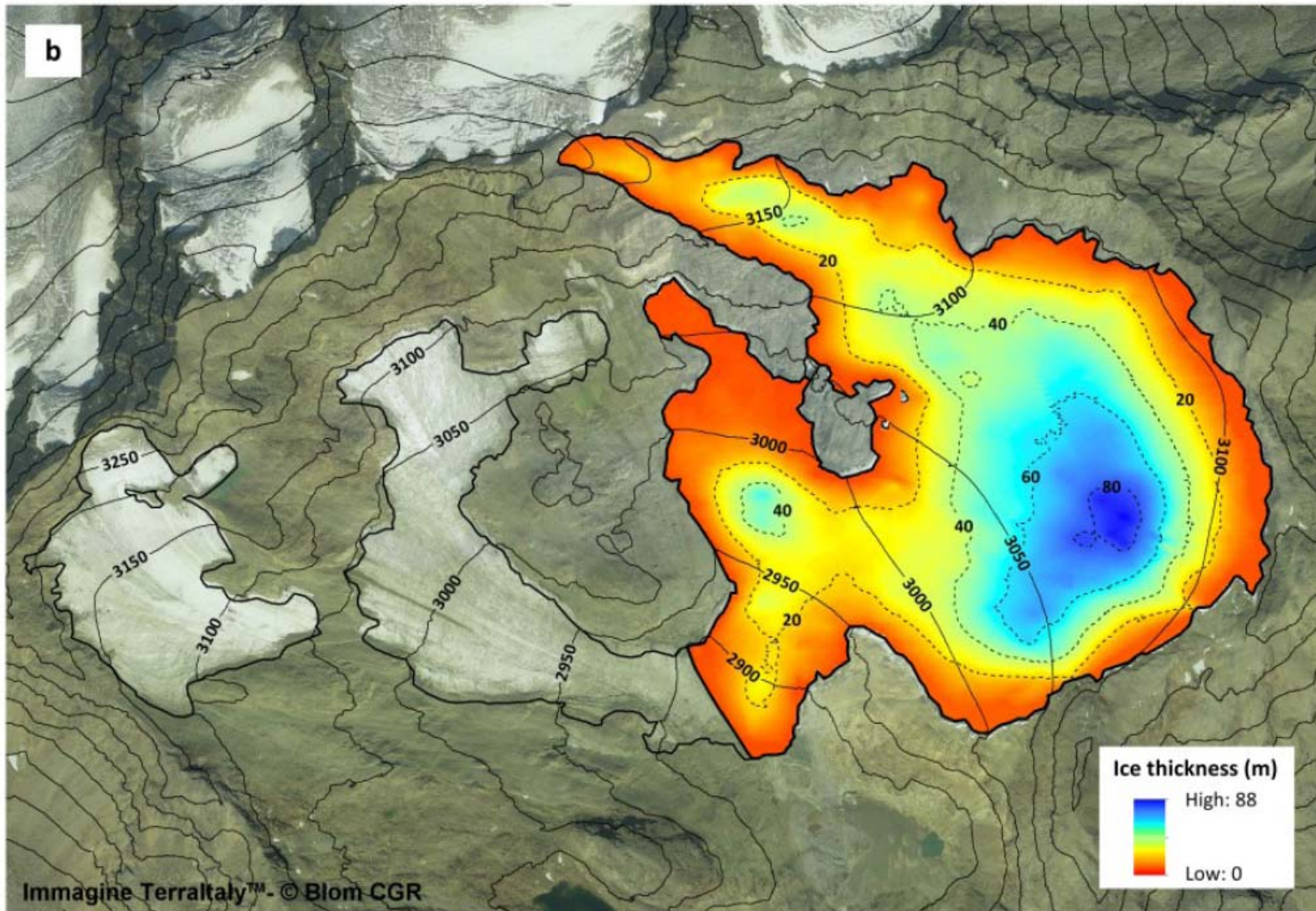


Sezione radar trasversale (migrata) ghiacciaio Careser

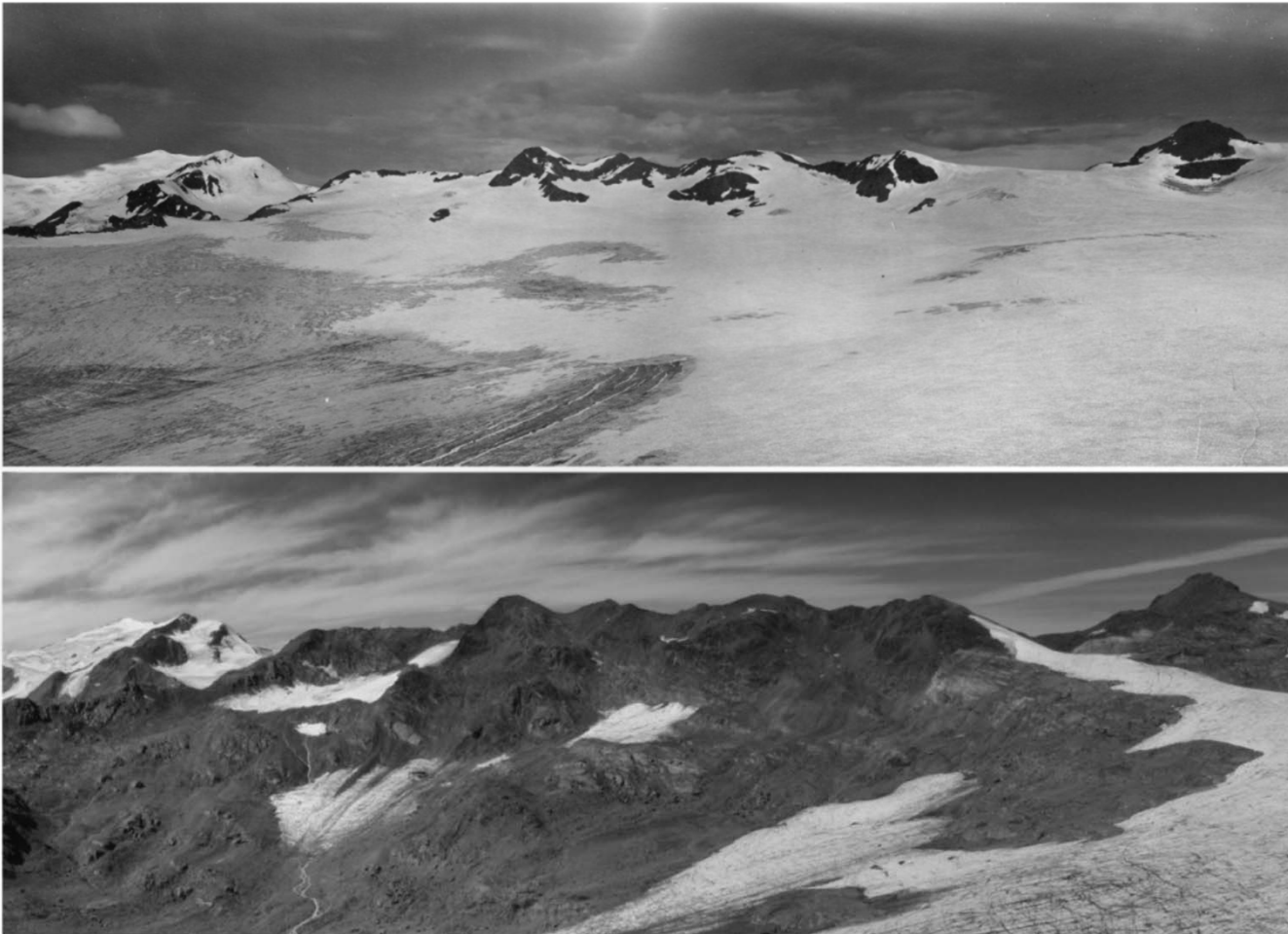


Ghiacciaio Careser – Trentino

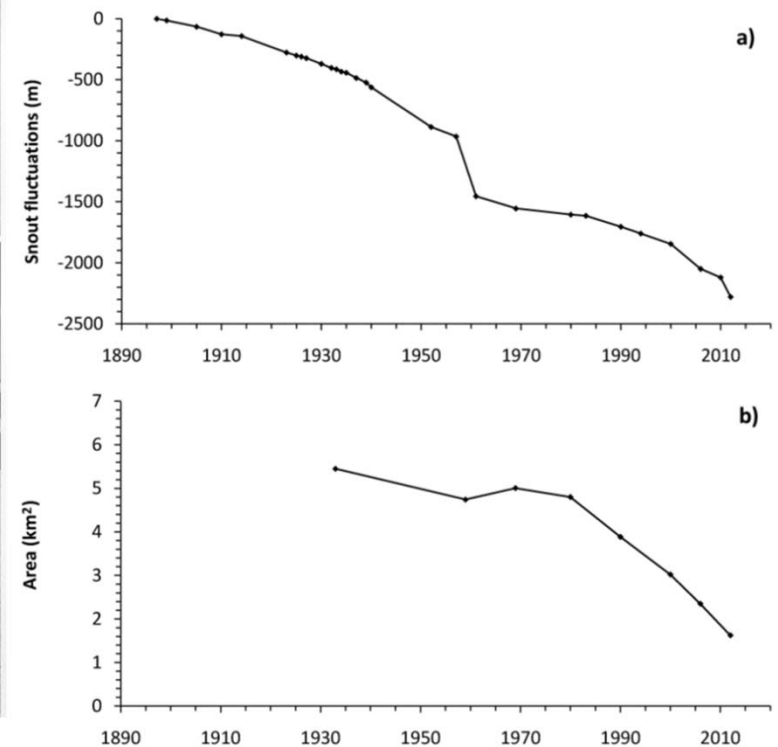
Elaborazione spessore da dati georadar



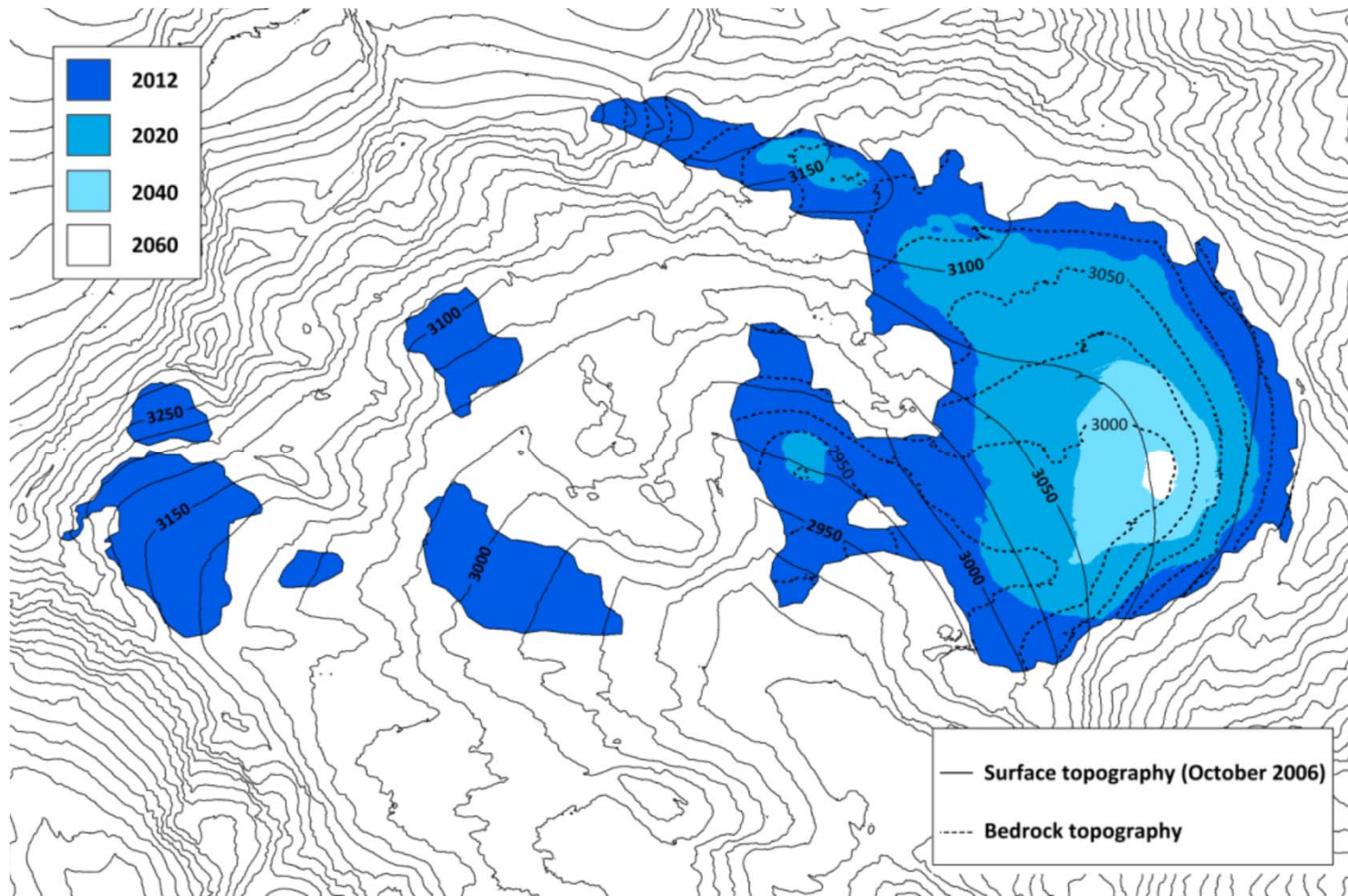
Ghiacciaio Careser – Evoluzione passata



Photographic comparison of the Careser glacier in August 1933 (above, courtesy of Comitato Glaciologico Italiano) and on 28 August 2012 (below, photo L. Carturan).



Ghiacciaio Careser - Modelli evolutivi



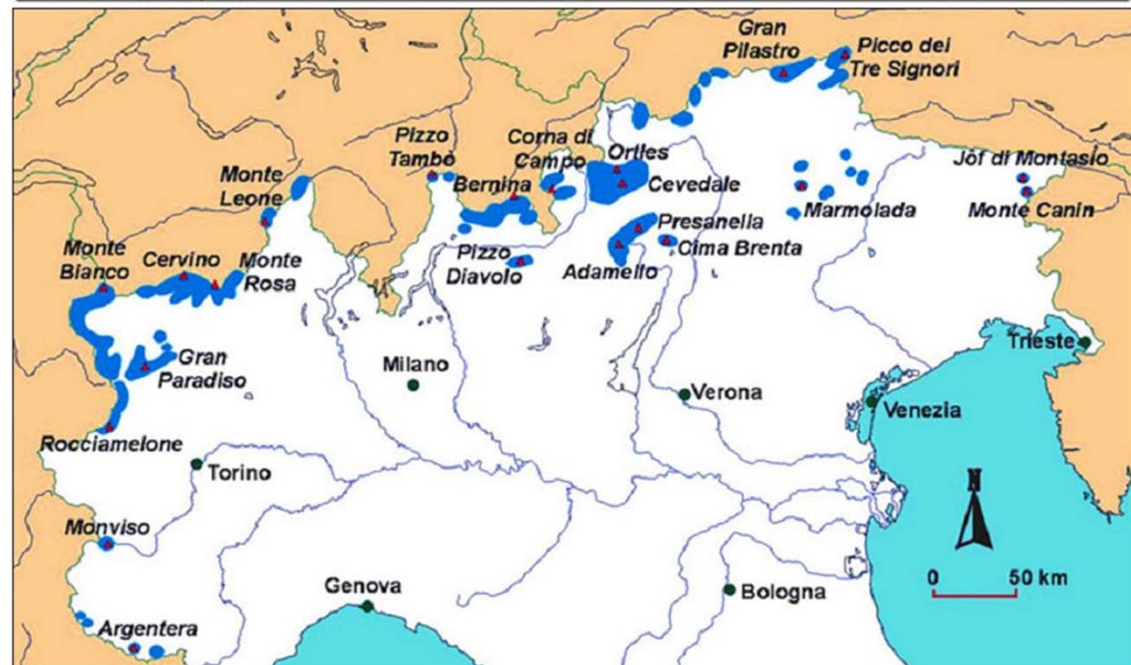
Current (2012) and future extent of the Careser glacier, assuming unchanged annual mass balance distribution compared to the spatial distribution of the mean annual mass balance compared to the period from 2003 to 2012 mean, and negligible glacier motion.

Evoluzione glaciale

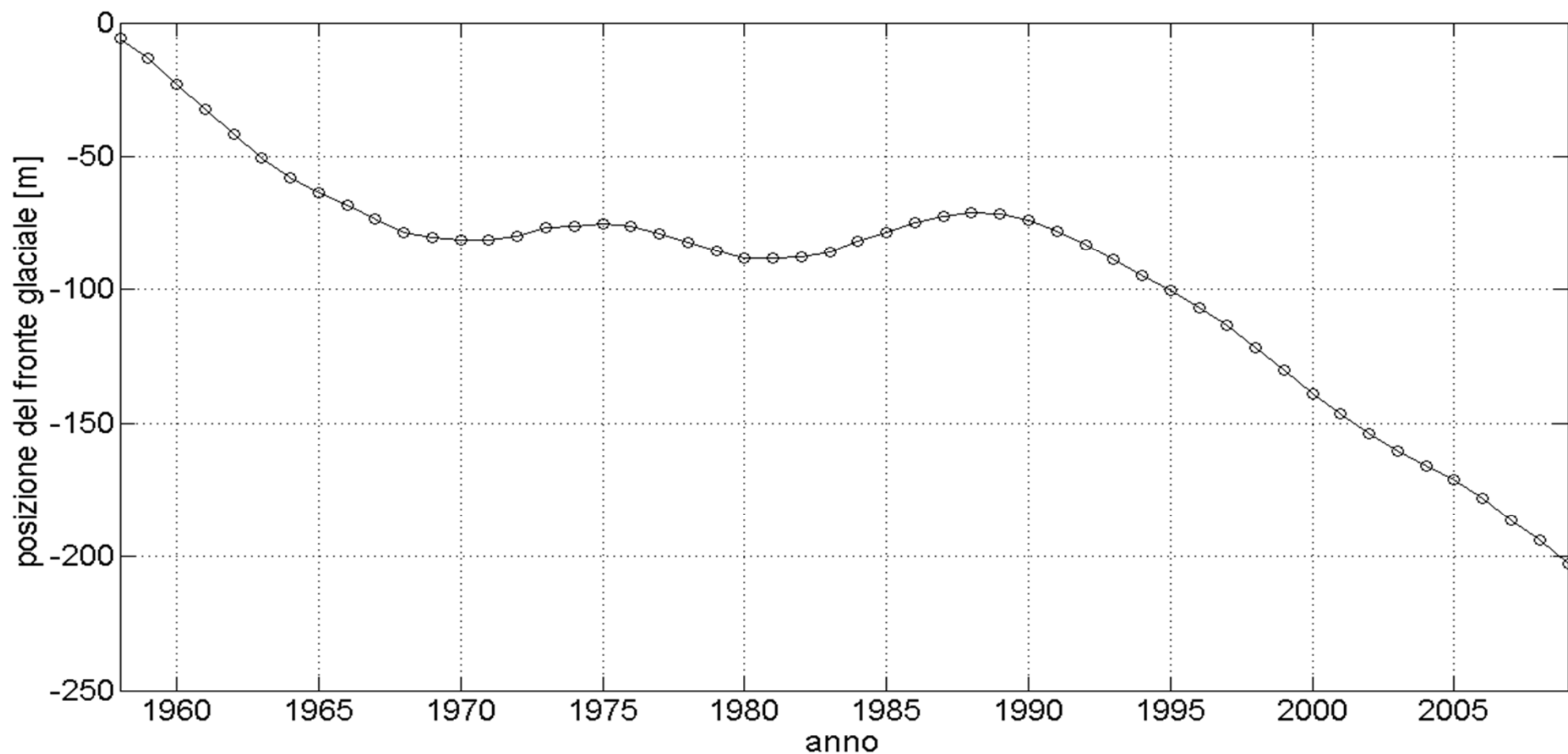
Distribuzione dei ghiacciai alpini durante la fase terminale dell'ultima glaciazione (in alto) e ai nostri giorni (in basso, in azzurro)

Nel momento di massima espansione glaciale, all'incirca tra 20000 e 15000 anni fa, le Alpi e le Prealpi erano interamente ricoperte da una coltre glaciale, di spessore variabile tra qualche centinaio di metri e più di 1 km, che arrivava fino agli sbocchi delle valli in pianura.

Al giorno d'oggi, ci sono soltanto circa 500 km² quadrati residui di questa enorme coltre glaciale, localizzati sui massicci rocciosi più alti della catena alpina.



*Arretramento medio (in m) dei fronti glaciali nel periodo 1958-2009.
L'arretramento medio complessivo risultante è di circa 200 m (Arpa VdA)*





*36° Convegno Nazionale
Trieste 14-16 novembre 2017*

Rischio frane, crolli distacchi

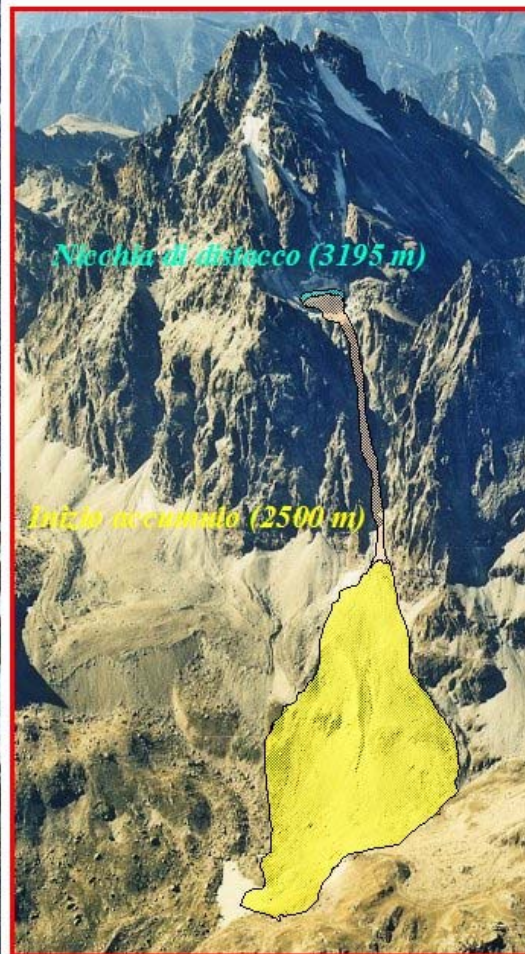
I fenomeni di gelo-disgelo, le variazioni termiche improvvise e soprattutto le variazioni climatiche di medio periodo possono essere causa di una serie di fenomeni:

- Crolli e distacchi di volumi di roccia
- Crolli parziali di volumi di ghiaccio
- Formazione di laghi glaciali (tracimazioni) e endoglaciali
- Inondazioni a seguito di collassi di strutture interne



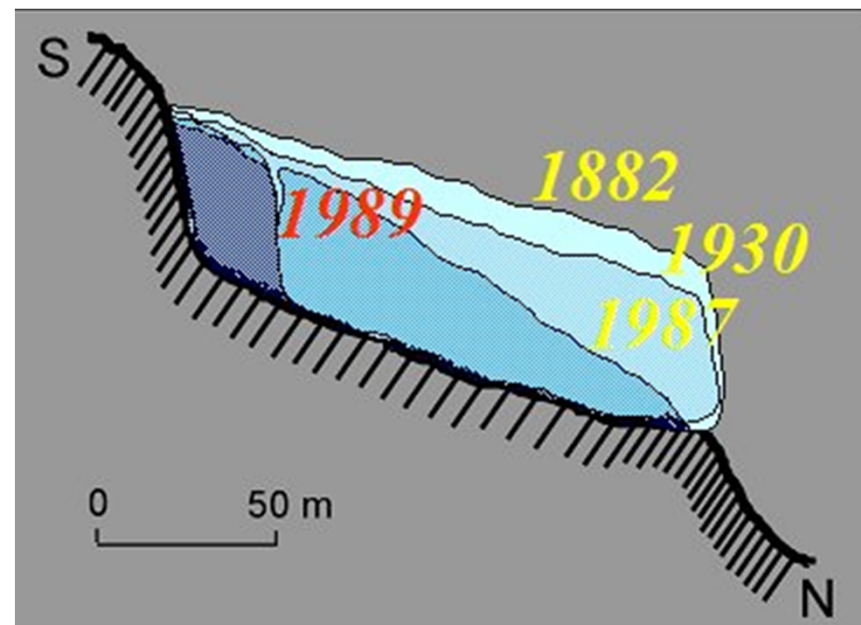
Ghuacciaio Cherillon – Cervino - Cortesia G.Zanetti

Ghiacciaio superiore di Coolidge - Monviso



Porzione di ghiacciaio distaccatasi durante l'evento (1989) già preannunciata dall'evidente crepaccio che delimita l'area del successivo distacco.

La sezione del ghiacciaio superiore (ricostruzione foto storiche) evidenzia lo spessore esiguo della calotta glaciale nella sua parte terminale nel 1989, probabilmente causata dalle intense piogge estive ad alta quota.

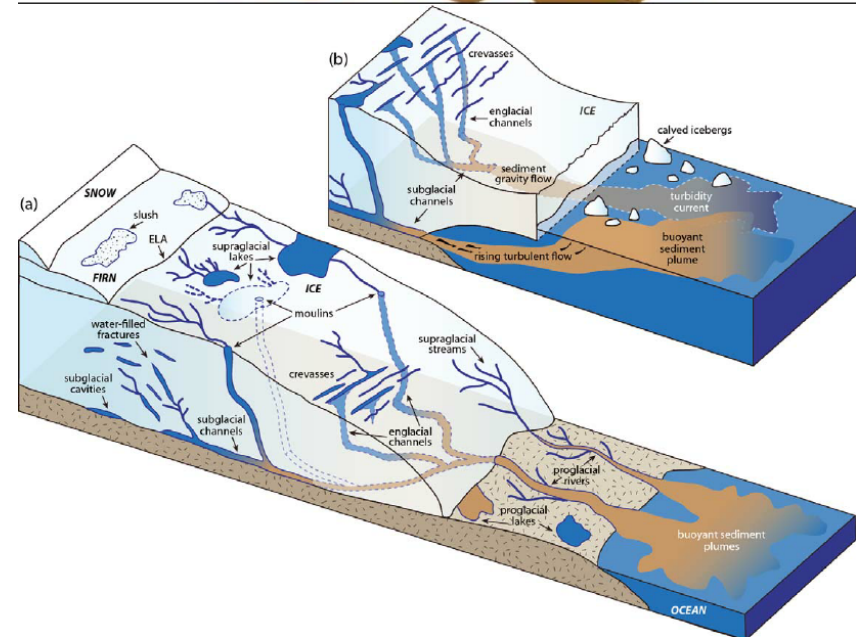
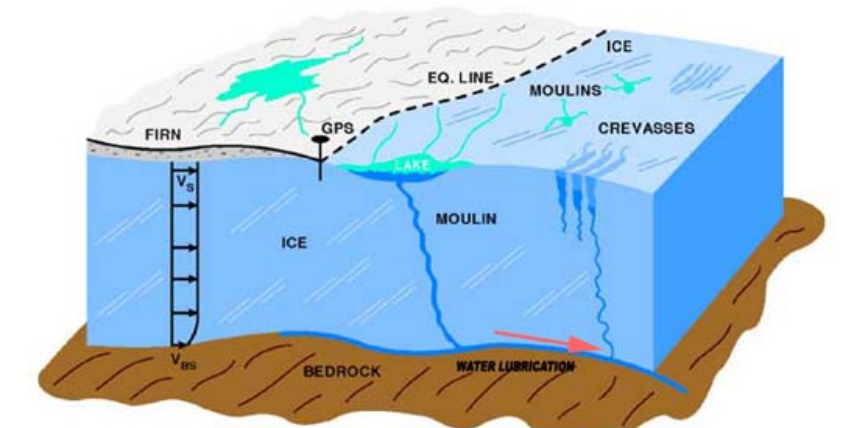
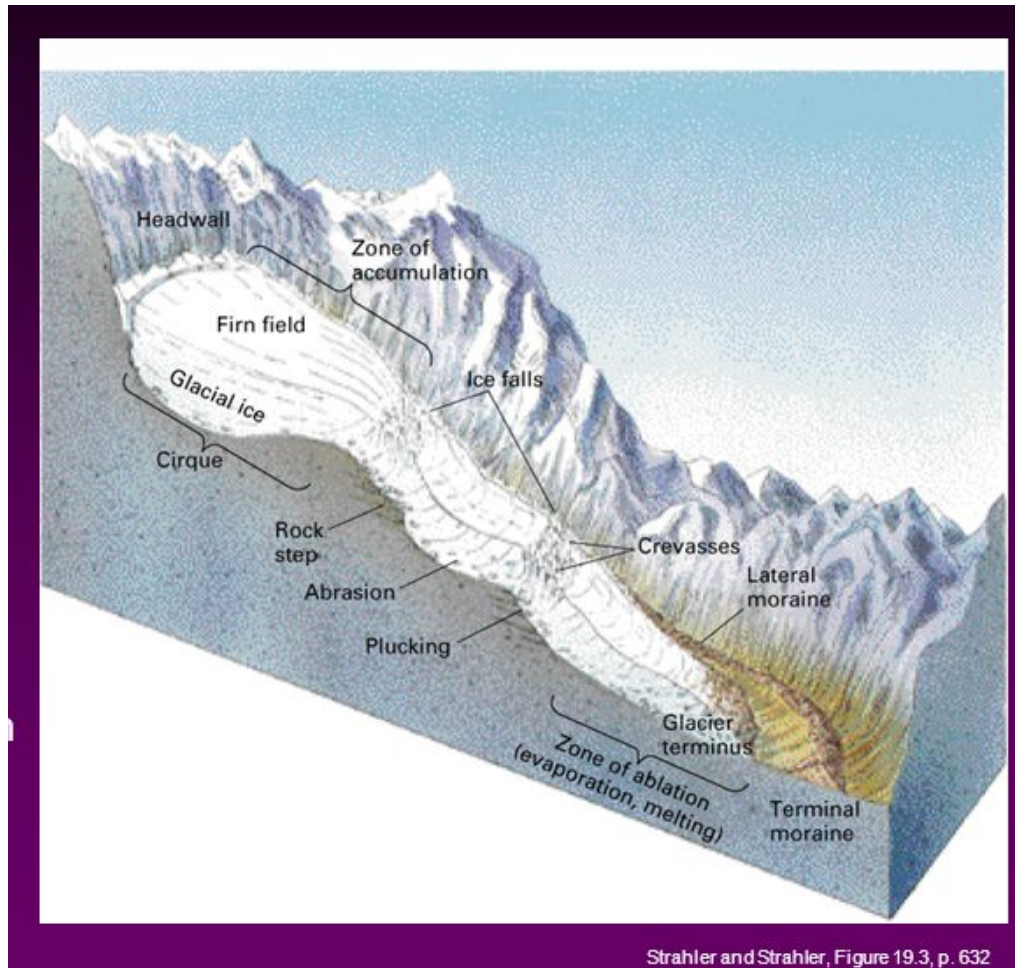


I laghi epiglaciali



Il lago epiglaciale del Rocciamelone, in territorio francese ma appoggiato al confine Italia-Francia, già evidente nel 2000, fotografato nell'agosto 2001; a destra l'instabile argine glaciale che contiene il lago. Il rischio è accresciuto dalla possibilità che qualche iceberg blocchi il normale canale di deflusso del lago (verso l'Italia), causandone un incremento del livello. Il volume del lago crebbe fino al 2004, anno in cui il rischio di rottura della diga fece iniziare i lavori di svuotamento.

Strutture glaciali e endoglaciali



Schema proprietà meccaniche neve/ghiaccio

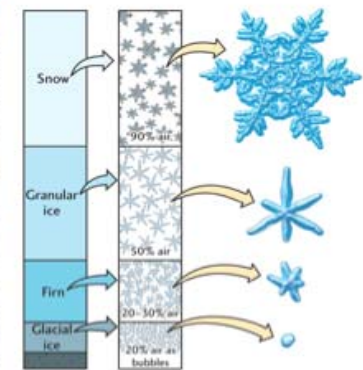
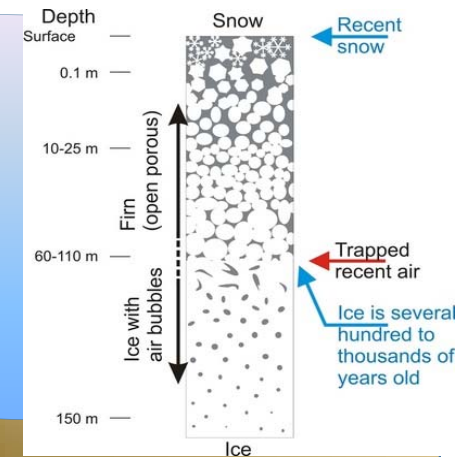
Mechanical properties snow/firn/ice

Density	100 – 900 kg/m ³
Compressive strength	5 – 25 MPa
Tensile strength	0.7 – 3.1 MPa
Failure toughness	
Shear modulus	3 - 5 GPa
Young modulus	5 – 10 GPa
P-wave vel.	2400 -3600 m/s
S-wave vel.	1200 -1800 m/s

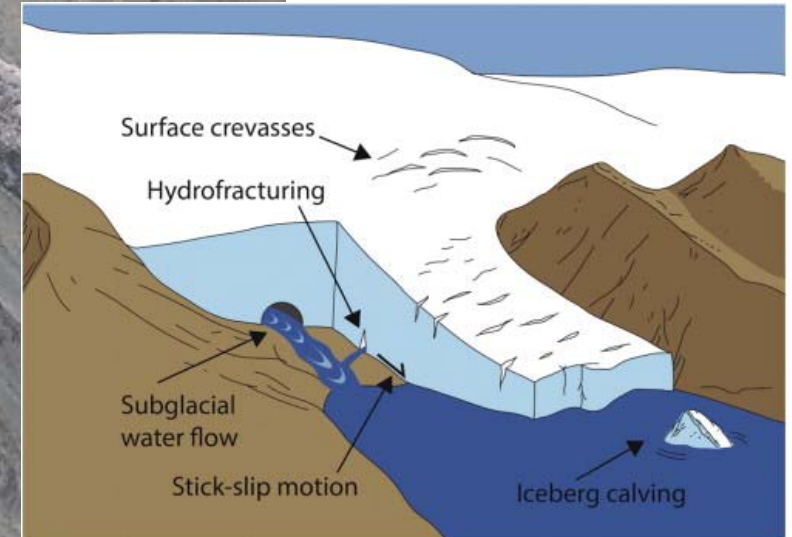
Moulin

Cavity

Bedrock



Mont Gelè (VdA)



Effetti di deglaciazione



Ghiacciaio Mont Gelè – VdA fenomeni di escavazione endoglaciale, crolli e formazioni di laghi epiglaciali (foto Fondazione Montagna Sicura)

Effetti di deglaciazione

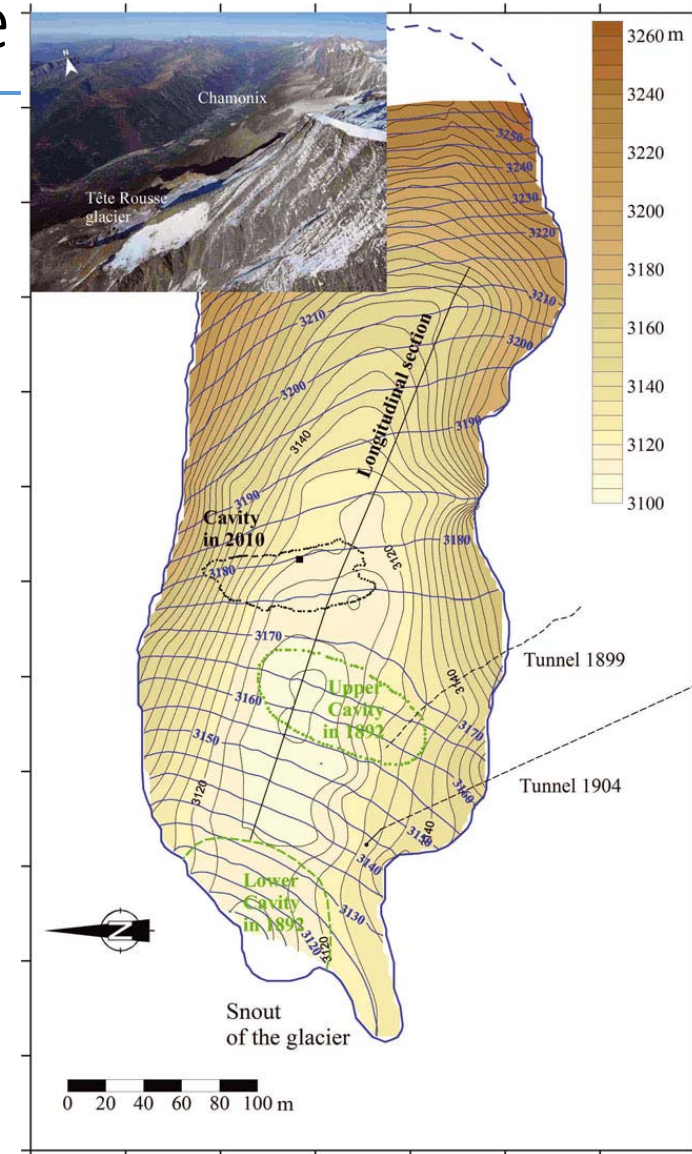


Ghiacciaio Mont Gelè – VdA - 2008

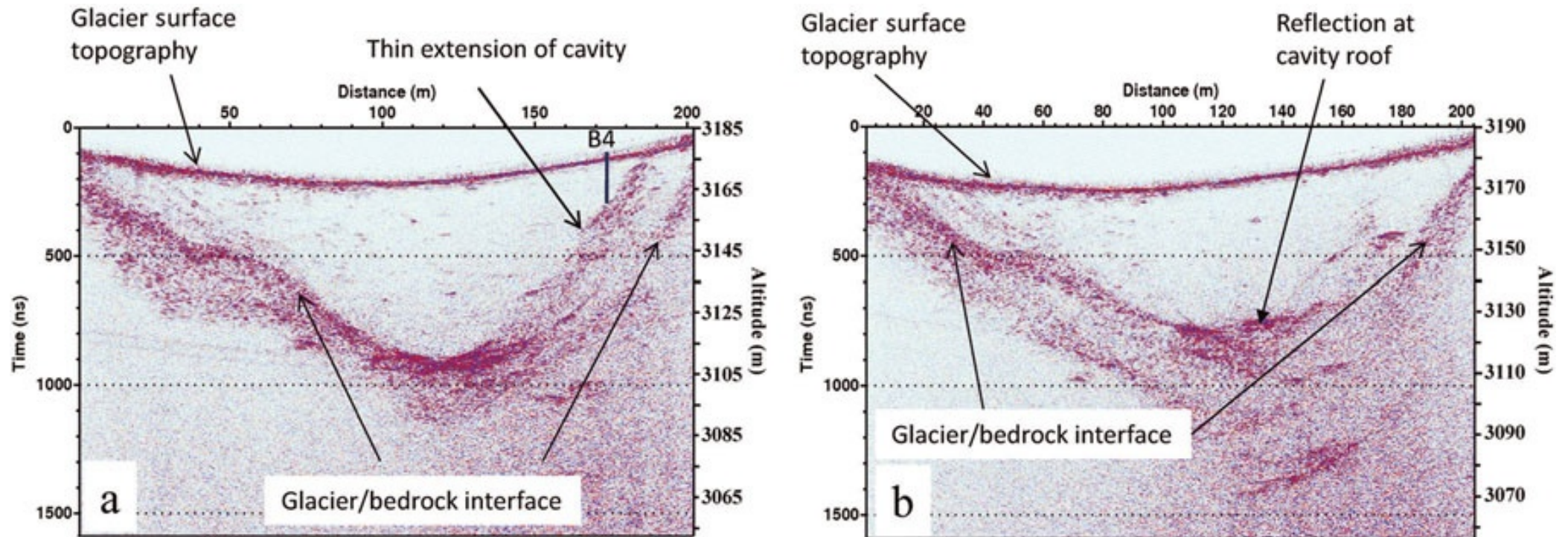
Cavit  endoglaciali – Ghiacciaio Tete Rousse



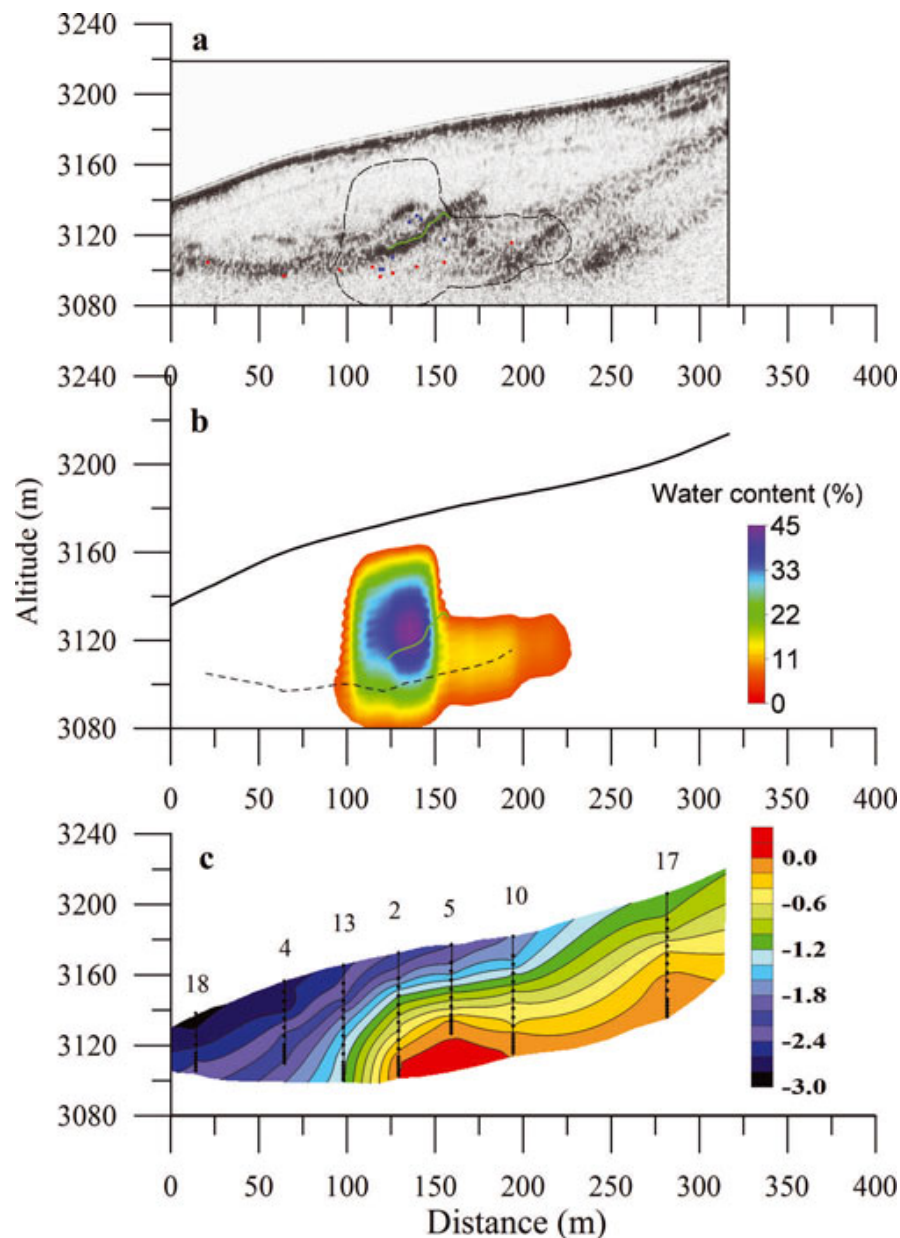
- Nel **1892**, collasso di cavit  endoglaciale, circa 100.000 m³ di acqua si riversarono a valle
- Nel **2010**, individuazione di una nuova cavit  di circa 50.000 m³



Ghiacciaio Tete Rousse - GPR



South–north GPR data displayed in the two-way travel time domain using a 100 MHz antenna on cross sections (a) 10 and (b) 9 after migration and static corrections (the north direction is to the right) (after Vincent et al., 2012).



Longitudinal section of the glacier:

(a) Depth radar image derived after applying static correction and migration processes to the data (wave propagation velocity in ice of 16.8 cm ns^{-1}).

The **red dots** correspond to the bottoms of the boreholes (note the out-of-plane offset of the boreholes from the profile line).

The **blue dots** correspond to the cavity roof obtained from boreholes.

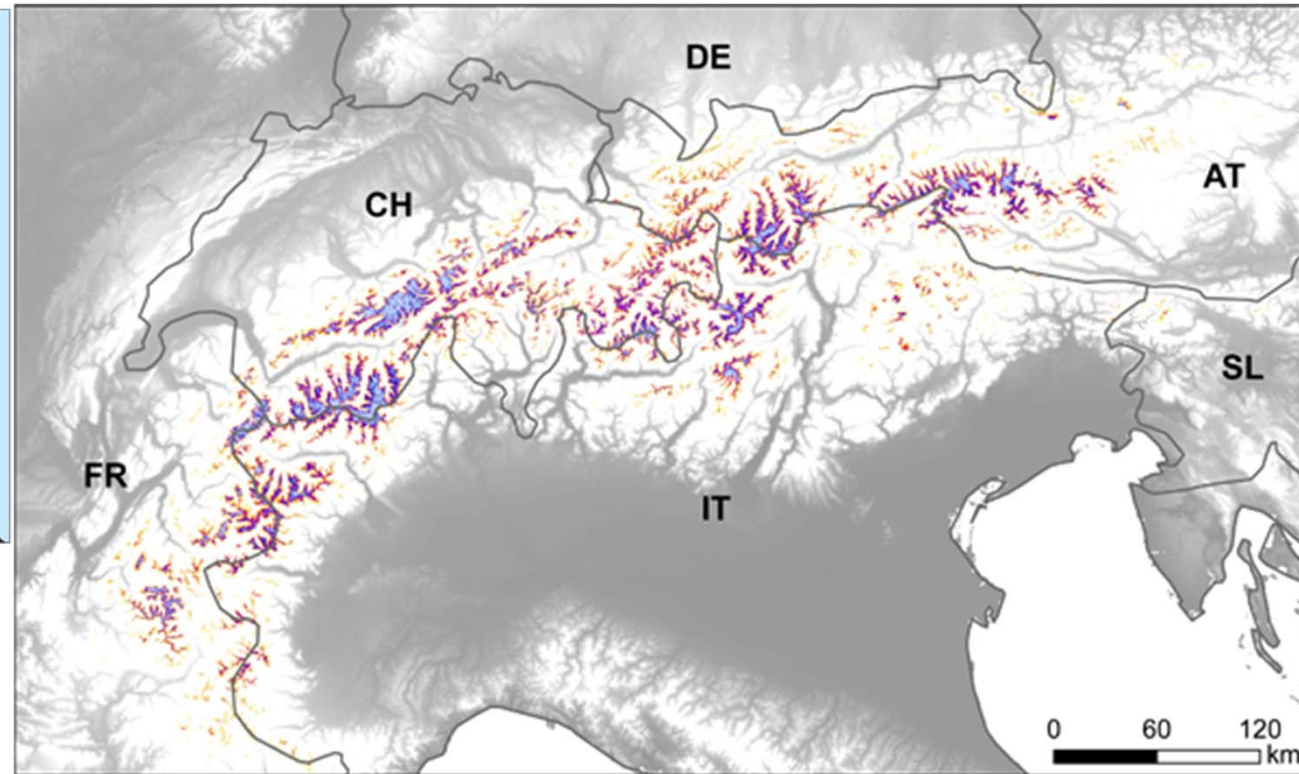
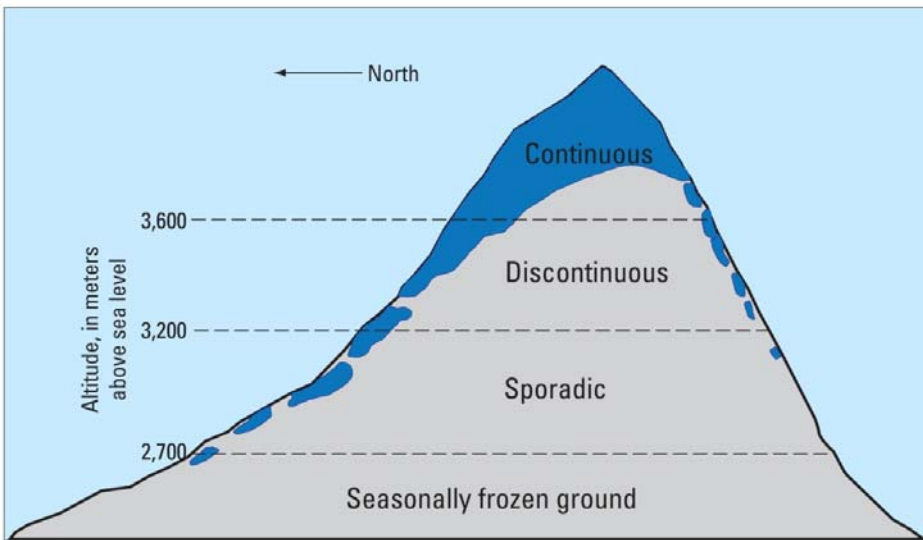
The **green line** shows the roof of the cavity obtained from sonar measurements.

The **black dashed line** corresponds to the outline of the water distribution drawn in (b).

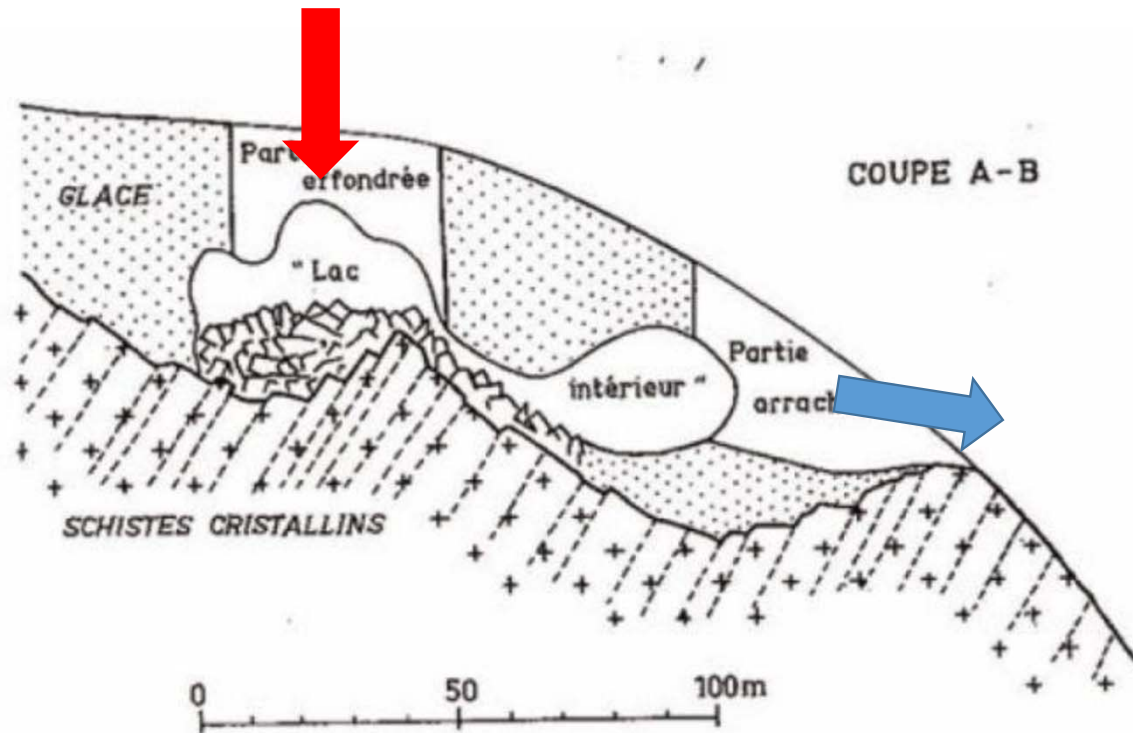
(b) Distribution of the modelled water content within the glacier along the longitudinal section and derived from **3-D-SNMR inversion**. The dashed line corresponds to bedrock.

(c) Ice temperature. Data have been interpolated from measurements (black dots) performed in boreholes.

Permafrost nelle regioni alpine



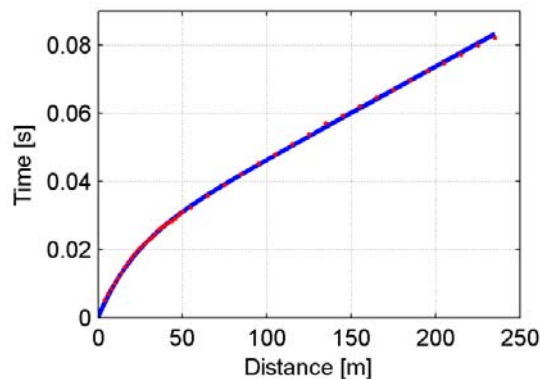
Modello di collasso – Tete Rouse (1892)



- Dinamica della rotta glaciale di Tête Rouse del 1892 (modificato da Vincent et Al. 2010).
- In rosso evidenziato il crollo del tetto della cavità ed in blu la direzione del flusso della rotta glaciale.

Caratterizzazione proprietà meccaniche (Pre de Bar)

Misure onde P e onde superficiali permettono di ricavare modulo di compressione, taglio e coefficiente di Poisson

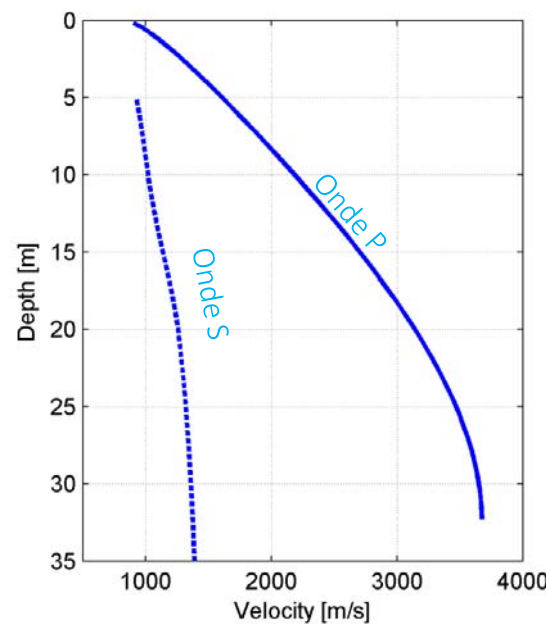


Tempi percorso onde P (rosso)

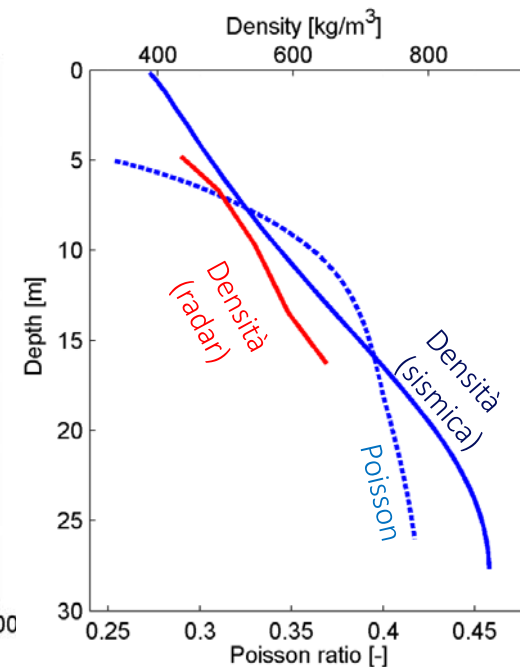
(blu) fitting equazione tempi-distanze

$$t = a_1(1 - \exp(-a_2x)) + a_3(1 - \exp(-a_4x)) + a_5x$$

x – distanza scoppio - ricevitore

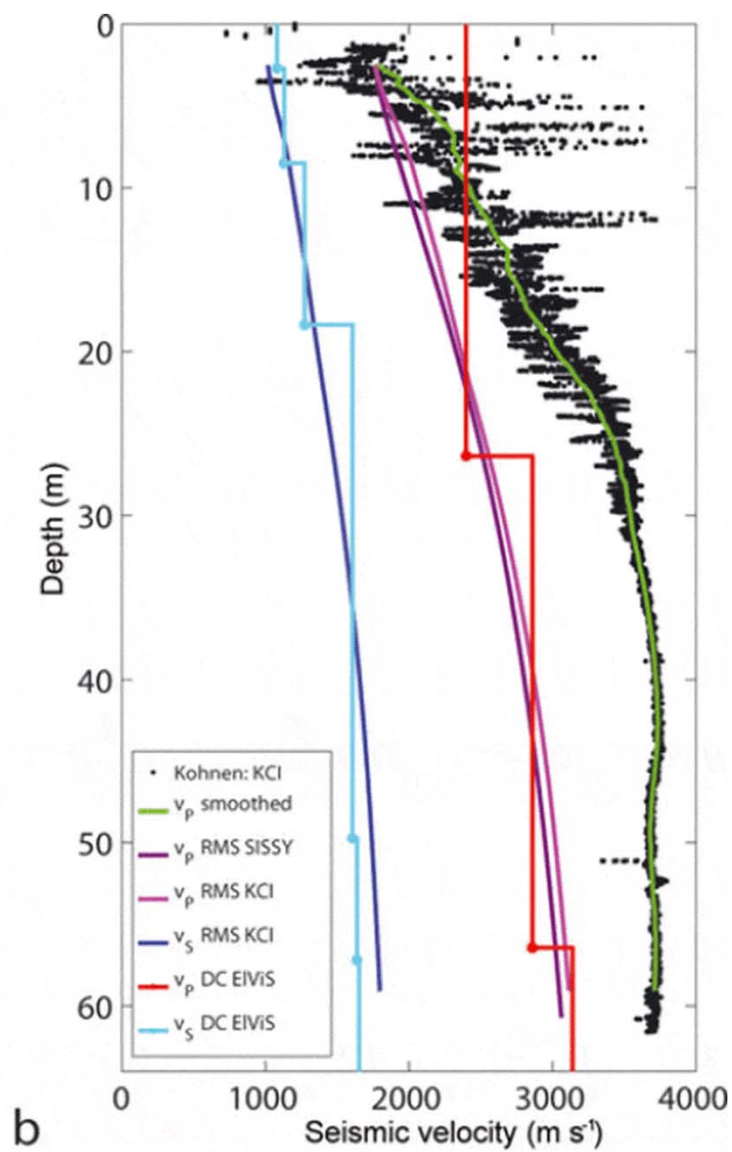
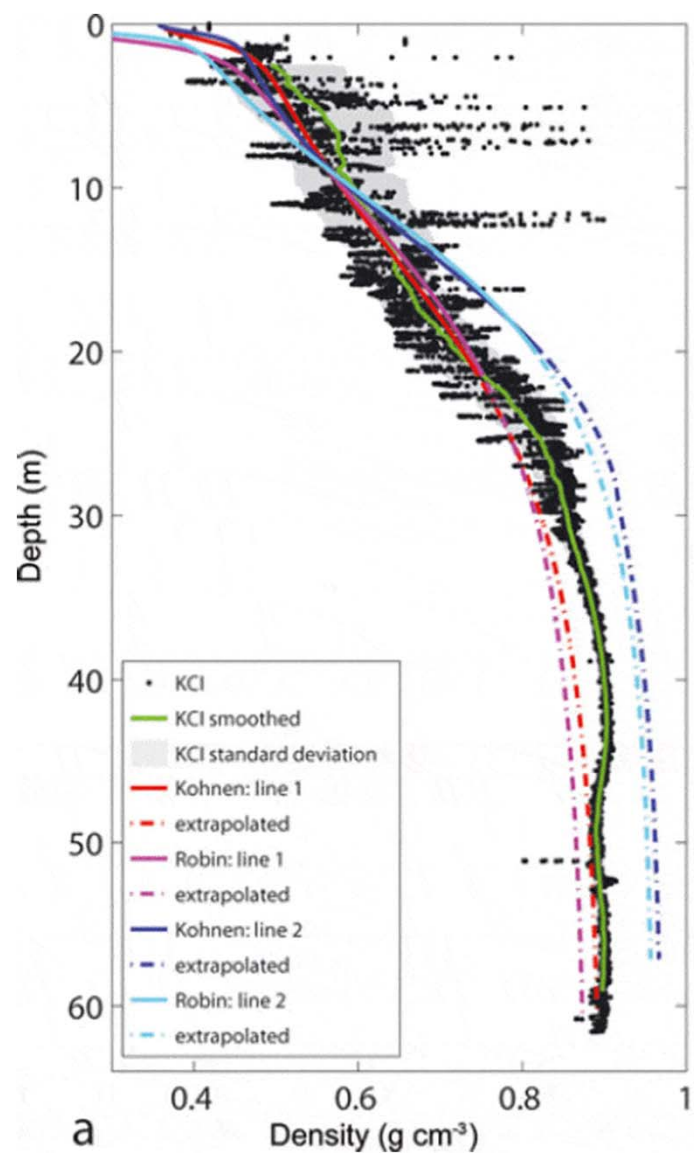


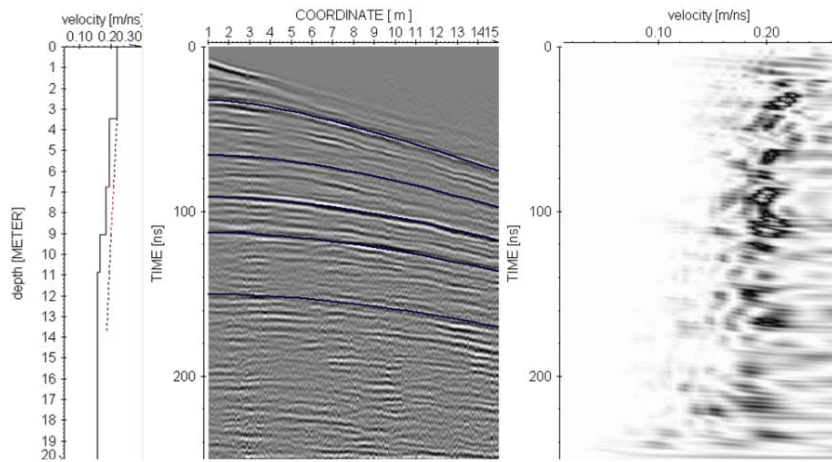
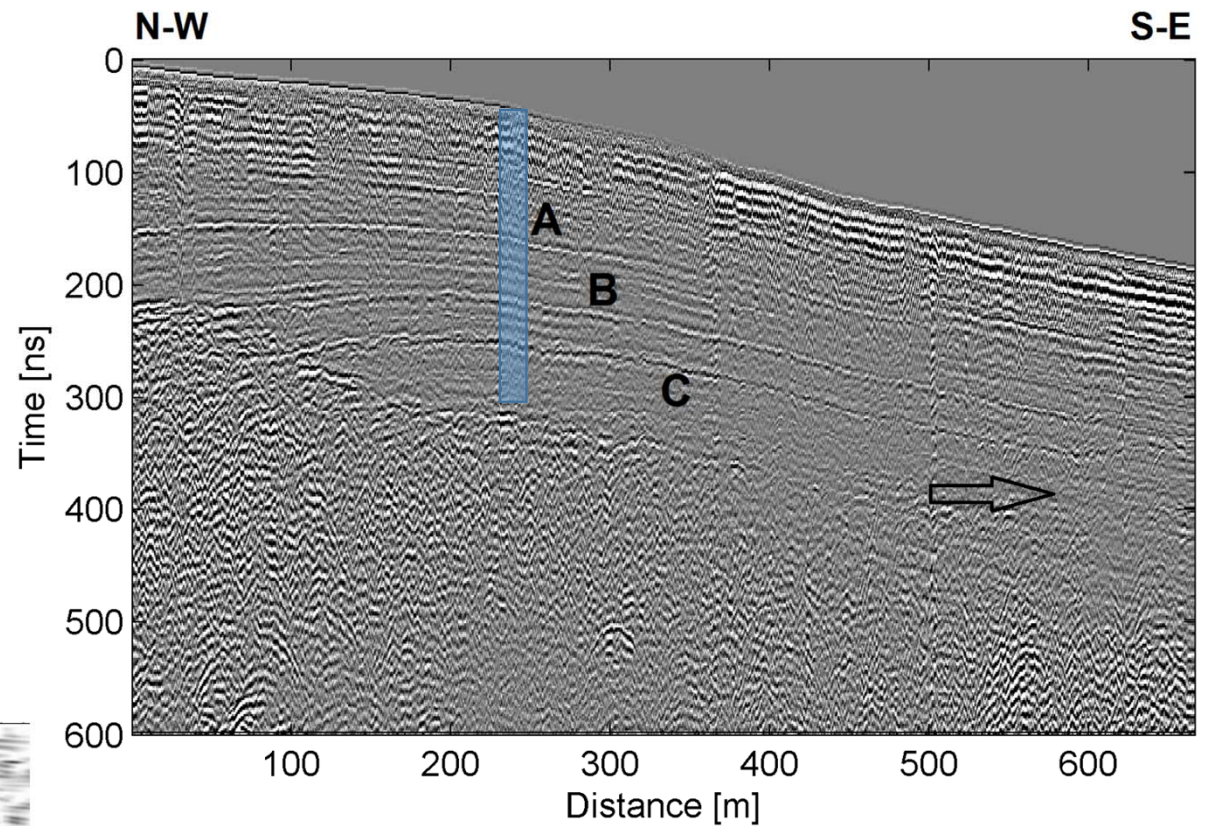
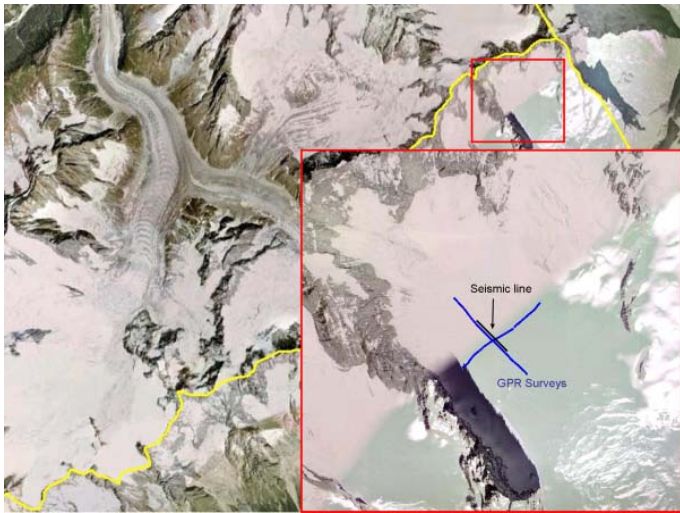
Onde S stimate da elaborazione
risposta onde superficiali



$$\rho(z) = 0.915 \left(1 + \left(\frac{V_{p_{ice}} - V_p(z)}{2.25} \right)^{1.22} \right)^{-1}$$

$$\sigma = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

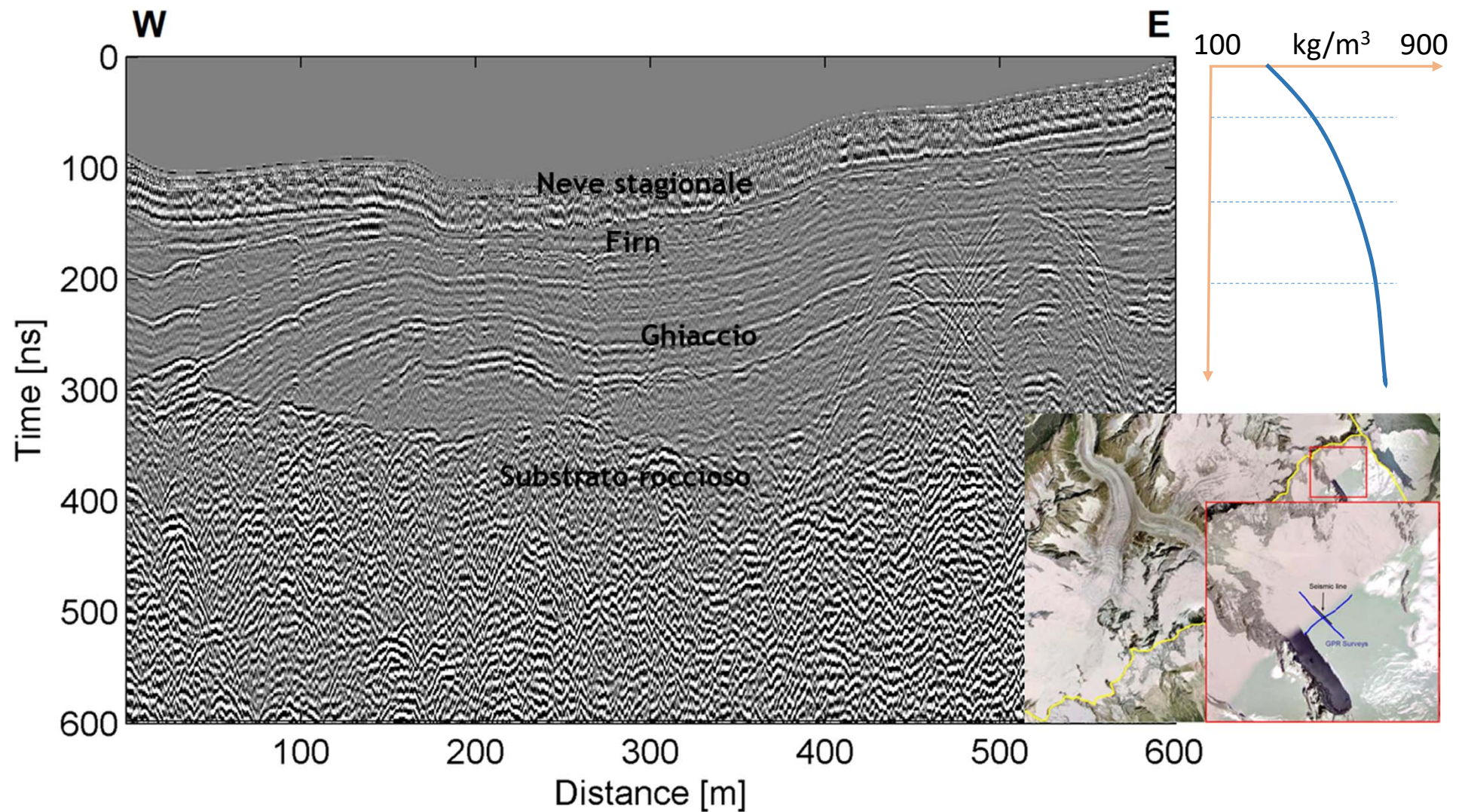




Acquisition: 200 MHz
Single fold and WARR

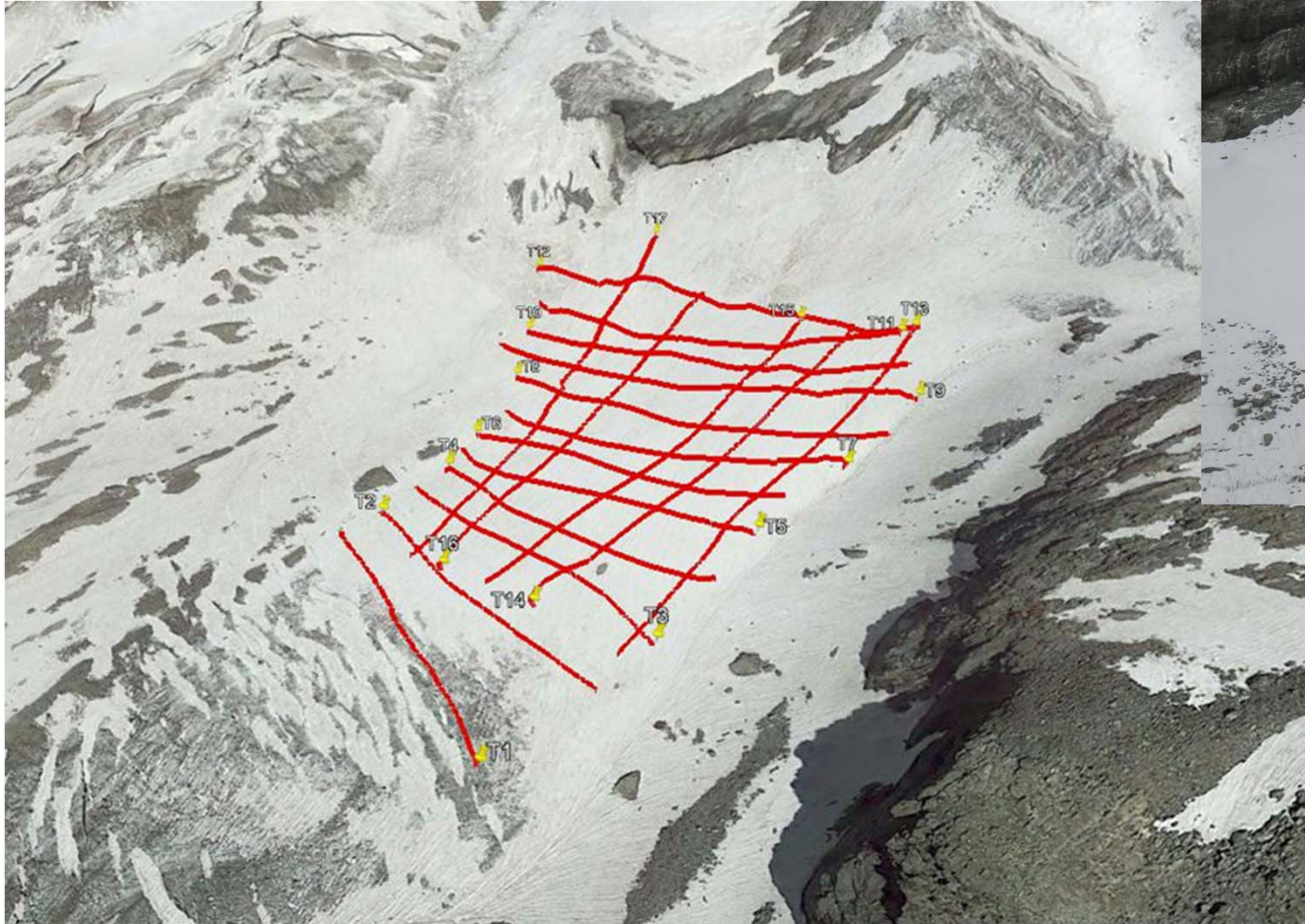
Processing: Semblance analysis of WARR data to retrieve
vertical velocity profile
A – snow/firn; B – granular ice; C - ice

Pre de Bar – Profilo densità





Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia



Acquisizione GPR – 200 MHz
- Ottobre 2017

Caratterizzazione spessore e
eventuale identificazione di
strutture endoglaciali

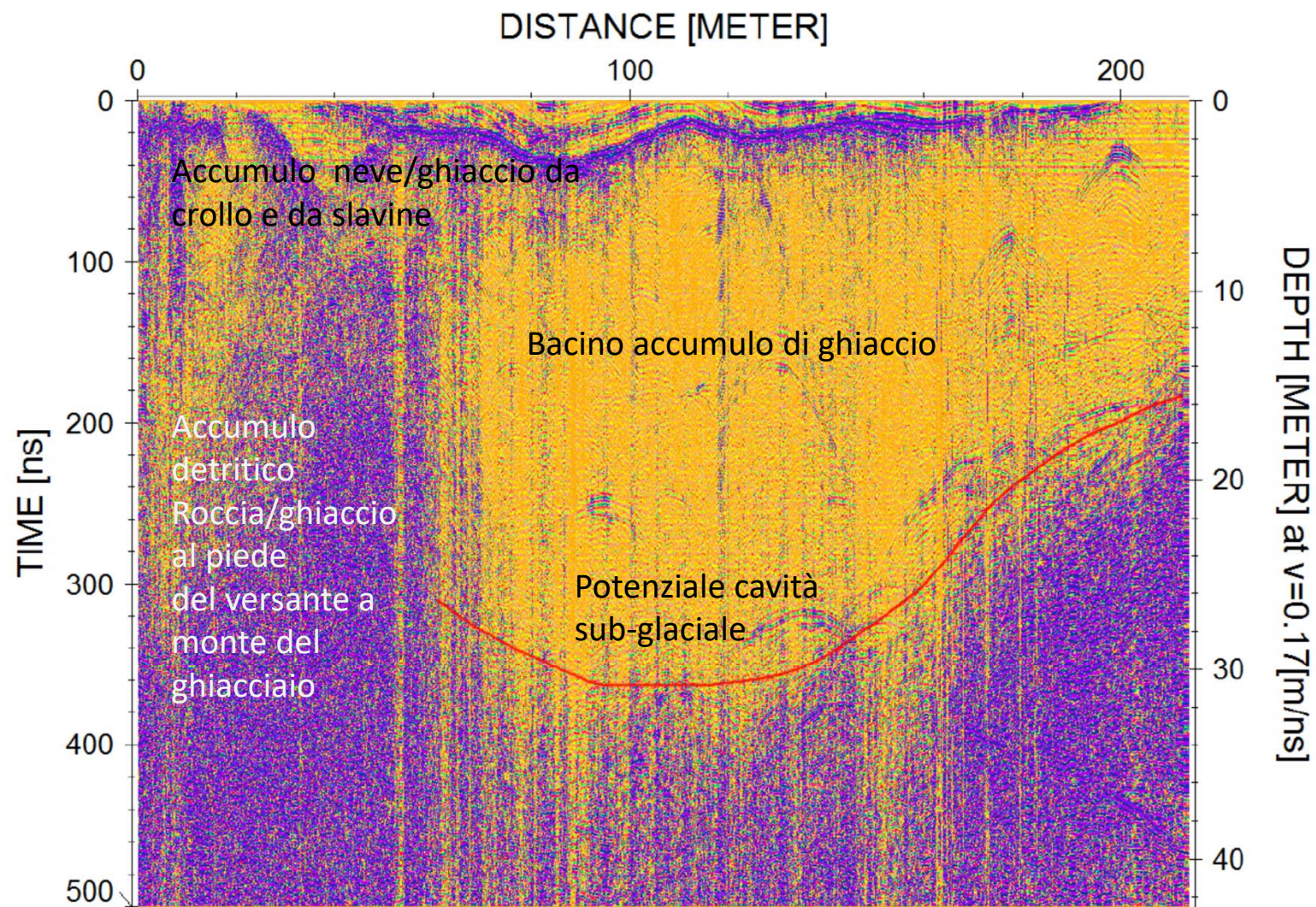


Figura A9: traccia radar 9

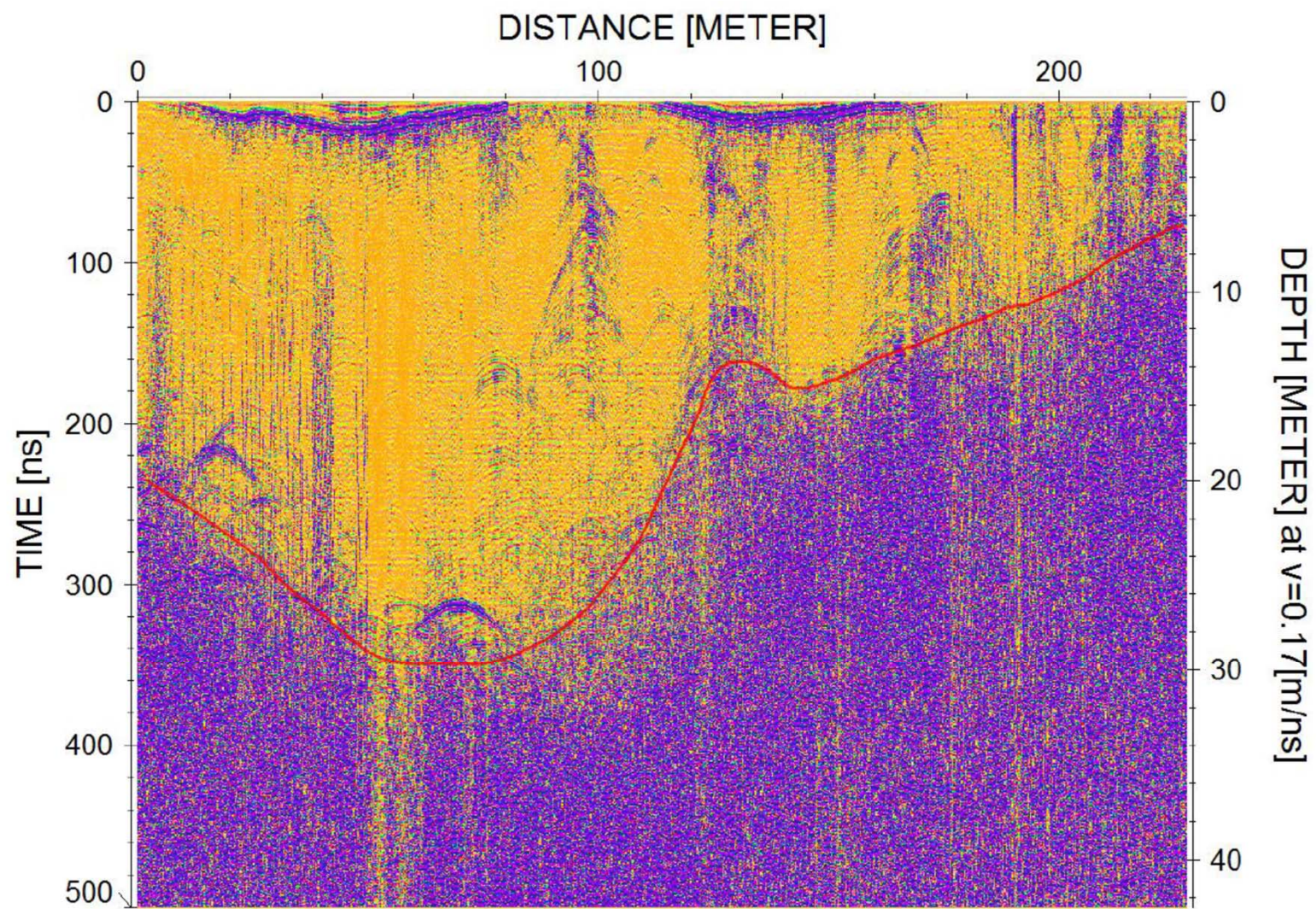
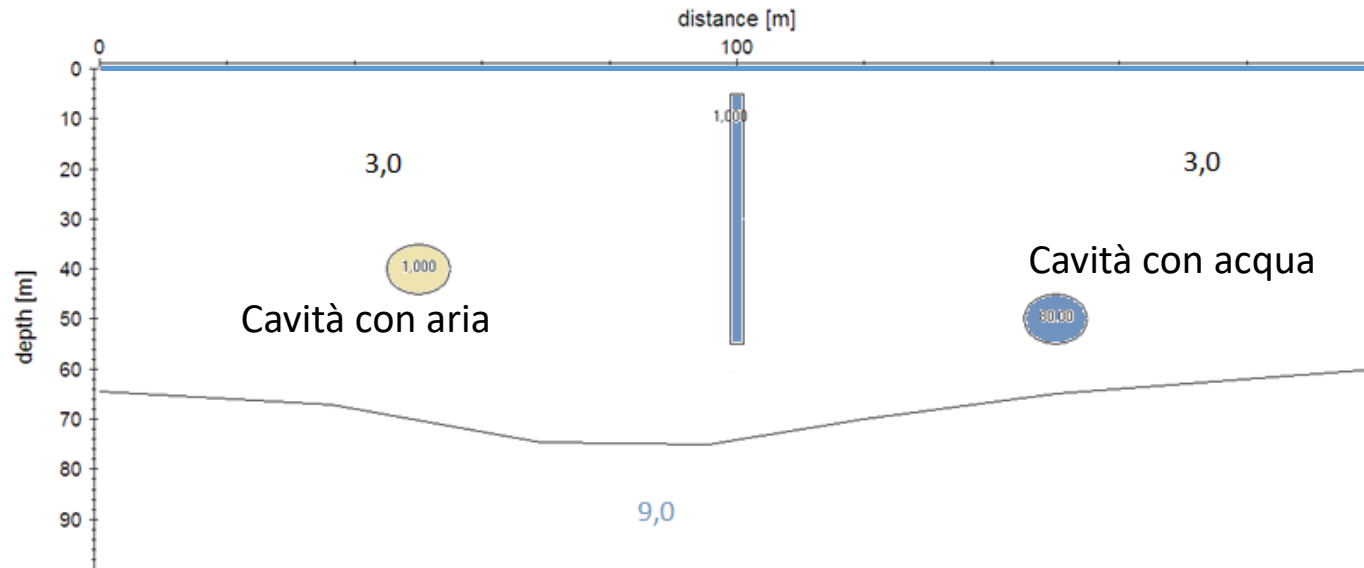


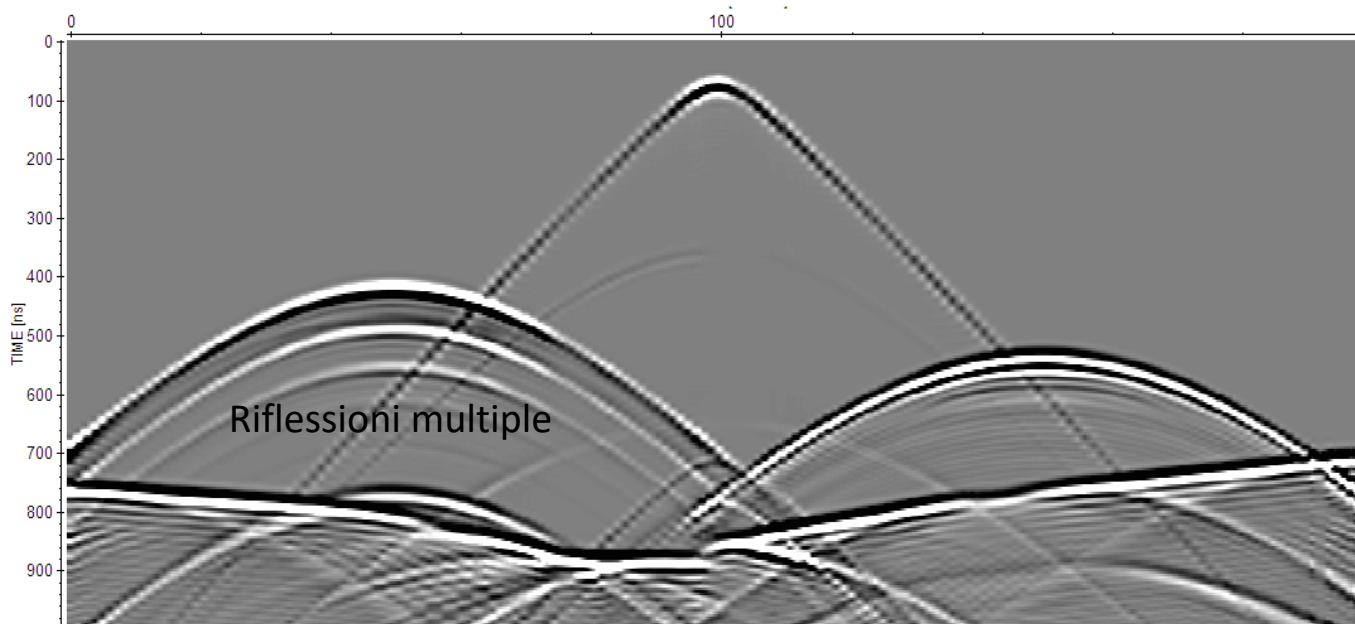
Figura A14: traccia radar 14



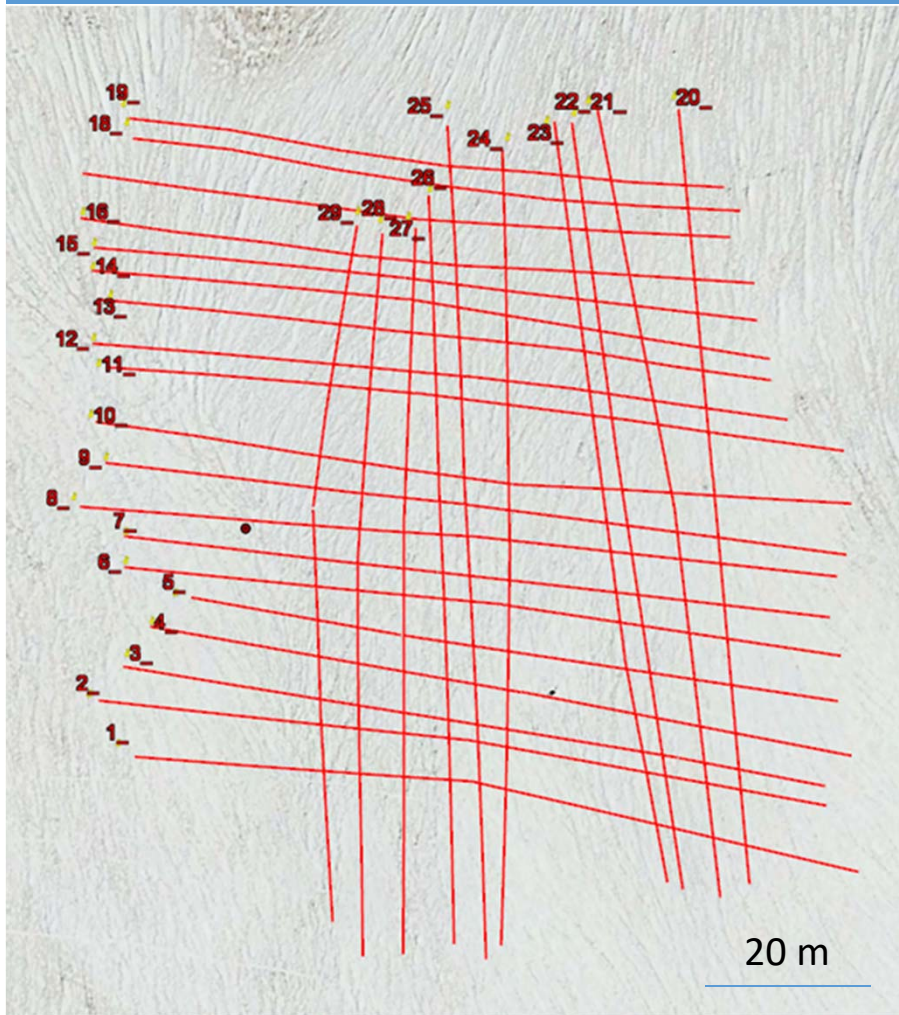
Modellazione risposta georadar (200 MHz)

Simulazione risposta di cavità riempite di aria a sinistra e acqua a destra; la struttura verticale simula un crepaccio.

I valori di permittività elettrica: ghiaccio = 3, aria = 1, acqua = 80; substrato roccioso = 9.

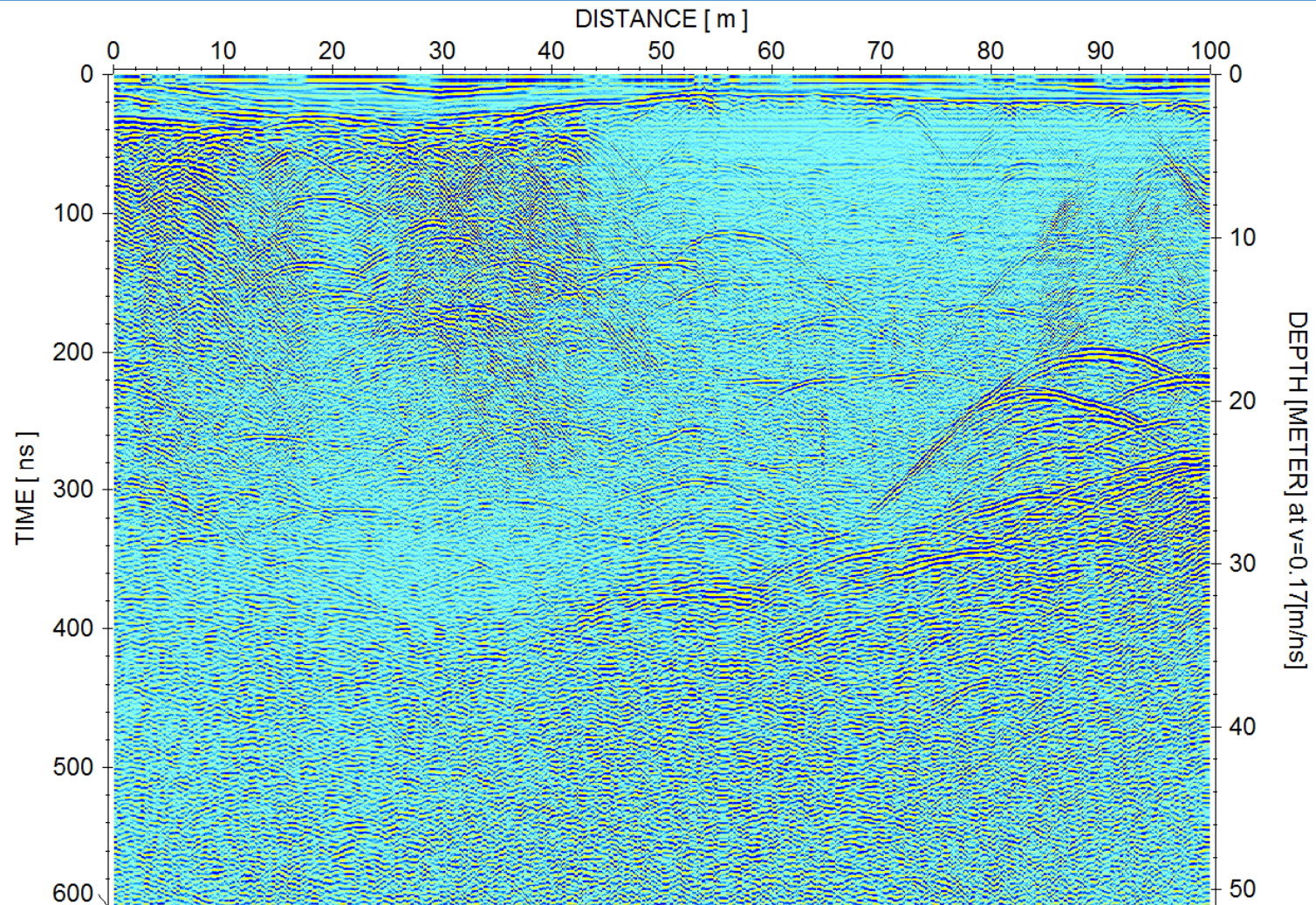


Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia

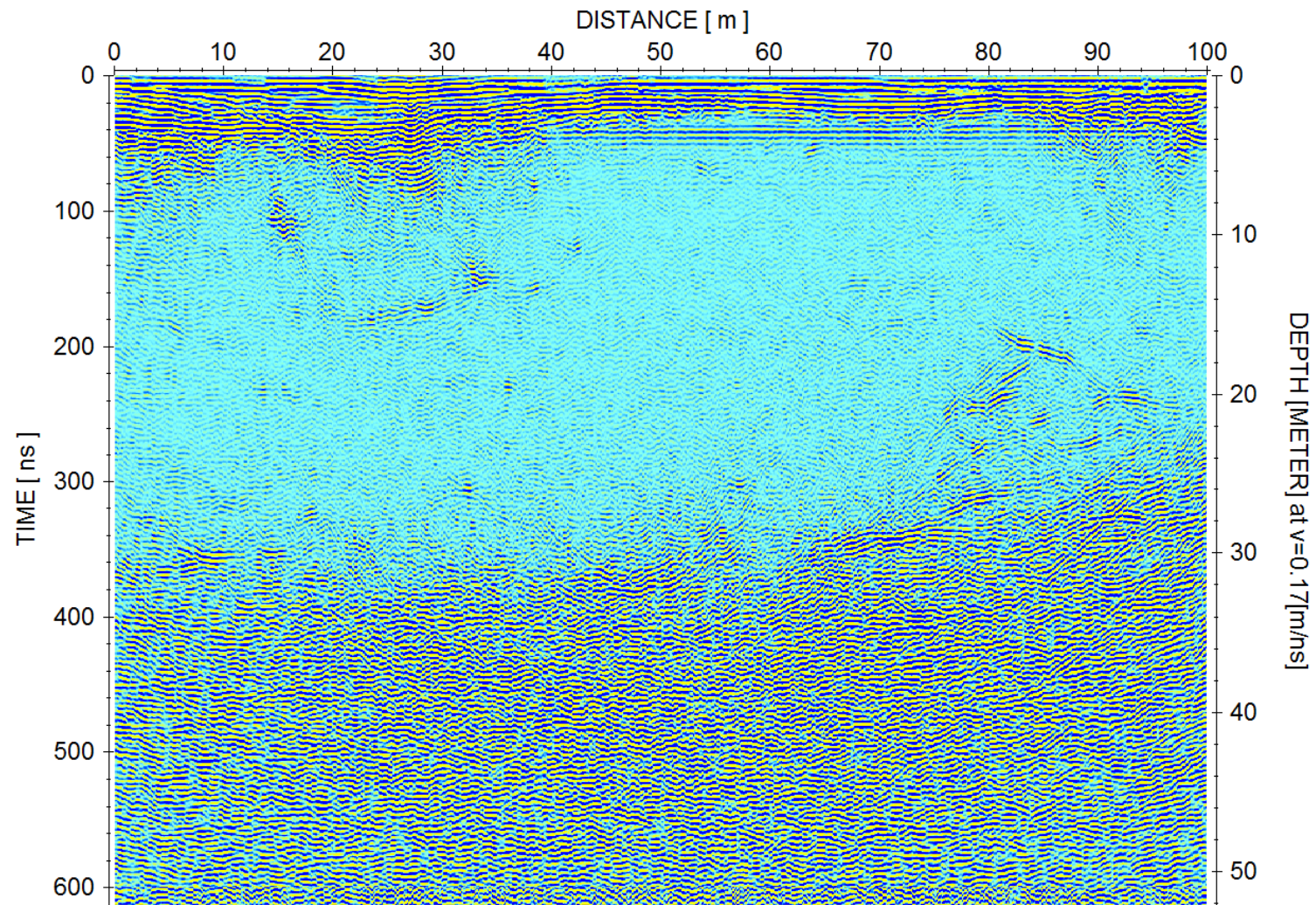


Novembre 2017:
seconda fase di
acquisizione per analisi di
dettaglio delle principali
strutture endoglaciali
GPR – 200 MHz

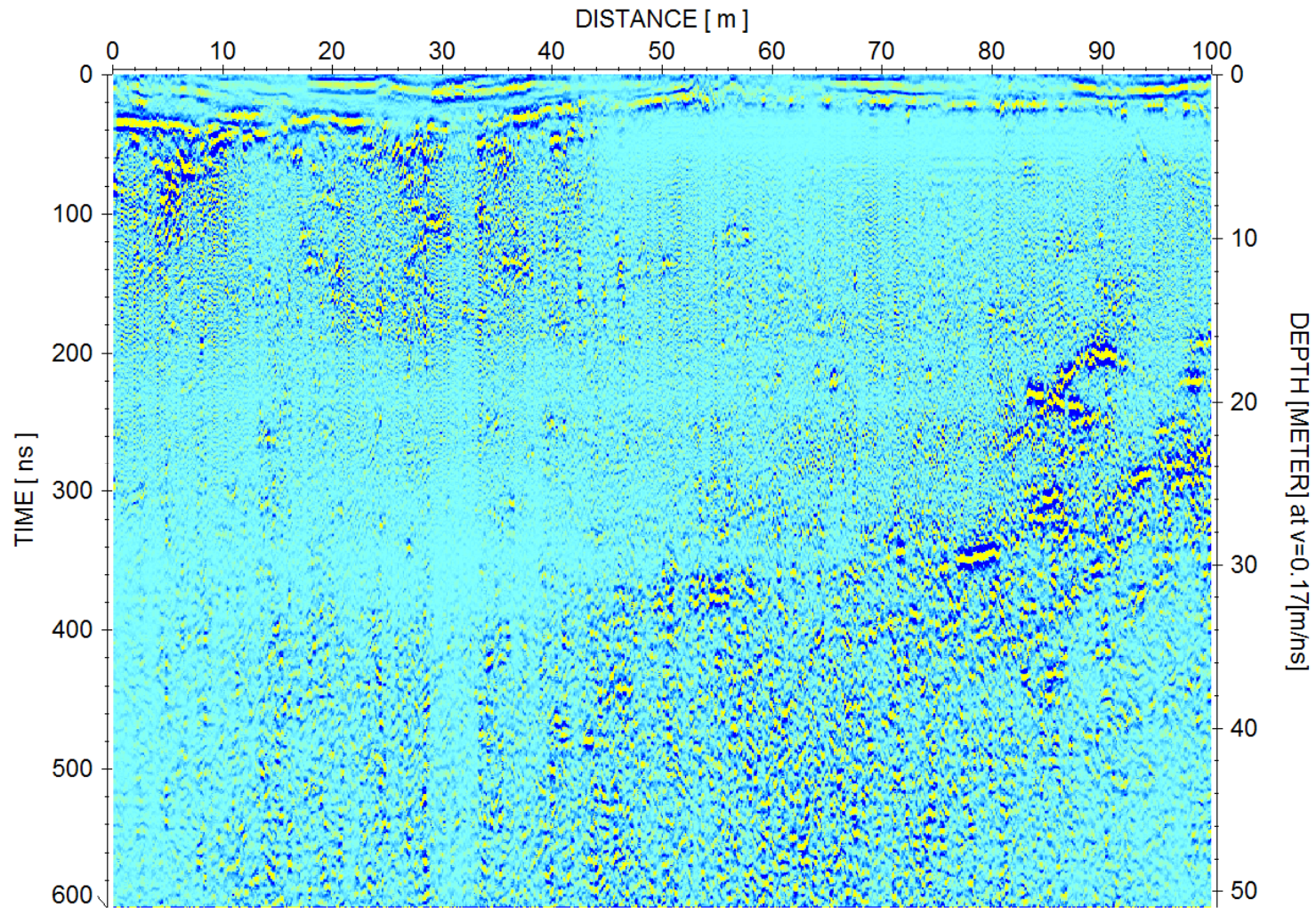
Cherillon (2017) – Valtournanche – Cervinia (Line 18)



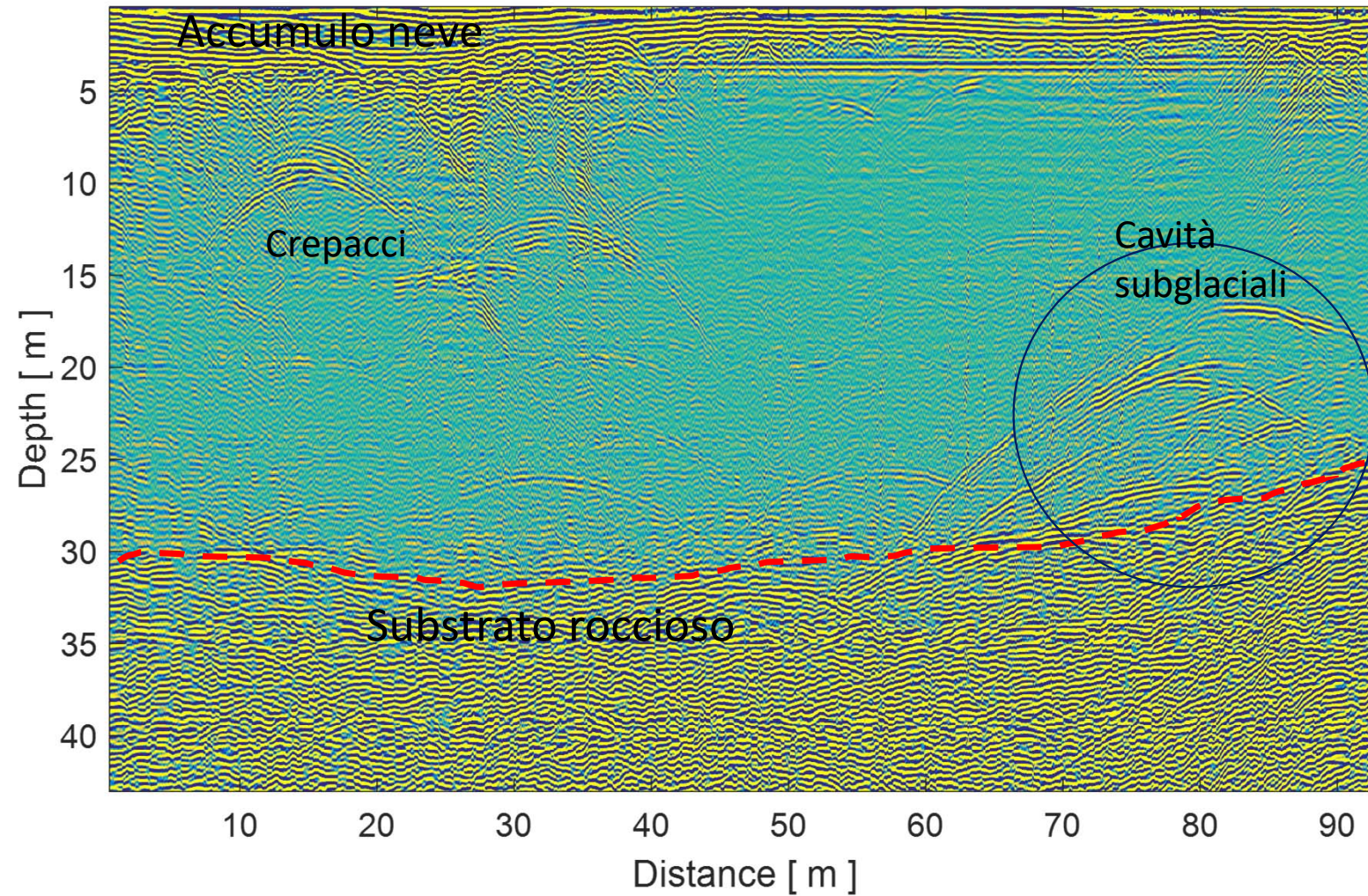
Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia



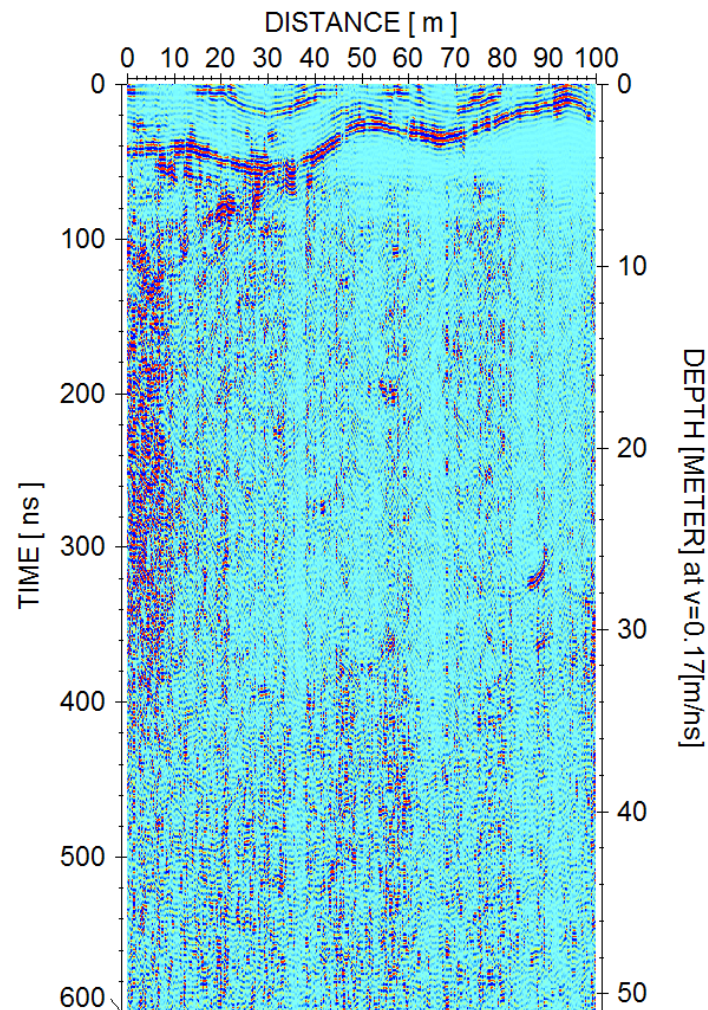
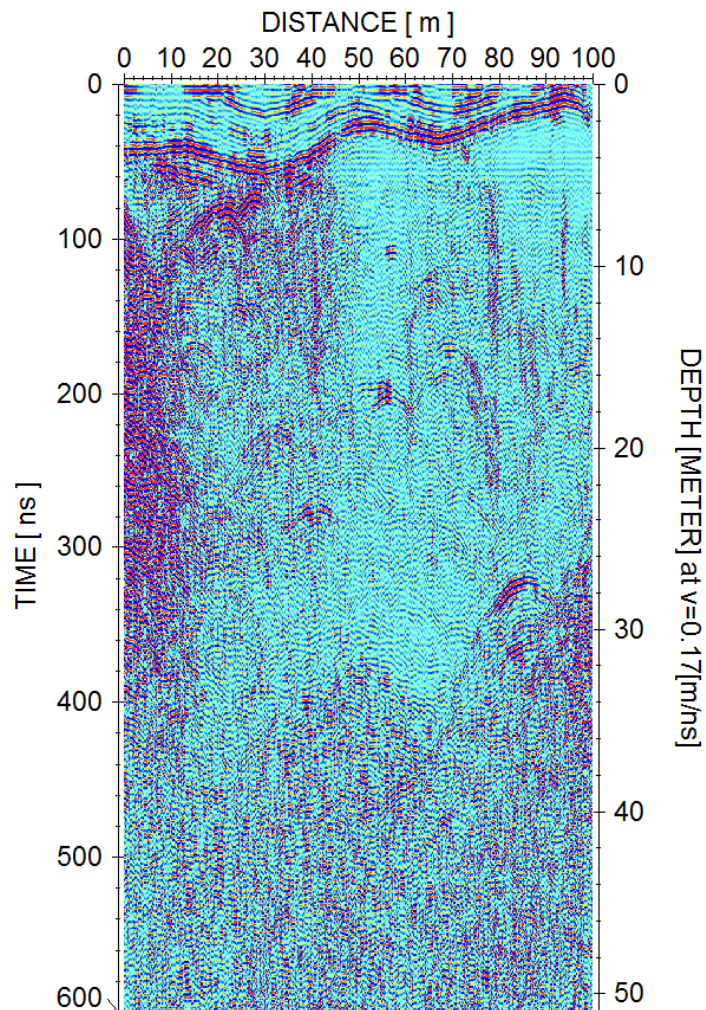
Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia



Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia



Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia

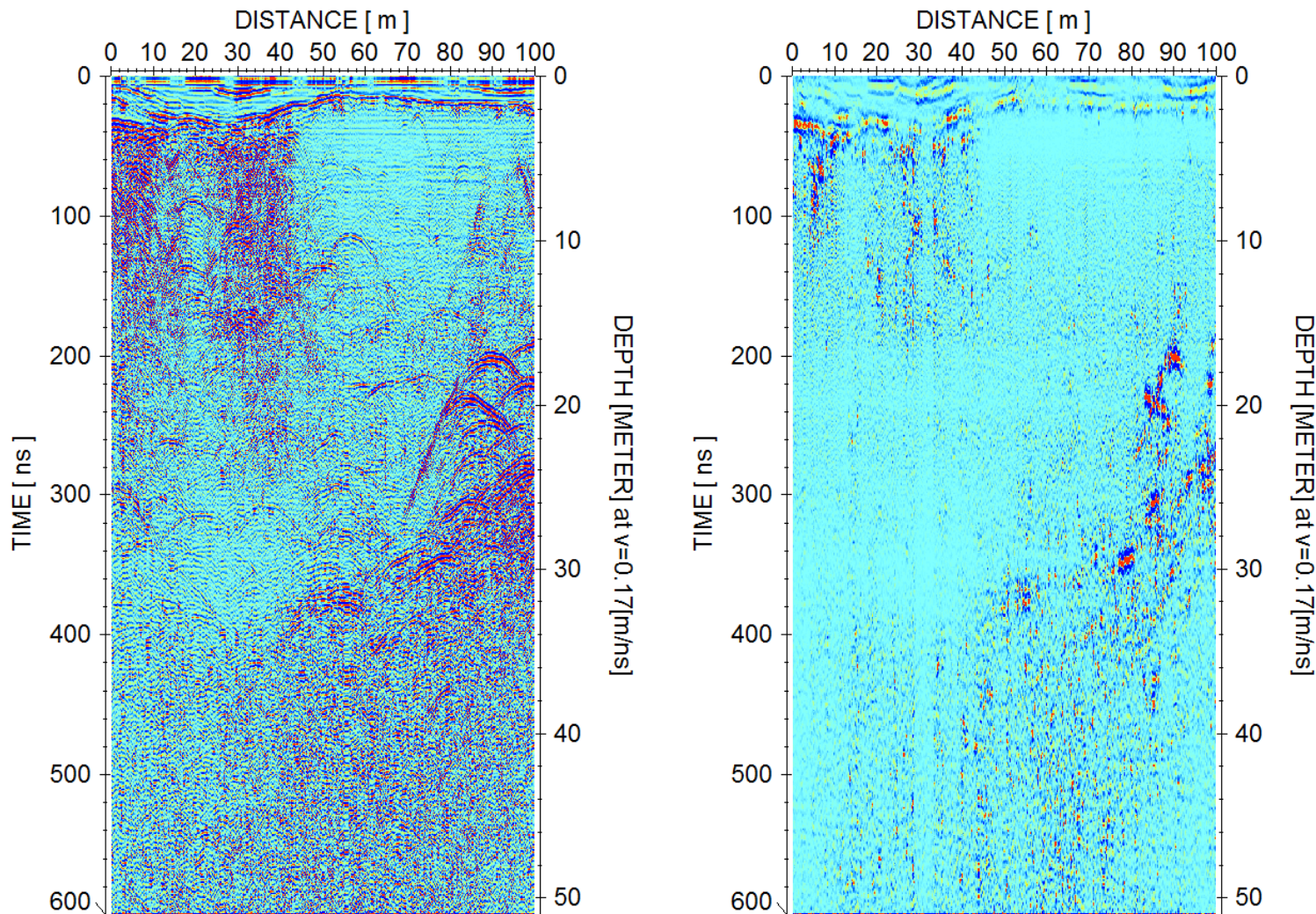


Novembre 2017: seconda fase di acquisizione per analisi di dettaglio delle principali strutture endoglaciali

GPR – 200 MHz – Linea 7

- a) sezione grezza
- b) Sezione filtrata, migrata

Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia

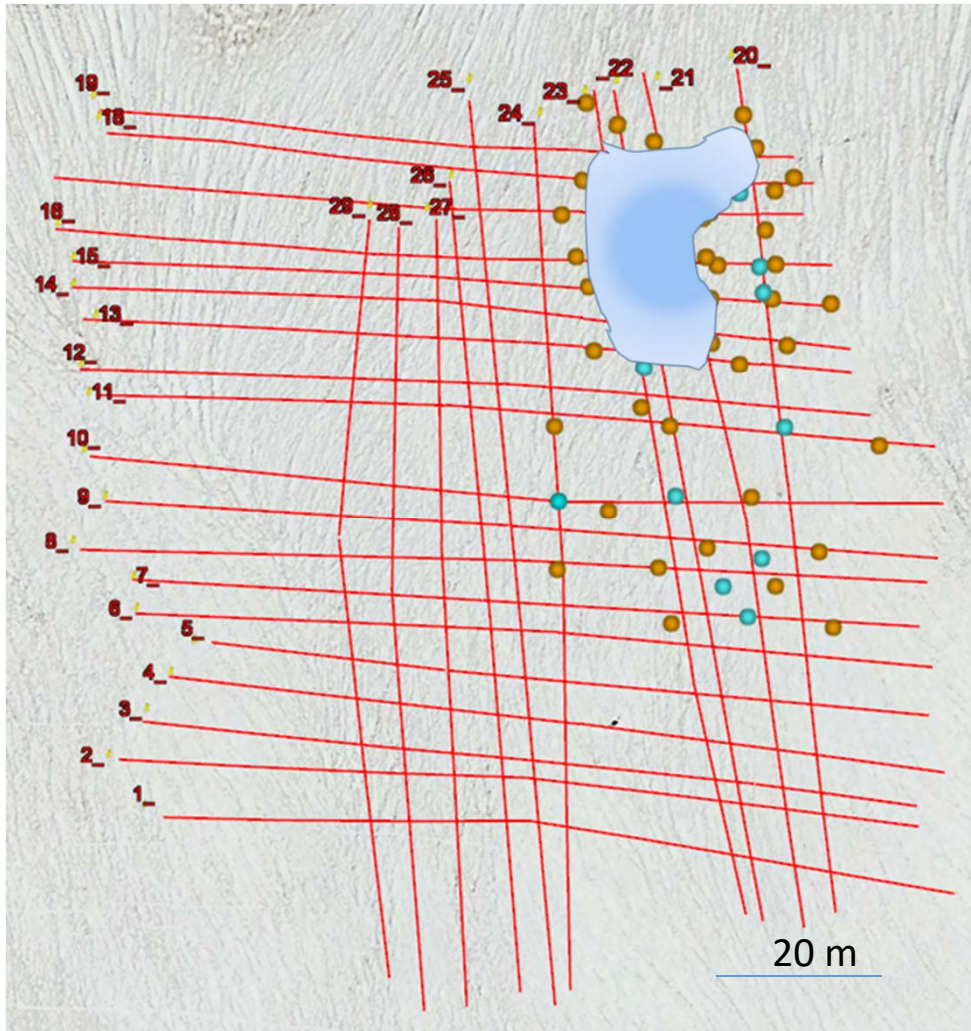


Novembre 2017: seconda fase di acquisizione per analisi di dettaglio delle principali strutture endoglaciali

GPR – 200 MHz – Linea 18

- a) sezione grezza
- b) Sezione filtrata, migrata

Cherillon (2017) – Valtournanche - Cervinia



Novembre 2017: seconda fase di acquisizione per analisi di dettaglio delle principali strutture endoglaciali

GPR – 200 MHz

Picking delle principali riflessioni/diffrazioni a profondità 15-20 m

Volumi stimati: 2500 m³



Ghiacciaio di Rochefort (Val Ferret) – Foto. F. Troglio

Approfondimenti

- Forte E., Pipan M., Francese R., Godio A.; 2015: An overview of GPR investigation in the Italian Alps. *First Break*, 33,8, 61 – 67.
- Godio A., Rege R.B.; 2015: The mechanical properties of snow and ice of an alpine glacier inferred by integrating seismic and GPR methods. *Journal of Applied Geophysics*, 115, 92-99.
- Haeberli F.; 1983: Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4(1), 85-90.
- Legchenko, A.; Vincent, C.; Baltassat, J.M.; Girard, J.F.; Thibert, E.; Gagliardini, O.; Descloitres, M.; Gilbert, A.; Garambois, S.; Chevalier, A.; Guyard, H. 2014: Monitoring water accumulation in a glacier using magnetic resonance imaging. *The Cryosphere*. 8: 155–166.
- Picotti S., Francese R., Giorgi M., Pettenati F., Carcione J.M.; 2017: Estimation of glacier thicknesses and basal properties using the horizontal-to-vertical component spectral ratio (HVSr) technique from passive seismic data, *Journal of Glaciology*, 63, 229-248.
- Podolskiy E.A., Walter F.; 2016: Cryoseismology, *Reviews of Geophysics*, 54 (4), 708.
- Vincent, C. et al. 2012. Detection of a subglacial lake in Glacier de Tête Rousse (Mont Blanc area, France). *Journal of Glaciology*, 58, 211, 866-878.



Alpamayo Cordigliera Blanca – Ande Peruviane – 5950 m