



**C.A.I.**  
COMITATO SCIENTIFICO  
LIGURE - PIEMONTESE - VALDOSTANO

# ARCHIVI GLACIALI

## Le variazioni climatiche ed i ghiacciai

Atti dell'incontro di  
Courmayeur  
2 - 3 settembre 1995

**Il Convegno si è svolto con il patrocinio di:**

**Regione Autonoma Valle d' Aosta  
Assessorato dell' Ambiente Territorio e Trasporti  
Comitato Scientifico Centrale del Club Alpino Italiano**

**Con la collaborazione di:**

**Comitato Glaciologico Italiano  
Società Meteorologica Subalpina**

**Si ringraziano per i significativi contributi:**

**Regione Autonoma Valle d' Aosta  
Assessorato dell' Ambiente Territorio e Trasporti  
Comitato Scientifico Centrale del Club Alpino Italiano**

**Il volume è realizzato su carta riciclata al 100% ai sensi della Legge Regione Autonoma Valle d' Aosta 5-9-1991 n. 46.**

---

**Comitato Scientifico Ligure Piemontese Valdostano del Club Alpino Italiano  
Segreteria presso: Vanna Vignola - via Restano, 42 - 13100 Vercelli - tel. 0161 / 21.43.61**

## SOMMARIO

<i>Saluti e premesse</i> .....	p. 5
A.V. Cerutti, <i>Variazioni dei ghiacciai del Monte Bianco in epoca storica</i> .....	p. 9
R. Ajassa, <i>Il nuovo catasto dei ghiacciai italiani: confronto con il catasto del 1958</i> .....	p. 29
C. Vanuzzo, <i>Metodi e finalità della ricostruzione del glacialismo antico</i> .....	p. 51
C. Smiraglia, <i>I ghiacciai polari, grandi archivi della storia del clima terrestre</i> .....	p. 69
G.C. Rossi, <i>Ricerche glaciologiche ed ambientali sui bacini valdostani</i> .....	p. 89
L. Felolo, <i>Richiesta di diffusione della conoscenza delle variazioni climatiche</i> .....	p. 125
<i>Escursione in Val Ferret</i> .....	p. 129

I contributi di Gianni Mortara e Luca Mercalli non sono pervenuti.

## CONVEGNI DI STUDI SVOLTI

(aggiornato alla data di stampa del volume)

- 1987 Torre Pellice  
*Naturale e artificiale in montagna*
- 1988 Entracque  
*Una gita guidata - cosa fare e cosa far fare per organizzare  
l'osservazione dell'ambiente*
- 1989 Alagna Rif. Pastore  
*Una comunità walser: Alagna* (atti non pubblicati)
- 1990 Varazze - Alpicella  
*Antico popolamento nell'area del Beigua*
- 1991 Bossea  
*Ambiente carsico e umano in Val Corsaglia*
- 1992 Sampeyre  
*Insedimenti umani e architettura tradizionale nelle Alpi*
- 1994 St. Nicolas  
*Il bosco e l'uomo nelle Alpi Occidentali*
- 1995 Courmayeur  
*Archivi glaciali - le variazioni climatiche ed i ghiacciai*
- 1996 Nava  
*L'originalità naturalistica e culturale delle Alpi Liguri nei  
loro rapporti con l'Appennino Ligure e con le Alpi Marittime*
- 1997 Susa  
*Segni della religiosità popolare sulle Alpi Occidentali*

## SALUTI E PREMESSE

L'incontro di oggi è dedicato ad un tema estremamente interessante, che cade in un anno particolare per quanto riguarda la scienza e la divulgazione italiana. Infatti nel 1895 è stata costituita dal Club Alpino Italiano la prima commissione glaciologica, che poi nel 1913 diventerà l'attuale Comitato Glaciologico Italiano.

Questo incontro, che si inserisce nel quadro delle celebrazioni per il centenario, vuol essere anche un momento di riunione e di riflessione sui compiti che il Club Alpino Italiano e le altre associazioni che si occupano di rilevamento glaciale stanno effettuando. Il Club Alpino Italiano ha, credo, dei compiti importanti: da una parte, fondamentale la divulgazione presso i propri soci e presso il vasto pubblico di questi dati; e dall'altra parte la raccolta dei dati stessi.

Credo che oggi il nostro pianeta abbia sostanzialmente 3 grandi ordini di problemi globali: uno sicuramente la distribuzione anomala delle risorse; l'altro, legato al primo, il problema dei conflitti che viviamo continuamente, e il terzo quello delle variazioni globali dell'ambiente.

Noi ci occupiamo di montagna, cioè di quell'area che in decenni vicini a noi sta passando da un mondo anacronistico - privo di presenza umana - ad un mondo pericronico in cui l'uomo sta influenzando enormemente gli ecosistemi. Quindi è importante, credo, una riflessione su queste tematiche e soprattutto sui due aspetti fondamentali che il ghiacciaio rappresenta da questo punto di vista: da una parte il ghiacciaio come archivio della nostra storia, della storia della nostra atmosfera e la storia anche di noi uomini, e dall'altra parte il ghiacciaio come indicatore climatico.

L'incontro di oggi è proprio volto a focalizzare questi due problemi, ad evidenziare l'importanza della divulgazione in questo ambito e a ricordare questo centenario della glaciologia italiana.

A conclusione, saluto i numerosi relatori, tra i maggiori esperti in questo campo oggi in Italia e non solo in Italia.

Claudio Smiraglia

Presidente Comitato Scientifico Centrale  
Comitato Glaciologico Italiano

\* \* \*

Quale direttore generale del Club Alpino Italiano, e unitamente al segretario generale Dr. Fulvio Gramegna qui presente, ho il compito di portare il saluto del Presidente Generale Roberto De Martin, e certificare l'impegno del CAI verso i problemi scientifici a livello sia di studi che di progetti ed obiettivi, come indicato dallo stesso Statuto.

Quindi ben vengano questi convegni di studio, soprattutto quando coinvolgono anche le realtà regionali o interregionali come nel caso del Comitato Scientifico Ligure Piemontese Valdostano.

Desidero ancora ricordare che già quest'anno il Club Alpino Italiano è stato qui a Courmayeur, e vorrei unire con un filo ideale il recente convegno di giugno dal quale sono scaturite le cosiddette "Tavole di Courmayeur" di codice di autodisciplina ambientale (pubblicate sul numero dello Scarpone di settembre 1995) ed il convegno odierno, segno di una presenza costante del CAI sui temi scientifico ambientali.

Auguro buon lavoro e mi congratulo per l'organizzazione da parte del Comitato Scientifico L.P.V.

Piero Carlesi

Direttore Generale Club Alpino Italiano

Siamo ospiti per la seconda volta consecutiva della Regione Autonoma Valle d'Aosta per il lavori del nostro ormai tradizionale convegno didattico scientifico d'autunno, convegno che il Comitato Scientifico Ligure Piemontese Valdostano organizza ormai dal 1987.

Gli sforzi organizzativi hanno questa volta coinvolto altre associazioni quali la Società Meteorologica Subalpina e il Comitato Glaciologico Italiano, con cui in perfetta sintonia si è impostato l'intero programma. Determinante è poi stato il supporto che il Comitato Scientifico Centrale del CAI soprattutto nella persona del suo Presidente Claudio Smiraglia ci ha voluto dare.

Il convegno ha comunque mantenuto l'impostazione che aveva caratterizzato i precedenti: un indirizzo scientifico con una forte valenza didattico-divulgativa per venire incontro all'esigenza di diffondere in ambito CAI ma non solo, quelle nozioni scientifiche che un frequentatore della montagna dovrebbe conoscere per una reale integrazione con l'ambiente.

È con un po' di orgoglio che mi dichiaro soddisfatto del lavoro che il Comitato Scientifico LPV ha svolto in questi anni con i numerosi convegni di studio ed i relativi atti pubblicati, grazie alla competenza ed alla disponibilità dei suoi componenti, ma soprattutto grazie all'efficienza davvero encomiabile della sua segretaria Vanna Vignola.

Prima di passare ai lavori veri e propri del convegno, concludo questo mio breve intervento con alcune parole dette da Annibale Salsa in rappresentanza del Comitato Scientifico Centrale, in occasione del convegno di Alpicella e che indicano molto bene quali siano le finalità del nostro Comitato:

“L'attività del Comitato è orientata a promuovere, indirizzare e incoraggiare una frequentazione culturalmente motivata della montagna vista e vissuta come l'entusiasmante lettura di un grande libro costellato da segni da decifrare e da interpretare. La montagna è un

grande contenitore di fenomeni naturali e culturali, in continua e incessante evoluzione e trasformazione”.

Parole che mi sembrano centrare appieno gli obiettivi che ci siamo proposti affinché la montagna sia sempre più frequentata da persone che sappiano leggere il territorio nella sua complessità, cogliendo nei suoi diversi aspetti conseguenze di interazione incessanti tra l'uomo e la natura. Temi che fin dal convegno di Torre Pellice il Comitato Scientifico LPV con “Naturale e Artificiale” ha cercato di mettere a fuoco sviluppando alcune tematiche al cui centro c'è sempre l'uomo, l'uomo attore ma anche spettatore, fruitore ma anche manipolatore.

A nome dei convegnisti e degli altri membri del Comitato e del CAI in generale, voglio ringraziare quanti hanno collaborato alla riuscita di questo incontro, a cominciare dai relatori che hanno dato la loro totale disponibilità ad intervenire, alla Regione Autonoma Valle d'Aosta - Assessorato all'Ambiente e al Comitato Scientifico Centrale del CAI che hanno patrocinato l'iniziativa, al Comitato Glaciologico Italiano, alla Società Meteorologica Subalpina che hanno collaborato nella programmazione, ed infine al Comune e al Centro Congressi di Courmayeur che hanno messo a disposizione questa splendida struttura.

Mauro Pons

Presidente Comitato Scientifico LPV

AUGUSTA VITTORIA CERUTTI  
Comitato Glaciologico Italiano

## VARIAZIONI DEI GHIACCIAI DEL MONTE BIANCO IN EPOCA STORICA

### 1 - Fattori del glacialismo sul massiccio del Monte Bianco.

Il massiccio del Monte Bianco presenta una linea di cresta che per circa cinquanta chilometri non scende al di sotto dei 3300 m e, in circa una ventina di vette, supera i 4000.

Il suo clima è regolato dai venti provenienti dall'Oceano Atlantico che spirano ad alte altitudini, portando sul Massiccio abbondanti precipitazioni nevose.

La sua grande altimetria e la sua posizione geografica, sono condizioni altamente favorevoli al glacialismo: il Monte Bianco, infatti, è il più importante gruppo glacializzato delle Alpi Occidentali. Le coltri glaciali coprono circa 18.000 ettari, vale a dire poco meno della metà dell'intera superficie. Sul versante italiano si incastonano ventisette ghiacciai che hanno una estensione complessiva di circa 4.700 ettari. (Da aerofotogrammetria 1975).

I ghiacciai traggono origine dalle coltri nevose che si formano là dove la neve caduta nell'anno è in quantità superiore a quella che può fondere nei mesi caldi. Sul Monte Bianco ciò accade attualmente al di sopra dei 2.800 m. sul versante settentrionale; al di sopra dei 3.100 sul nostro che, essendo esposto a sud, riceve una radiazione solare più intensa.

Al di sopra del limite altimetrico a cui si stabilizzano le nevi permanenti, tutto il territorio diventa un grande serbatoio di coltri nevose. Esse si compattano e si arricchiscono di anno in anno e, mentre via via

si rinnovano, scivolano verso valle a causa della forza di gravità, formando le grandi colate che danno origine alle lingue vallive. Queste ultime possono spingersi tanto più in basso quanto più è ricca l'alimentazione che proviene dalle alte quote.

I ghiacciai diventano così gli evidenziatori *del clima*. Essi aumentano di volume e di lunghezza quando si verificano periodi di clima freddo e nevoso; contraggono invece gli apparati quando le temperature medie si innalzano e diminuiscono le precipitazioni nevose.

## 2 - Origine della attuale glaciazione

Fino a poco tempo fa si riteneva che i ghiacciai attuali fossero i resti della grande glaciazione pleistocenica che caratterizzò il primo periodo del quaternario.

Si è invece scoperto che i nostri ghiacciai sono molto meno antichi: *la maggior parte di essi ebbe origine solo sul finire del secolo XVI*.

Infatti, dal 750 dopo Cristo, un periodo caldo della durata di circa otto secoli, aveva portato il limite delle nevi perenni trecento metri al di sopra della quota attuale. Si erano così di gran lunga ridotte la superfici su cui potevano formarsi coltri nevose persistenti. Pare che in quel periodo, non soltanto il Colle del Teodulo a 3.300 m. di altitudine, ma addirittura il Colle del Gigante a ben 3.500 fossero divenuti vie di transito commerciale. Lo attestano la tradizione orale, le cronache del tempo e le antiche carte, in cui i due valichi compaiono rispettivamente con i nomi di Mons Silvius (Tschudi, 1560; Salamanca, 1565; Mercatore, 1595 e altri) e di Col Major. (Sanson, 1648; Visscher, 1664 e altri).

### 3 - La via del "Col Major"

Nella seconda metà del '600, quando da circa un secolo aveva avuto inizio la così detta "Piccola età glaciale", Philibert-Amédé Arnod, fu incaricato dal Duca di Savoia di perlustrare i passi della regione valdostana. Egli allora, a Courmayeur, trovò ben viva la tradizione dei traffici attraverso il Col Major, tanto che nella sua relazione si trova scritto: "L'on prenoit autres fois un passage à droiture d'Entreves par dessus les glaciers de Mont Frety pour descendre en Chamonix en Faucigny". La notizia concorda perfettamente con quanto riportato nella cartografia dell'epoca. L'Arnod, però, non si limitò a riferire ciò che nella Courmayeur dell'epoca si tramandava di padre in figlio; egli volle ispezionare l'antico itinerario. Ingaggiati tre bravi cacciatori di camosci, equipaggiati di "grappins aux pieds, des hachons et des crocs de fer à la main pour se faire pas sur la glace", nel 1689, salì con essi verso il Col Major ma non potè raggiungerlo " *a cause - scrive - des grandes crevaces et interruptions qui se sont faits depuis bien d'années*".

Il brano citato può essere ritenuto l'atto di nascita del ghiacciaio di Toulà, lungo il cui bacino doveva passare l'antico itinerario.

Questo ghiacciaio infatti ha la sua quota più alta a 3.600, un'altitudine che nei secoli caldi dell'alto medioevo doveva essere molto vicina al limite delle nevi perenni di allora; quindi mancando un vero e proprio bacino alimentatore esso, prima della fine del secolo XVI, poteva presentarsi tutt'al più, come un ridotto campo di neve posto negli immediati pressi dell'attuale Colle di Toulà (3.410 m.s.l.m.) il quale, con moltissime probabilità, dovrebbe corrispondere al Col Major della antica cartografia.

### 4 - La piccola età glaciale.

Come il ghiacciaio di Toulà anche gli altri con i circhi alimentatori relativamente a bassa quota, rinascono alla fine del 1500 dopo

un plurisecolare periodo di scomparsa durante il quale il paesaggio delle Alpi e la vita delle loro genti era ben diversa da quelle che conosciamo ora.

La fase climatica fredda e nevosa che si instaura negli ultimi decenni del XVI secolo viene chiamata dagli studiosi “Piccola età glaciale” proprio perché a questo periodo risale l’origine della glaciazione attuale.

Essa è ben documentata per i ghiacciai del Monte Bianco. La citata relazione dell’Arnod è una indubbia importante testimonianza. Ma documenti ancora più espliciti si trovano negli archivi di Chamonix ove l’improvvisa grande crescita dei ghiacciai fu causa di gravissimi disastri proprio sul fondovalle dell’Arve. Questo venne raggiunto dalle fronti glaciali per la prima volta nel primo decennio del 1600 con la distruzione di villaggi, come quello di Boneville che sorgeva presso il corso dell’Arveyron. Di questi grandi disastri naturali abbiamo testimonianza nell’epistolario di San Francesco di Sales, vescovo del Faucigny. Egli compì, nel 1606 e negli anni successivi, visite pastorali a Chamonix; nelle lettere redatte durante tali visite, descrive lo stato di prostrazione della popolazione tanto duramente colpita e anche il paesaggio della valle: “I monti sono pieni di ghiaccio e la valle è piena di case!”.

La situazione era così grave che nel 1610 la Camera dei Conti di Savoia promosse un’inchiesta ufficiale tendente ad accertare - dice il documento dell’epoca - “les pertes et ruynes avenues en ladicte paroisse tant occasion des cheutes des glaciers que ravages et debordement de la riviere d’Arve”.

Una seconda espansione glaciale, nella valle di Chamonix ancora più marcata della prima, culminò nel 1643. La fronte della Mer de Glace si spinse allora nel fondovalle tanto vicino al corso dell’Arve da far temere - dicono i documenti - che ne sbarrasse il corso “et par ce moyen inondat par forme de lac le dessus”; cioè trasformasse l’alta valle in un grande lago. Oggi sul luogo raggiunto dalla fronte glaciale nel 1643 restano le grandi morene ammantate dal fitto bosco comunale di Les Tines.

Sul versante italiano le espansioni del secolo XVII, pur imponenti, non ebbero l'amplitudine di quelle del versante settentrionale. Da noi furono di gran lunga più importanti quelle del secolo XIX e che culminarono nel 1818 e nel 1861. Infatti sul nostro versante non sono reperibili le cerchie moreniche del secolo XVII perché esse furono travolte e distrutte nella grande avanzata delle fronti che ebbe luogo nel secolo scorso.

I ghiacciai, dopo essere stati per le popolazioni del Monte Bianco del secolo XVII, causa di paura e di morte tanto da far dare all'intero massiccio il nome di "Mont Maudit", divennero nei secoli seguenti una grande attrazione paesistica e, con l'illuminismo, dal De Saussure in poi, soggetto di studi naturalistici. Nel 1700 dalle carte sparì il nome di "Mont Maudit" ed apparve la denominazione, già usata da San Francesco di Sales nell'epistolario di "Mont Blanc". Intanto le fronti glaciali, nel corso del secolo XVIII si erano portate notevolmente a monte delle posizioni assunte nel 1643 e pertanto non minacciavano più i fondovalle abitati. Lo documenta la prima carta topografica dei ghiacciai del Monte Bianco, quella redatta da M. A. Pictet e pubblicata nel 1789 nella famosissima opera di De Saussure "Voyages dans les Alpes". In quest'ultima, a proposito della Brenva si legge: "Si le haut de la *Ruize de Brenva* a quelque chose d'imposant et de terrible, le bas a au contraire une rare et singulière élégance. La moraine traverse obliquement le fond de la vallée en s'élevant beaucoup au-dessus d'elle. Tout ce rempart est couvert de mélèzes, qui accompagnent le glacier, en formant une bordure demitrasparente au travers de laquelle on voit percer la couleur vive et brillante des glaces".

## 5 - Le grandi espansioni del secolo XIX.

Quando nel secondo decennio del secolo XIX, si verificò la nuova grande crescita dei ghiacciai essa fu accolta dalla gente dell'epoca con



Brenva dal Chetif - 1995

spirito ben diverso da quello che aveva caratterizzato i tempi dell'espansione precedente.

L'imponente fenomeno naturale fu guardato con interesse scientifico e con ammirazione per cui dell'espansione del secolo XIX abbiamo numerosissime testimonianze letterarie, iconografiche e cartografiche la cui veridicità è testimoniata dalla presenza sul terreno delle morene deposte, assai ben conservate e facilmente riconoscibili. Grazie a questi documenti è possibile ricostruire con molta precisione la storia dei ghiacciai del Monte Bianco a partire dal 1818 e correlarla con le variazioni climatiche.

Proprio in quell'anno infatti entrò in funzione il prestigioso osservatorio meteorologico del Colle del Gran San Bernardo che si trova in linea d'aria a poco più di dieci chilometri dal Monte Bianco e che, come il Monte Bianco, risente dell'azione dei venti atlantici.

Gli osservatori più antichi come quelli delle città di Basilea e di Parigi segnalano che il clima europeo si era fatto particolarmente freddo e ricco di precipitazioni dall'inizio del secolo. Nel 1816 si verificò nell'emisfero australe una delle più grandi eruzioni vulcaniche della storia. Le ceneri eruttate raggiunsero in enormi quantità l'alta atmosfera ed entrarono nella circolazione generale dei venti planetari. Per circa due anni la loro presenza fece da schermo alla radiazione solare provocando un ulteriore peggioramento del clima. In molti paesi europei come Francia, Belgio, Germania, il 1816 è ricordato come "l'anno senza estate", quello in cui i cereali, ortaggi e frutti non riuscirono a giungere a maturazione provocando carestia e fame.

I ghiacciai del Monte Bianco, secondo la testimonianza del Canonico Georges Carrel, pioniere dell'alpinismo scientifico, erano in espansione fin dal 1810 e raggiunsero la loro lunghezza massima nel 1818. Sempre secondo il Carrel, in questo periodo la lingua valliva del ghiacciaio della Brenva si allungò di circa 1000 m assestandosi poi alla distanza di circa un chilometro dal villaggio di Entrèves ove costruì una imponente cerchia morenica.

Anche tutti gli altri ghiacciai del versante italiano del Monte Bianco ebbero fra il 1819 e il 1820 la loro massima espansione storica; le morene deposte in quegli anni, anche oggi ben riconoscibili sul terreno, ci permettono di valutare l'ampiezza di quella espansione.

Il ghiacciaio di Lex Blanche, posto nell'alta Val Veni che ora ha una lunghezza di 3.680 m, ne misurava allora 4.320. Assai minori sono le riduzioni in lunghezza dei ghiacciai del Miage e della Brenva, passati, rispettivamente da 11.000 m a 10.350 e da 8.000 m a 7940. Ma nella Val Ferret, il ghiacciaio di Frebouzie, lungo attualmente 2.250 m, allora ne misurava 3.600; quello di Triolet, ora di 2.500 ben 5.200; quello di Pré de Bar, ora di 3.990, 5140. L'aspetto del paesaggio glaciale del Monte Bianco in quegli anni ci è documentato dalle bellissime stampe del Lory, pubblicate nel volume "Voyage pittoresque autour du Mont Blanc" che venne pubblicato nel 1826.

Fra il 1818 e il 1835 per diciassette anni, la temperatura media annua si innalzò. Si tratta di variazioni dell'ordine di meno di mezzo di grado centigrado ma tanto basta perché il limite climatico delle nevi permanenti si elevi di quasi cento metri di altitudine e quindi le superfici su cui si possono formare le coltri nevose pluriennali diventino considerevolmente più ridotte. Se poi si aggiunge che in quei diciassette anni le precipitazioni all'osservatorio del Gran San Bernardo risultano di soli 1.698 mm di equivalente in acqua a confronto di una media di lungo periodo di circa 2.000 - media che era certo stata largamente superata nei decenni precedenti - ben si giustifica la contrazione che gli apparati glaciali del Monte Bianco subirono fra il 1819 e il 1845 e che ci viene documentata soprattutto dalle relazioni del Forbes (1845).

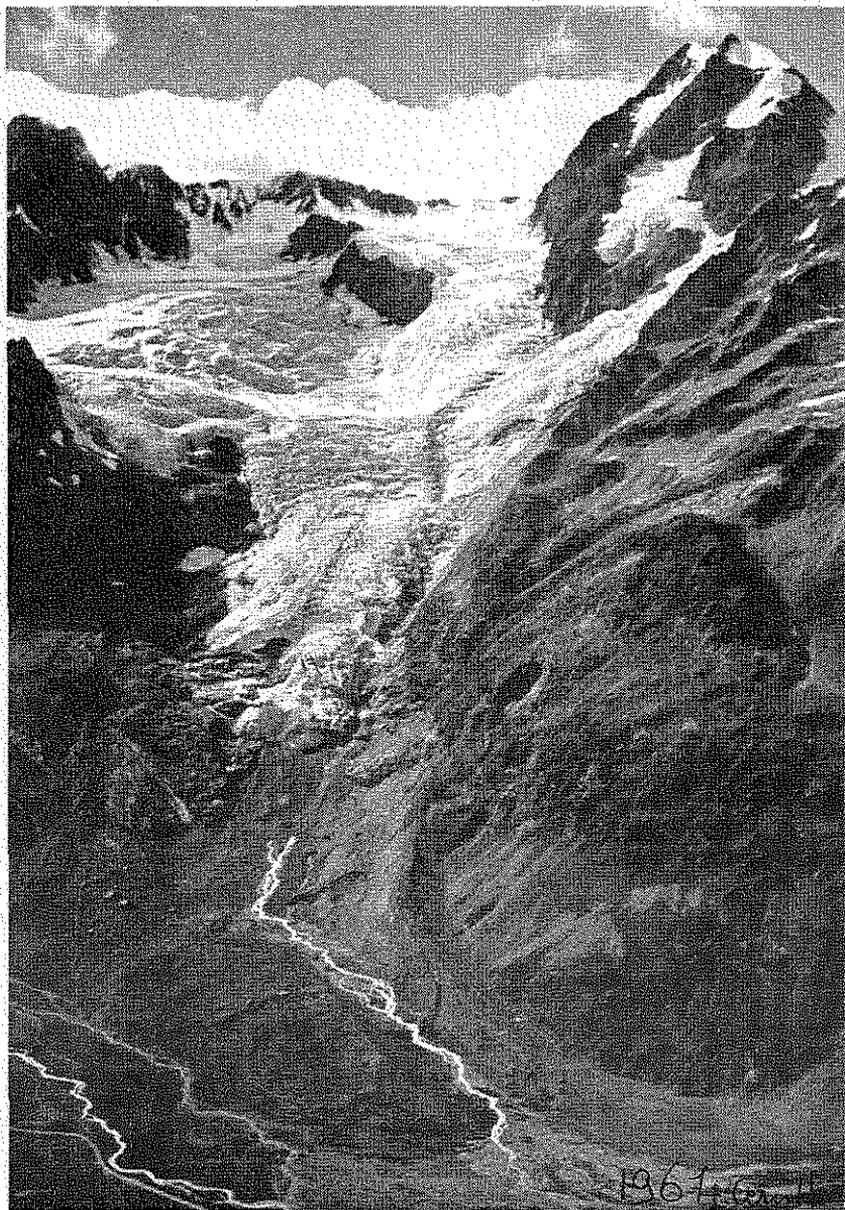
Seguì poi un periodo di altri diciassette anni di basse temperature e abbondanti precipitazioni. Come conseguenza il limite climatico delle nevi perenni si abbassò dando luogo alla formazione di

ricche coltri nevose. Otto anni dopo l'inizio della fase climatica favorevole al glacialismo, nel 1842 alcuni ghiacciai del Monte Bianco e in particolare quello di Lex Blanche, cominciano ad espandersi, tre anni più tardi l'espansione è generalizzata e viene documentata dai lavori del Favre, dalle carte dello Stato Maggiore Sardo all'1:50.000, redatte nel 1854 e da quella famosissima del Mieulet, pubblicata nel 1865. In quest'ultima che è alla scala 1:40.000, si può riconoscere molto bene la morfologia assunta dalle lingue vallive a seguito dell'espansione quasi ventennale. In particolare si nota che la fronte del Pré de Bar si era nuovamente spinta fino al solco principale della Val Ferret ma non raggiungeva le morene frontali del 1818 e la stessa cosa avveniva per le fronti del ghiacciaio del Triolet e per quello del Frebouzie.

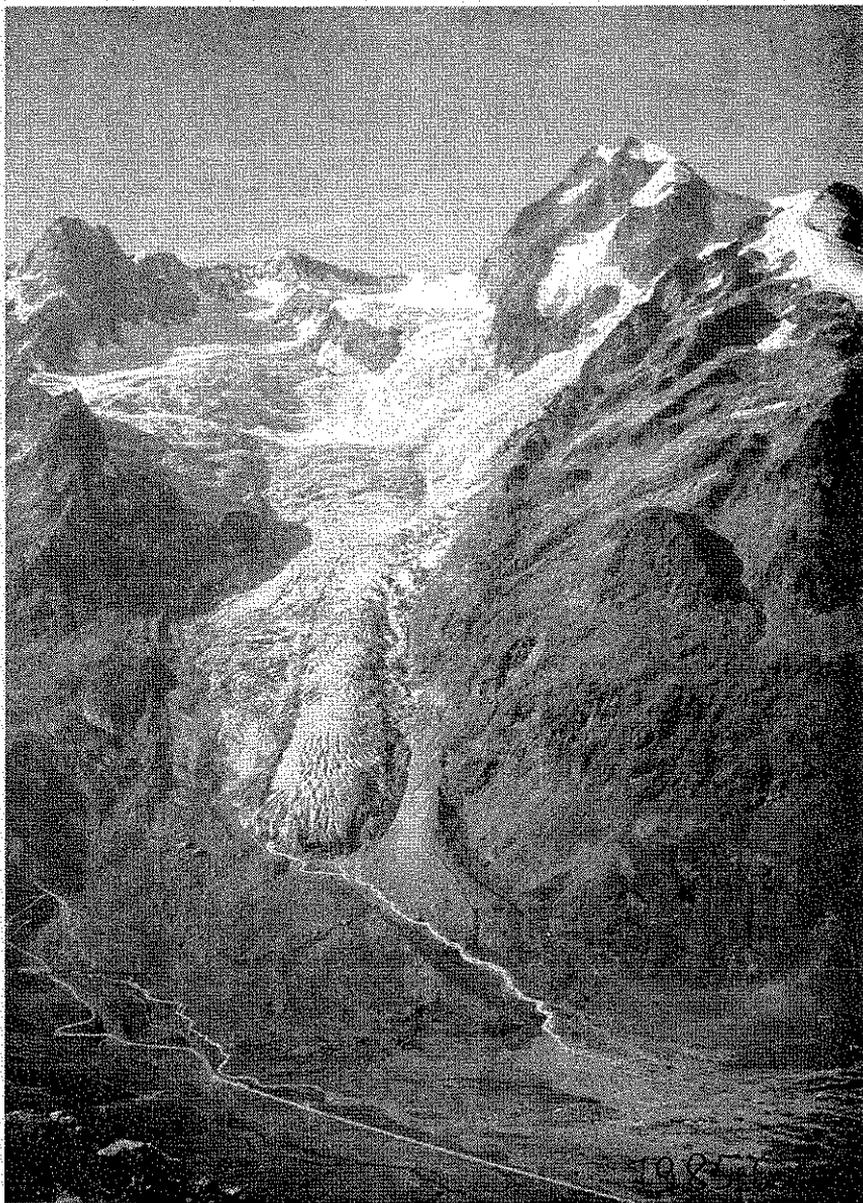
Fra il 1854 e il 1880 scorrono ventisei anni più caldi dei precedenti e soprattutto assai più poveri di precipitazioni. Già dal 1862 i ghiacciai del Monte Bianco di contraggono e si tratta di una fase di ritiro molto accentuato. Il ghiacciaio della Brenva riduce la lunghezza della sua lingua valliva di ben 1.020 m nei confronti dello sviluppo assunto nel 1818! Ce lo attesta il primo rilievo tacheometrico del ghiacciaio eseguito nel 1879 dal Marengo. Le carte dell'Istituto Geografico Militare rilevate nel 1882, presentano la fronte del ghiacciaio di Pré de Bar nel suo vallone di origine, alla quota di 2007 m, vale a dire a ben 940 m di distanza dalla morena frontale deposta nel 1818-20.

Seguono dieci anni freddi anche se non particolarmente ricchi di precipitazioni. I ghiacciai del Monte Bianco reagiscono con una espansione culminata nel 1897, durante la quale le lingue vallive si allungarono di 200 - 300 m e anche più.

Il secolo XIX si conclude con una fase climatica temperata-asciutta che si riflette a partire dal 1898 in una contrazione lineare dei ghiacciai del Monte Bianco dell'ordine di 100 - 200 m.



Lex Blanche 1961



Lex Blanche 1985

## 6 - Le variazioni del secolo XX.

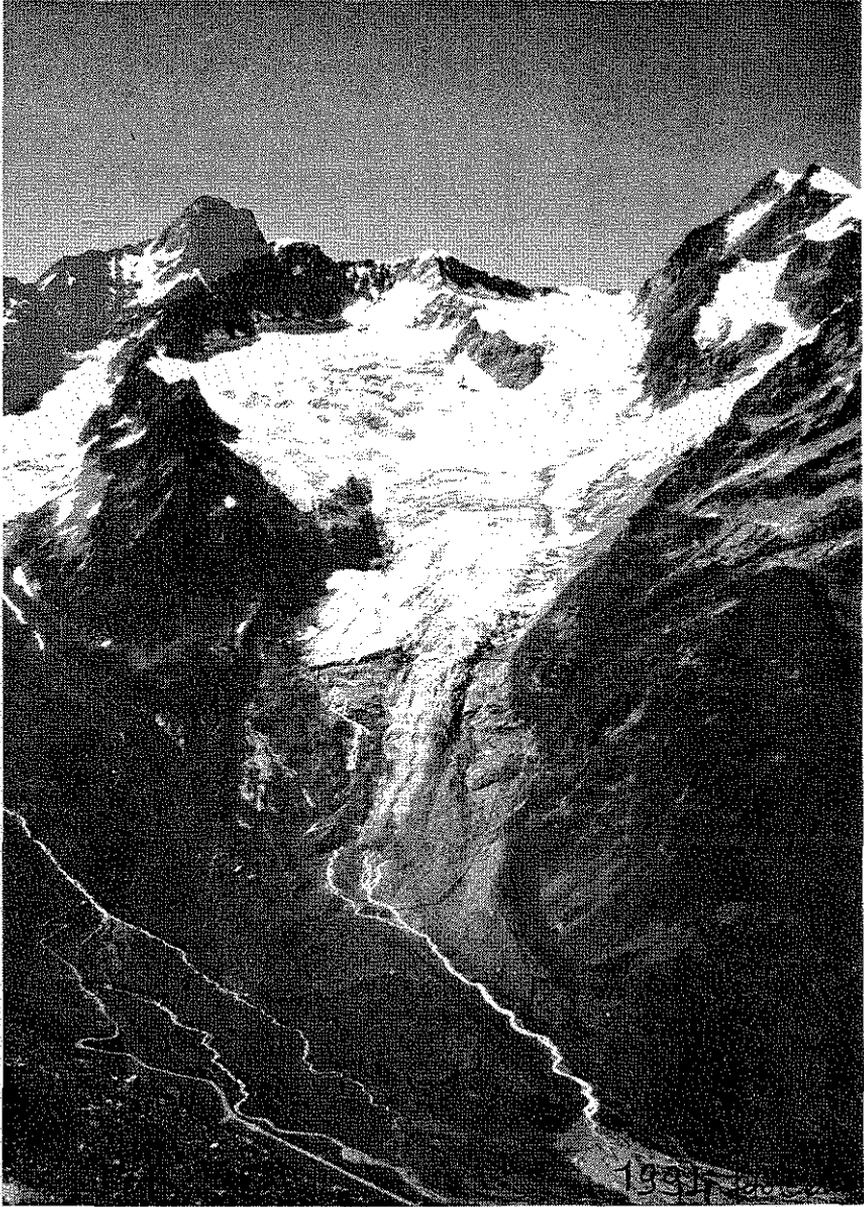
Il secolo XX è caratterizzato da una fase climatica fredda e umida fra il 1901 e il 1920 a cui corrisponde una crescita degli apparati glaciali del Monte Bianco che si annuncia, come le precedenti, con un ritardo di circa dieci anni sull'inizio della fase climatica favorevole al glacialismo.

La lingua valliva del ghiacciaio di Lex Blanche si estese più di 300 m; quella della Brenva, quasi altrettanto; quelle del Triolet e di Pré de Bar, più di 100 m. I ghiacciai di canalone e di circo come quelli di Brouillard, Frenay, Entrèves, Toula, Planpinceux, Grandes Jorasses, Frebouzie, spinsero le loro fronti sulle soglie dei circhi e di lì scaricando frequenti e copiose valanghe di ghiaccio formarono alla base delle pareti rocciose potenti coni di rimpasto, veri e propri piccoli ghiacciai rigenerati.

Segue poi fra il 1921 e il 1950, una lunga fase climatica molto sfavorevole al glacialismo, che fu però interrotta, fra il 1935 e il 1940, da sette anni freddi e umidi. Ciò malgrado, nel corso del trentennio, i ghiacciai del Monte Bianco subirono la più pronunciata contrazione lineare e volumetrica che mai si fosse verificata nel corso dell'ultimo secolo.

Malgrado una effimera espansione fra il 1940 e il 1942, frutto dei sette anni umidi e freddi il ghiacciaio di Lex Blanche riduce la sua lunghezza di 960; quello di Pré de Bar di 577. Il ghiacciaio del Triolet, nel 1938 ritira la fronte attiva a monte della soglia del circo interrompendo l'alimentazione della lingua valliva che si trasforma in un gigantesco ammasso di ghiaccio fossile, destinato alla totale scomparsa.

A seguito di questo evento, la lunghezza del ghiacciaio si riduce di 2.800 m nei confronti della massima espansione; la fronte passa da quota 1780 a quota 2.400 e l'apparato perde le caratteristiche di ghiacciaio vallivo per assumere quelle di ghiacciaio di circo.



Lex Blanche 1994

I ghiacciai del Monte Bianco - come scrive Paul Veyret, prestigioso geografo francese, in uno studio del 1967 - prendono l'aspetto "des corps trop maigres flottant dans vêtements trop grandes".

Non seguono il regresso generalizzato i ghiacciai del Miage e della Brenva, ambedue situati nella Val Veni e ambedue con un bacino alimentatore ad alta altimetria in cui si raccolgono le coltri glaciali che scendono dalla vetta del Monte Bianco e dai suoi immediati elevatissimi contrafforti. La loro buona alimentazione è garantita proprio dai vasti tratti dei bacini alimentatori posti al di sopra dei 4.000 m. ove anche le precipitazioni estive sono solide. Tutti gli altri ghiacciai italiani del Monte Bianco hanno bacini alimentatori posti ad altitudine di almeno 600 m. inferiori e pertanto su di essi una parte più o meno grande delle precipitazioni dei mesi caldi, cade sotto forma di pioggia senza contribuire all'alimentazione delle coltri glaciali. I ghiacciai del Miage e della Brenva in rapporto agli altri risultano quindi privilegiati per quanto riguarda l'alimentazione, soprattutto durante le fasi a clima caldo. Questo è certo un fattore che concorre alla spiegazione delle loro variazioni, più contenute che negli altri ghiacciai del Monte Bianco.

Il ghiacciaio del Miage, con una superficie di 13.000 ettari, è il maggiore del versante italiano del Monte Bianco. Esso si dimostra poco sensibile alle fasi climatiche sfavorevoli. Questo fenomeno era già stato sottolineato dal Sacco nel 1919 e gli eventi dei decenni successivi hanno sempre più confermato l'osservazione dell'insigne glaciologo. La lunghezza attuale del ghiacciaio del Miage è di circa 10.400 m, appena 600 in meno di quella nel 1818.

Il ghiacciaio della Brenva fino al 1920 aveva seguito i ritmi degli altri ghiacciai del Monte Bianco. Il 19 novembre di quell'anno, mentre il ghiacciaio era in piena espansione, dalle pareti del Monte Bianco che incombono sopra il suo bacino, si staccò una frana gigantesca. L'enorme massa di detriti, valutata dal Valbusa in circa sette milioni di metri cubi, investì la lingua valliva provocando, negli anni successivi, per

assestamento plastico, un anomalo rapido allungamento della lingua stessa. Fra il 1921 e il 1941, mentre tutti gli altri ghiacciai erano in fase di contrazione, la lingua valliva della Brenva si allungò di 485 m. Essa - come mostrano le fotografie dell'epoca - era allora un "Glacier Blanc" che si appoggiava al versante del Mont Chetif e dominava minaccioso la strada comunale della Val Veni; la Dora entrava sotto il ghiacciaio a Planponquet in un tunnel azzurro e ne usciva alla fronte per una larga porta che si trovava appena ad un centinaio di metri a monte del grande arco di morena frontale 1818.

Il clima che si instaura dopo il 1950 è più fresco di quello degli anni precedenti. L'isoterma 0 C, che, in luglio, fra il 1941 e il 1950 si stabilizzava ben al di sopra dei 3.600 m di altitudine causando un forte innalzamento del limite delle nevi perenni, fra il 1951 e il 1961 sui ghiacciai del Monte Bianco non sale al di sopra dei 3.480, favorendo grandemente in questo modo l'alimentazione delle coltri glaciali. Già dal 1953-54 nei bacini alimentatori del Monte Bianco si notava la formazione di potenti coltri nevose benché le lingue vallive continuassero ad accorciarsi. In pochi anni però, quella che potremmo chiamare "l'onda di piena", scese fino alle fronti dei ghiacciai più alti (Toula, Grandes Jorasses, Plan Pinceux, Frebouzie ecc.) e nel 1962 raggiunse anche le fronti delle lingue vallive.

La fase climatica favorevole al glacialismo si protrasse, pur con alti e bassi, fino al 1980 e l'espansione generalizzata dei ghiacciai del Monte Bianco perdurò fino al 1989. Nel corso di questi diciotto anni, tutti gli apparati divennero assai più turgidi tanto nel bacino di alimentazione quanto in quello di ablazione. Lo spessore del ghiaccio nelle lingue vallive del Miage e della Brenva, superò addirittura l'altezza delle morene del secolo scorso mentre la loro lunghezza si accrebbe considerevolmente. Per il Miage, che reagisce sempre molto moderatamente alle inversioni di fase, l'allungamento è valutabile a circa 100 m; per la Brenva, invece, assai più reattiva è di ben 490 m e fu accompagnato da un notevolissimo

simo allargamento della fronte, tanto che questa, sulla destra idrografica era giunta ad invadere l'alveo della Dora di Val Veni obbligando il torrente a scavarsi un tunnel sub-glaciale. Nel 1989 la fronte della Brenva distava non più di una trentina di metri dall'arco morenico costruito dalla massima espansione storica, quella del 1818.

La lingua valliva del ghiacciaio di Lex Blanche si allungò di ben 740 m a causa del fortissimo ritiro subito negli anni precedenti la sua fronte si tenne ancora assai lontana dalle cerchie moreniche più esterne. Essa si portò fino a quota 2060 ove si presentava turgida e possente con l'aspetto di una alta falesia di ghiaccio.

Il ghiacciaio di Frebouzie, nella Val Ferret portò la sua fronte sospesa a valle della soglia rocciosa di quota 2.400 donde, scaricando sui sottostanti pendii frequenti valanghe di ghiaccio, formò ai piedi della parete una persistente placca di ghiaccio rigenerato.

La lingua valliva di Pré de Bar si allungò di 247 m e si allargò notevolmente fino ad occupare tutta la larghezza dell'alveo lasciato dalle morene 1818.

Questa ultima espansione dei ghiacciai del Monte Bianco culminò fra il 1988 e il 1989. Essa fu senza alcun dubbio la maggiore del nostro secolo per l'accrescimento lineare e volumetrico degli apparati. Tuttavia essa, a causa della fortissima contrazione che l'aveva preceduta, non giunse a riportare i ghiacciai nelle condizioni del 1920, salvo che per il Miage e per la Brenva che - come abbiamo visto - hanno un comportamento assai anomalo.

Nel 1989 già da nove anni si era affermata una fase climatica gravemente sfavorevole al glacialismo.

All'osservatorio del Piazzale Italiano del Traforo del Monte Bianco, le temperature medie dei mesi estivi, dal 1981 risultano di circa 1 grado centigrado più alte della media precedente, il che corrisponde ad una elevazione di circa centocinquanta metri dello 0 termico e del limite delle nevi permanenti, se la quantità di queste ultime fosse rima-



Pré de Bar 1955



Pré de Bar 1992

sta quella dei decenni precedenti. Su questo fenomeno purtroppo manchiamo di dati specifici. Tuttavia all'osservatorio del Traforo del Monte Bianco posto all'altitudine di 1381 m per il periodo 1965-88 risulta una media annua di cadute neve pari all'altezza di circa sei metri; e questa, fra il 1988 e il 1993, si riduce a poco più di tre metri. È quindi ragionevole supporre che anche in alta quota le precipitazioni nevose siano diminuite proprio mentre aumentava l'ablazione estiva, provocando, nel giro di qualche anno, una forte diminuzione di potenza delle coltri nevose alimentatrici.

Negli ultimi due inverni la nevosità appare nuovamente aumentata raggiungendo al piazzale italiano del Tunnel del Monte Bianco la media di circa cinque metri e mezzo. Le temperature primaverili e estive degli ultimi due anni appaiono alquanto meno alte che per il passato e in effetti il paesaggio del massiccio del Monte Bianco è assai più ricco di neve residua che negli anni precedenti. Stiamo entrando in una nuova fase climatica favorevole al glacialismo? La risposta la potremo avere fra qualche tempo, se le coltri nevose che certamente si sono arricchite dopo il 1993, saranno in grado di dare origine ad una onda di piena, capace di propagarsi nei prossimi anni fino alle lingue vallive degli apparati glaciali.

Fasi climatiche al Gran S. Bernardo						Oscillazioni dei Ghiacciai del Monte Bianco	
Fasi climatiche	Temperature medie annue (°C)	Scarto su media (-1,5 °C)	Precipitazioni medie annue (mm)	Scarto in % su medie (1921 mm)	Caratteristiche della fase (*)		Periodi di espansione (+) e contrazione (-)
1818-1835	-1,3	+0,2	1698	-11%	temperato	asciutto	1810-1818 +
1836-1853	-1,9	-0,4	2441	+27%	freddo	umido	1819-1842 -
1854-1880	-1,2	+0,3	1503	-22%	caldo	asciutto	1843-1860 +
1881-1891	-1,9	-0,4	1924	+0,1%	freddo	prec. norm.	1862-1882 -
1892-1900	-1,4	-0,1	1691	-12%	temperato	asciutto	1883-1897 +
1901-1920	-1,8	-0,3	2194	+14%	freddo	umido	1898-1910 -
1921-1934	-1,3	+0,2	2006	+4%	temperato	prec. norm.	1911-1921 +
1935-1941	-1,7	-0,2	2426	+26%	freddo	umido	1922-1939 -
1942-1950	-0,6	+0,8	1890	-16%	caldo	asciutto	1940-1942 +
1951-1981	-1,3	+0,2	2150	+14%	temperato	umido	1943-1961 - 1962-1988 +

Nota: (\*)

Fase temperata: temperatura vicina alla media del lungo periodo (-1,5°C);

Fase fredda: temperatura inferiore di almeno 0,2°C alla media del lungo periodo;

Fase calda: temperatura superiore di almeno 0,3°C alla media del lungo periodo;

Fase a piovosità normale: precipitazioni comprese fra il +5% e -5% della media del lungo periodo (mm. 1921);

Fase umida: precipitazioni superiori alla media del lungo periodo di almeno il 5%;

tabella 2

Variazioni lineari dei ghiacciai del Monte Bianco nei sec. XIX e XX

FASI GLACIALI		GHIACCIAIO DI:									
		Lex Blanche		Brenva		Frebouzie		Triolet		Pre de Bar	
Sec. XIX		Q.f.	L.m.	Q.f.	L.m.	Q.f.	L.m.	Q.f.	L.m.	Q.f.	L.m.
1	+ 1810 - 1818	1990	4320	1380	8000	1733	3600	1780	5200	1850	5140
2	- 1819 - 1842	=	=	=	7750	=	=	=	=	=	=
3	+ 1843 - 1860	2000	4280	=	7900	=	=	=	=	1870	=
4	- 1861 - 1882	=	=	=	6980	=	=	=	4100	2007	4200
5	+ 1883 - 1897	=	=	=	7300	=	=	=	4350	=	4360

Sec. XX											
1	- 1898 - 1910		3750	=	7080	=	=	=	4150	=	4240
2	+ 1911 - 1921	2025	4050	1430	7310	2000	2400	1942	4250	1960	4390
3	- 1922 - 1939	2075	3900	=	7795	=	=	2300	2550	2020	4165
4	+ 1940 - 1942	2070	3940	1390	7840	=	=	=	=	1995	4228
5	- 1943 - 1961	2400	3090	1485	7440	2400	2100	2400	2400	2085	3813
6	+ 1962 - 1988	2055	3830	1384	7940	2350	2250	2350	2500	2070	4060
7	- 1989 - 1995	2065	3680	=	=	=	=	=	=	2075	3990

Note: +: Espansione. -: Contrazione. Q.f.: Quota fronte. L.m.: Lunghezza massima in metri. =: Dato mancante.

Fonti sec. XIX - 1) Archi morenici; 2) Sacco, Silvestri; 3) Forbes, Mieullet; 4) Cartografia I.G.M.; 5) Druetti, Porro.

Fonti sec. XX - 1) Revelli; 2) Archi morenici e Cartografia I.G.M. 3) Capello; 4) Archi morenici; 5) Capello, Lesca; 6-7) Cerutti.

Per il ghiacciaio del Miage risulta difficile e incerto precisare le variazioni dato l'enorme accumulo di materiale detritico che lo ricopre. Tuttavia lo studio degli archi morenici più esterni ci permette di individuare a quota 1600 la posizione raggiunta dalla fronte nella massima espansione (1818-1820). Pertanto la lunghezza dell'apparato risultava essere allora di circa 11.000 metri.

Al rilevamento aereofotogrammetrico del 1975 la quota più bassa del ghiacciaio è di 1720 m e la lunghezza massima di 10.350.

L'intera superficie glacializzata del versante italiano del Monte Bianco risulta nel 1929 di 4670 ettari (Cartografia I.G.M.); nel 1953, 4175 (De Gemini), nel 1975, 4670. (Secchieri)

ROBERTO AJASSA

Comitato Glaciologico Italiano

Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Torino

## IL NUOVO CATASTO DEI GHIACCIAI ITALIANI: CONFRONTO CON IL CATASTO DEL 1958

### 1 - Introduzione

I 2,8 milioni di km<sup>3</sup> di ghiaccio esistenti attualmente sulla terra, sono oggetto di importanti studi ai fini della tutela e conservazione della risorsa "acqua", in quanto riserva strategica per l'umanità di acqua dolce e per ora immuni da gravi processi di inquinamento.

Lo studio dei ghiacciai si rivela molto importante se pensiamo che complessivamente essi costituiscono oltre il 70% di tutte le riserve di acqua dolce disponibili, comprese quelle sotterranee, pur rappresentando solo il 2% circa dell'intera massa d'acqua del nostro pianeta (per il 96% circa contenuta negli oceani e nei mari interni).

Un secondo motivo di interesse, non in ordine di importanza, è quello scientifico: recenti ricerche attribuiscono un ruolo molto importante ai ghiacciai, i quali concorrerebbero alle grandi modificazioni climatiche planetarie (Global Change). I ghiacciai, estesi complessivamente sul 10% delle terre emerse, sono infatti in grado di influenzarne l'andamento climatico, in maniera più o meno evidente, sia a livello locale, sia a scala planetaria, con le loro cicliche variazioni di volume ed estensione. Tale condizionamento è connesso all'influenza che le grandi masse glacializzate esercitano sulle correnti marine e queste sulla circolazione atmosferica, sulla temperatura, sulle precipitazioni e sull'albedo.

Contemporaneamente sono attendibili indicatori della dinamica climatica in atto, nonché fedeli registratori delle variazioni climatiche

avvenute nel Quaternario, quando si sono succedute diverse fasi di espansione e di riduzione (glaciazioni pleistoceniche).

Mentre la problematica del Global Change investe quasi esclusivamente le due grandi calotte glaciali continentali dell'Antartide e della Groenlandia, dove si concentra oltre il 95% delle masse glacializzate della terra, molti altri motivi di discussione e di ricerca investono i ghiacciai minori. La dinamica dei piccoli ghiacciai, tra cui quelli alpini, è stata quindi oggetto di studio a partire dagli anni cinquanta per l'importanza che questi rivestono per la produzione di energia elettrica, per lo sviluppo delle attività turistico-ricreative e sportive, per il carattere di risorsa ambientale e di riserva idrica, oltre che dal punto di vista geografico-fisico.

In particolare proprio l'uso "plurimo" delle acque di fusione delle nevi e dei ghiacciai, insieme all'interesse scientifico ed ambientale, ha indotto i grandi utilizzatori e la comunità scientifica a sviluppare diversi programmi di ricerca e di monitoraggio sui principali corpi glaciali, soprattutto quelli sfruttati per l'alimentazione dei numerosi invasi artificiali utilizzati per fini idro-potabili, irrigui ed idroelettrici, presenti in tutto l'arco alpino.

Non va dimenticato, in ultimo, l'interesse che la glaciologia riveste nello studio della morfogenesi di ambiente glaciale, cioè nello studio delle forme della superficie terrestre originatesi per il modellamento dei ghiacciai. Questi infatti, con il loro movimento, lasciano tracce molto chiare della loro presenza, sia attraverso il processo erosivo (esarazione) sia quello deposizionale: proprio attraverso lo studio delle forme attuali e dei processi che le producono è possibile comprendere gli eventi verificatisi nel passato, le cui testimonianze sono assai evidenti nelle tipiche morfologie glaciali che caratterizzano il paesaggio alpino (valli ad "U", valli sospese, soglie, circhi, rocce montonate, cordoni morenici, ecc.).

Tra le tracce del passato bisogna ricordare anche quelle situate in zone piuttosto distanti da aree attualmente glacializzate, ad esem-

pio gli estesi apparati morenici planiziali che bordano il margine alpino della Pianura Padana, che si sono formati nel corso del Quaternario, quando i ghiacciai, come detto più sopra, a più riprese si sono espansi su vaste aree dell'emisfero Boreale, ed hanno formato una calotta ricoprente il 30 % dell'intera superficie emersa (fase di massima espansione).

In questo contesto si collocano gli studi condotti a partire dai primi decenni del secolo sui principali ghiacciai del versante alpino italiano, sia nell'ambito del Comitato Glaciologico Italiano, che di altri Enti di ricerca pubblici e privati, dei quali il Catasto in allestimento non è che una naturale continuazione. Esso rappresenta infatti un aggiornamento del lavoro svolto negli anni cinquanta da diversi ricercatori sotto la guida del Professor Ardito Desio e pubblicato nel 1961 dal C.G.I.

Tra questi studi va ricordata l'annuale Campagna Glaciologica, mediante la quale siamo oggi in possesso di una delle più lunghe serie d'osservazione del mondo dei movimenti delle fronti glaciali, l'atlante dei ghiacciai di G. PORRO (1925), il primo Catasto, già menzionato, realizzato nel 1957-58, quello predisposto per il World Glacier Inventory e riguardante la situazione del 1975, e i numerosi studi a carattere nivologico e glaciologico.

Nel *VI Convegno Glaciologico Italiano*, organizzato nel 1991 a Gressoney dal Comitato Glaciologico, è stato fatto il punto sull'attuale stato della ricerca in questo settore di studi ambientali. Nel corso delle celebrazioni per il *Centenario del CGI*, svoltesi a Torino nell'ottobre 1985, sono stati illustrati gli sviluppi più recenti e le prospettive di tale ricerca.

Un contributo fondamentale alla conoscenza attuale dei corpi glaciali è stato dato negli ultimi anni dalle ricerche promosse dal Ministero dell'Ambiente ed effettuate dal Comitato Glaciologico Italiano, rivolte, tramite fotointerpretazione, alla redazione di un nuovo catasto.

L'attività è stata sviluppata nel biennio '93 - '94, con finanziamenti erogati dal Ministero dell'Ambiente, a cui è rivolto un sentito ringraziamento, mediante convenzione col CGI.

I dati e le informazioni contenuti nella presente comunicazione sono tratti da note e relazioni prodotte nell'ambito del Programma di ricerca citato e riportate in bibliografia.

## 2 - La ricerca

Sono stati presi in considerazione i ghiacciai italiani, localizzati tutti sulle Alpi, con la sola eccezione del Calderone, sito sul Massiccio del Gran Sasso nell'Appennino Centrale.

Il lavoro si è articolato in più fasi:

- individuazione e perimetrazione (rilevamento) dei corpi glaciali esistenti, per fotointerpretazione del "Volo Italia '88/'89";
- trasposizione su supporto informatico delle informazioni cartografiche;
- elaborazione dei dati;
- confronto tra i dati relativi al rilevamento (Catasto '89) e dati del Catasto '58.

Il lavoro si è sviluppato a partire dall'analisi dei dati disponibili, dell'ampia bibliografia argomento, patrimonio quasi secolare del CGI, e della moltitudine di studi specifici che vari Autori hanno prodotto nel tempo.

La scelta del Catasto 1958 come base di riferimento è stata, per certi versi, obbligata, in quanto quest'opera, oltre ad essere il documento più "vecchio" relativo a tutto l'arco alpino, costituisce l'unico riferimento organico utilizzabile come "indice" per gli scopi prefissati. Il Catasto Internazionale dei Ghiacciai, (World Glaciers Inventory) realizzato alla fine degli anni settanta e pubblicato nel 1985, è stato utilizzato come documento di verifica e controllo.

La fotointerpretazione è stata realizzata con l'ausilio del DVP (Digital Video Plotter), strumentazione che ha permesso il posizionamento dei corpi glaciali individuati e perimetrati direttamente su supporto magnetico. Si è così potuto costruire un archivio informatizzato e georeferenziato di ghiacciai (Biasini e Salvatore; 1993), che sono stati codificati con la stessa numerazione del "vecchio" catasto.

Il "Volo Italia '88-'89", utilizzato per la fotointerpretazione, è una sequenza di fotogrammi stereoscopici del territorio nazionale, effettuata con pellicole pancromatiche in scala nominale 1:70.000 (Biasini e Salvatore; 1993). Questa levata fotografica, effettuata nei mesi di luglio e agosto, si è rivelata particolarmente idonea agli scopi preposti, in quanto lo scarsissimo innevamento dell'arco alpino in quel periodo assicura la possibilità di delimitare con ottima approssimazione (circa 50 cm, Biasini; 1991) i contorni dei corpi oggetto della ricerca.

Per consentire il confronto tra i dati del Catasto '58 e del Catasto '89, i ghiacciai sono stati suddivisi in tre gruppi.

- Tipo (A), estinti: sono quei ghiacciai di cui si ha solo più documentazione storica. Questa tipologia, pur segnalata nelle tabelle, non viene presa in considerazione nelle analisi che verranno proposte;

- Tipo (B), con superficie < 5 ha. Definiti glacionevati in base alla classificazione internazionale del WGI, non sono stati sommati ai ghiacciai veri e propri (tipo C) né come numero né come superficie. Sono stati utilizzati per chiarire la tendenza evolutiva generale delle masse glacializzate. L'utilizzo è avvenuto attraverso il paragone con i corpi analoghi del catasto 1958;

- Tipo (C), con superficie > 5 ha sono quei ghiacciai la cui area risponde alle caratteristiche di corpo glaciale secondo i canoni WGI sui quali verranno compiute le analisi. A questi corpi vanno riferite le misure di estensione (Area Totale). (Per una valutazione più approfondita, e aderente ai criteri internazionali assunti in sede AIEA, si è ritenuto di prendere in considerazione solo i ghiacciai superiori ai 5 ha, in modo

da escludere corpi che in linea di massima sono costituiti da glacionevati, privi di movimento interno del ghiaccio).

### 3 - Il catasto 1958

In occasione dell'Anno Geofisico Internazionale, il CGI, con il patrocinio del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), censiva tutti i corpi glaciali esistenti nell'anno 1957-1958, realizzando il primo "Catasto dei ghiacciai italiani". L'attività di organizzazione e direzione del rilevamento fu svolta da una Commissione costituita dai Professori Manfredo Vanni, Giuseppe Nangeroni e Giuseppe Morandini, responsabili rispettivamente dei Settori alpini Occidentale, Centrale ed Orientale, coordinati dallo stesso Nangeroni.

Tale catasto fu esteso a tutti gli elementi scomparsi nell'ultimo cinquantennio (risalendo quindi fino ai primi del 1900), dei quali era possibile riconoscere la localizzazione e le caratteristiche, sulla base di documentazione storica.

Il rilevamento fu in massima parte realizzato in modo tradizionale, cioè mediante sopralluoghi ed osservazioni dirette, con la compilazione di una scheda relativa a ciascun individuo glaciale censito. Il lavoro prese avvio dall'analisi dell'ampia bibliografia disponibile ed in particolare dall'*Elenco dei ghiacciai italiani*, importante opera (atlante) realizzato nel 1925 dal Gen. Carlo Porro. Di ciascun ghiacciaio fu inoltre raccolta un'ampia documentazione fotografica, alla quale collaborarono attivamente molti soci del CAI.

Il documento è stato pubblicato in tre volumi (uno per settore alpino: occidentale, centrale e orientale) comprendenti: l'elenco dei ghiacciai, una cartografia in scala 1:400.000, e le schede con le caratteristiche salienti dei diversi ghiacciai, complete dei riferimenti bibliografici disponibili.

Nel documento in oggetto sono stati indicati come *ghiacciaio* (o *vedretta* laddove questo termine era maggiormente in uso) tutte le masse glacializzate, con il toponimo che veniva loro tradizionalmente attribuito (gli stessi toponimi, oltre alla numerazione di riferimento, sono stati ripresi sia nel catasto del W.G.I., che nel catasto 1989).

A ciascun corpo glaciale è stato attribuito un numero progressivo. L'ordine di elencazione tiene conto essenzialmente del bacino idrografico e la progressione numerica inizia sempre dal versante destro idrografico di ogni valle. L'individuazione di alcuni nuovi ghiacciai, a numerazione già fissata, ha determinato l'esigenza di introdurre i doppi numeri, distinti con l'appendice "bis". Come cartografia di base fu utilizzata la carta IGM alla scala 1:25.000.

Complessivamente vennero censiti 1036 ghiacciai, 1035 nell'arco alpino, 1, il Calderone, nell'Appennino abruzzese (Gran Sasso).

Il totale dei corpi censiti comprende ovviamente i ghiacciai estinti ed esistenti nel 1958, nonché tra questi ultimi quelli di piccole dimensioni, inferiori ai 5 ha (tab. I).

Nell'Atlante del Porro erano segnalati 774 ghiacciai.

Nella tabella I si evidenzia la situazione globale dei ghiacciai al 1958, suddivisi nelle tre categorie precedenti e per gruppo montuoso.

Su 1036 corpi glaciali censiti, nel 1958 ben 201 unità (19.4 %) risultavano estinti, 90 (8.7 %) risultavano avere un'area inferiore a 5 ha (o non indicata) e 745 ghiacciai (71.9 %) un'estensione superiore ai 5 ha.

Solo su quest'ultimo gruppo (tipo C) si è compiuta una analisi dei dati areali, utilizzata in seguito per la comparazione con il nuovo catasto (anche se in modo indicativo a causa della scarsa confrontabilità del metodo di rilevamento e di misura).

L'incidenza dei ghiacciai di tipo A e B cresce progressivamente nei settori centrale ed orientale (Alpi Lepontine, Retiche p.p., Noriche, Dolomitiche e Giulie).

La maggiore concentrazione numerica e la maggior area glacializzata totale si ha nel gruppo delle Alpi Retiche, seguite dalle Graie, nelle quali però cresce in misura considerevole l'area media dei singoli ghiacciai. Con quantità percentuali inferiori all'unità rispetto al totale si distinguono le Alpi Marittime, Cozie e Giulie, a parte naturalmente il ghiacciaio Appenninico del Calderone.

La variabilità dimensionale è compresa, ovviamente tra un'area minima di 5 ha e i 2000 ha del Ghiacciaio dei Forni nelle Alpi Centrali, che è un ghiacciaio di tipo Himalaiano-alpino con tre confluenze.

Come si può osservare nella tabella II (ghiacciai osservati divisi per classi di estensione areale), i 90 ghiacciai di tipo B si estendono su una superficie complessiva di 250 ha; i 4 ghiacciai di maggiori dimensioni (> 1000 ha, Miage, Lys, Forni e Mondrone)) su una superficie di 5.400 ha. La maggioranza assoluta dei ghiacciai ha una superficie compresa tra 5 e 100 ha (74,5% del totale, pari al 31,5% della superficie glacializzata.).

#### 4 - Il catasto 1989

Come precedentemente accennato, la metodologia seguita per la redazione del nuovo catasto dei ghiacciai italiani è fondata sulla fotointerpretazione e restituzione, su supporto informatico, del volo Italia '88/'89. Tale procedura è stata espletata, con apposita strumentazione ottico digitale, disponibile presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma "La Sapienza". Come base cartografica è stata utilizzata la Cartografia Ufficiale IGMI a scala 1:25.000.

Tale metodologia ha comportato alcuni problemi. Tra questi si segnala quello delle occasionali difficoltà di perimetrazione dei corpi glaciali interessati da fenomeni di detritazione dei versanti, che, portando

alla formazione di ghiaccio coperto, rende talora difficoltosa la definizione esatta dei limiti del corpo glaciale stesso. Un secondo tipo di difficoltà si è riscontrato nel caso, peraltro limitato, di innevamento recente e di copertura nuvolosa. In tali casi si è provveduto ad integrare le informazioni mancanti attingendo ad altre fonti.

Le unità contigue, non differenziabili in modo sicuro su base morfologica, sono state considerate come un'unica entità.

Un limite della visione zenitale (e in genere di tutti i metodi di rilevamento indiretto) è rappresentato dall'impossibilità di poter valutare lo spessore del ghiaccio, il che ha portato a considerare (come del resto nel vecchio Catasto) solo misure areali e non volumetriche, queste ultime ottenibili solo con appositi rilevamenti in campo.

I corpi glaciali censiti nel catasto 1989 sono, in numero relativamente ridotto, *ghiacciai vallivi* (*alpini* ed *himalaiani secondo la vecchia classificazione*), come il Miage, il Lys ed il ghiacciaio dei Forni, presenti nei settori più interni della catena alpina; la maggior parte dei corpi sono classificati invece come *ghiacciai montani* (*pirenaici*), a bacino semplice, di circo, di nicchia, di falda, di canalone, ecc., e come glacionevati.

I corpi censiti, ai fini delle successive elaborazioni, sono stati elencati separatamente, secondo il raggruppamento prima indicato (ghiacciai di tipo B con superficie < 5 ha, corrispondenti, secondo il W.G.I., ai glacionevati, e ghiacciai di tipo C con superficie > 5 ha). Per analogia con quanto indicato nel Catasto 1958, sono stati inoltre conteggiati i ghiacciai di tipo A (estinti).

## **I risultati**

Il numero complessivo di ghiacciai censiti (tabella III) è di 1114 unità, compreso il Calderone, di cui il 28% estinti, il 9% con superficie

< 5 ha e il 63% con estensione > 5 ha (solo su quest'ultimo gruppo sarà effettuata una valutazione statistica della variabilità areale)<sup>1</sup>.

Nella tabella III si evidenzia la situazione globale dei ghiacciai, suddivisi per categoria e per gruppo montuoso.

I gruppi montuosi in cui si concentrano maggiormente i ghiacciai sono le Alpi Retiche (51% del totale) e le Alpi Graie (26%); i due gruppi tuttavia si differenziano in quanto nelle Alpi Graie il 77% dei corpi appartiene al tipo C (superficie > 5 ha) mentre nelle Retiche tale valore si riduce al 61%; l'estensione media delle unità, in questi due gruppi, è molto simile (71 e 69 ha rispettivamente).

Per quanto riguarda i ghiacciai di tipo A (estinti), si fa notare che nella tabella vengono conteggiati quelli riconosciuti come tali nel nuovo rilevamento, prendendo come riferimento il censimento completo del 1958. Poichè nel nuovo rilevamento alcuni ghiacciai precedentemente classificati estinti sono stati individuati (ghiacciai di tipo B), il numero totale dei ghiacciai effettivamente estinti a partire dal 1958, non coincide con la differenza tra il numero dei ghiacciai estinti nel 1989 e quello degli estinti nel 1958.

I corpi glaciali compresi tra 5 e 100 ha sono il 73%, nettamente prevalenti numericamente (tabella IV), rappresentano solo il 31% dell'intera superficie glacializzata. A titolo di curiosità si fa notare che i 90 ghiacciai di tipo B rappresentano solo lo 0,6% della superficie e ben il 12,5% del totale delle unità.

<sup>1</sup> La numerazione dei ghiacciai è stata effettuata secondo lo schema percedentemente adottato (catasto '58); tuttavia nella fase di fotointerpretazione è emerso che alcuni ghiacciai si sono suddivisi in più corpi di minori dimensioni. Ciò spiega l'aumento numerico delle unità censite nel nuovo Catasto. Tale aumento riguarda solo unità di dimensioni ridotte, per cui, ai fini delle valutazioni che verranno fatte sull'estensione, il loro peso è assolutamente trascurabile.

È inoltre necessario sottolineare che, in conseguenza dei limiti insiti nella fotointerpretazione esposti più sopra, non è stato possibile discriminare i confini di alcuni corpi glaciali adiacenti, e che in questa fase verranno trattati come un'unica entità.

Variations del numero dei ghiacciai per settore alpino tra il 1958 e il 1989

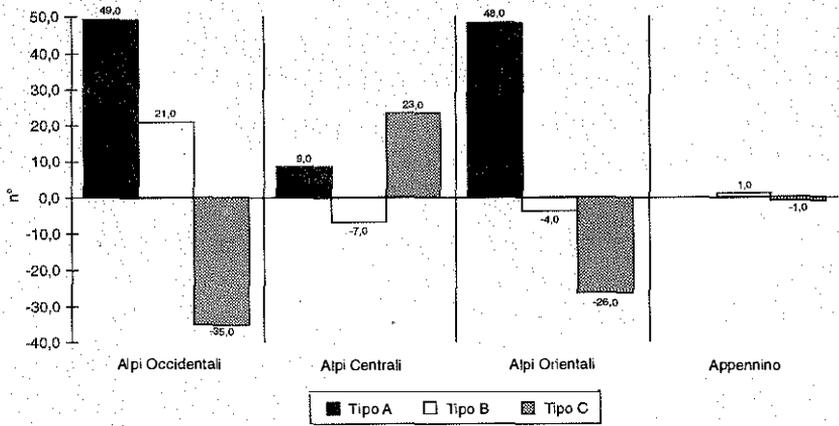


Fig. 1

Variatione della superficie complessiva dei ghiacciai di estensione > di 5 ha tra il 1958 e il 1989

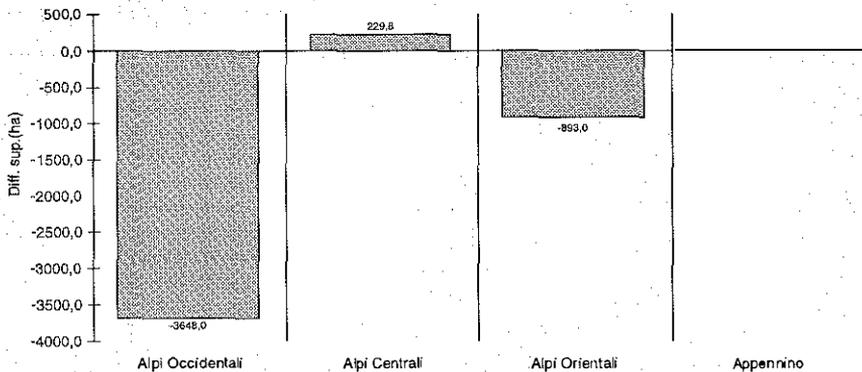


Fig. 2

## 5 - Confronto tra i dati del Catasto 1958 e del Catasto 1989.

In relazione alle differenze metodologiche e tecniche adottate nella redazione dei due catasti, il confronto sviluppato nel presente paragrafo tra i dati numerici (numero di ghiacciai) risulta valido in senso assoluto, mentre quello areale (misura delle superfici) mostra un maggior grado di incertezza.

I dati sintetici sui ghiacciai (numerici ed areali), come risultanti dai due Catasti considerati, raggruppati per settore alpino, sono riportati nelle tabelle V e VI.

Nella tabella successiva (tab. VII) sono evidenziate le differenze.

Il numero complessivo, rispetto al 1958, risulta aumentato (1114 unità) poichè alcuni corpi glaciali risultano essersi ricostituiti (allora erano indicati come "estinti"), altri derivano dallo smembramento di un unico corpo in due o più elementi, altri ancora costituiti da più elementi precedentemente censiti come un unico corpo.

La distribuzione geografica dei ghiacciai nel 1989 rispecchia quella del 1958.

Facendo esclusivo riferimento ai ghiacciai con superficie superiore a 5 ha, (tab. VI) i corpi glaciali attualmente censiti sono 706, con una diminuzione nell'intero arco alpino di 39 unità, rispetto ai 745 corpi censiti nel 1958.

La superficie glacializzata complessiva nel 1989 (tabella VI) è di 48.184 ha, dei quali il 42% nel settore alpino occidentale, il 34% in quello centrale e il 24% nell'orientale, rispetto ad una superficie di 52.501 ha censita nel 1958 (45% settore occidentale, 31% nel centrale e 24% nell'orientale). In termini percentuali la riduzione complessiva della superficie è pari all'8,2%.

L'unico settore che appare in crescita è quello centrale (tabella VII), sia per quanto concerne la superficie glacializzata totale, sia per il numero di ghiacciai di estensione maggiore di 5 ha. All'aumento rela-

tivo della copertura glaciale nel settore centrale (+ 2,7%, + 429,8 ha) corrisponde una diminuzione nel settore occidentale (- 15,4%, -3.648 ha) e nel settore orientale (-7,1%, - 893 ha). L'area del ghiacciaio appenninico è scesa sotto la soglia dei 5 ha.

Nelle figure 1 e 2 è rappresentata graficamente la variazione del numero di ghiacciai per settore alpino e per tipo, (fig. 1) e la variazione complessiva di estensione per settore (fig. 2).

L'analisi per classi di estensione effettuata sia sul numero dei corpi che sulla loro superficie è sintetizzata nella tabella VIII.

La diminuzione dei corpi glaciali rispetto al 1958 riguarda esclusivamente le classi di minor estensione (da 100 a 400 ha) mentre la diminuzione in superficie riguarda in generale tutte le classi: va sottolineato, in quest'ultimo caso, che a fronte di una generale riduzione delle aree, l'incremento in talune classi è riconducibile ad una diminuzione di elementi e di aree nelle classi di dimensione appena superiore.

Se il confronto è limitato ai ghiacciai di estensione superiore ai 100 ha, 129 elementi nel 1958, 115 nel 1989, la riduzione superficiale è minore. Per i ghiacciai più grandi (Mandrone, Miage, Lys, Rutor, ecc.) la variazione areale è piuttosto contenuta.

Le risultanze del catasto e le tendenze evolutive delle masse glacializzate delle Alpi italiane sono in parte confermate e in parte corrette dai risultati tratti nelle campagne glaciologiche più recenti e dagli studi specifici effettuati su alcuni dei ghiacciai più rappresentativi.

## 6 - Le campagne glaciologiche e i bilanci di massa: alcune considerazioni.

Le campagne glaciologiche ogni anno interessano circa il 20% dei corpi glacializzati esistenti, scelti fra quelli più indicativi, e consistono nella misura dell'avanzamento o del regresso delle fronti glaciali.

Nel 1987-88 nelle Alpi occidentali e centrali finisce la fase di limitata avanzata o di stazionarietà che era iniziata nel 1971, ed anche i ghiacciai più grandi e dotati di maggiore inerzia (Forni, Ventina, ecc.) incominciavano ad entrare in una fase di regressione particolarmente rapida (tab. IX).

Su tutto l'arco alpino essi risentono della diminuzione delle precipitazioni solide, ma soprattutto dell'aumento della temperatura, in vistoso incremento fin dal 1983. Anche nel periodo più recente i controlli effettuati, oltre che direttamente sul terreno, con il "remote sensing" confermano tale riduzione areale, in particolare nei ghiacciai di piccole dimensioni e nei glacionevati.

Conseguenza diretta di questa fase di ablazione eccezionale sono stati alcuni fenomeni di instabilità, tra cui ricordiamo lo svuotamento improvviso del lago proglaciale del Miage, il crollo improvviso di una parte consistente del Ghiacciaio Superiore di Coolidge (Monviso).

La fase di forte regresso raggiunse l'acme nel biennio 1990-91, e interessò sia i grandi corpi, sia i ghiacciai minori. Essa fu registrata in ugual misura sia dai ghiacciai che avevano conosciuto nell'intervallo 1971-86 un periodo di avanzata (registrata dal catasto del World Glacier Inventory), sia da quelli che invece avevano subito anche in quel periodo una fase di moderato ritiro.

Attualmente pare che le tendenze evolutive fra i diversi settori del versante alpino meridionale si stiano differenziando (tab. X).

Mentre le Alpi Orientali e Centrali sono ancora in netto arretramento, nel settore Occidentale la ritirata delle fronti si riduce, sia in percentuale dei corpi osservati, sia in intensità sulle singole lingue terminali. Alcuni ghiacciai registrano addirittura un lieve progresso. Altri ancora, come il Lys, pare stiano uscendo in ritardo dalla fase di forte regresso.

Nella tabella IX viene riportata a titolo esemplificativo la variazione frontale di alcuni ghiacciai campione, oggetto di regolari osservazioni e misure.

Il dato medio generale, relativo alla percentuale di ghiacciai in regresso dal 1987/88 al 1992/93, ricavato dalle rispettive campagne glaciologiche, è riportato nella tabella X.

Le Alpi Orientali continuano ad essere il settore in cui il ritiro è più vistoso. Anche in quest'area tuttavia è prevedibile una flessione: un indizio in tal senso è la percentuale dei ghiacciai in regresso, scesa per la prima volta dopo cinque anni al di sotto del 90%.

L'osservazione delle variazioni areali, caratteristiche di un bilancio eseguito da foto aerea, quella delle variazioni frontali, eseguita mediante il rilevamento diretto proprio della campagna glaciologica, non sono tuttavia da soli elementi che esauriscono le possibilità di capire a fondo la tendenza evolutiva delle masse glacializzate. A queste analisi si sono aggiunte quelle del bilancio di massa, cioè misurazione delle variazioni volumetriche, che, meglio delle oscillazioni areali o frontali, può verificare lo "stato di salute" dei ghiacciai ed essere usata per fini idrologici.

In generale, dalle misure effettuate, i bilanci di massa degli ultimi anni risultano fortemente deficitari; ovvero si è registrata una consistente riduzione volumetrica delle masse glaciali. La riduzione volumetrica dei grandi apparati è stata accompagnata dall'estinzione di non pochi ghiacciai minori. Alcune di queste misure sono state effettuate, realizzate con il contributo dell'ENEL e dell'Azienda Elettrica Municipale di Milano, sul ghiacciaio del Careser (Alpi Orientali, Gruppo del Cevedale), dove questo tipo di ricerca è stato avviato alla fine degli anni sessanta, sullo Sforzellina (Alpi Centrali, Alta Valtellina) e sul Lys (Alpi Occidentali, Gruppo del Monte Rosa), dove i dati si riferiscono solo ad anni recenti.

L'analisi sulla dinamica dei ghiacciai alpini del versante italiano sviluppata sulla base dei due Catasti, delle osservazioni relative alla variazione delle fronti (Campagne Glaciologiche sui ghiacciai campione), dei bilanci di massa e di studi più approfonditi sull'evoluzione complessiva di importanti ghiacciai (ghiacciai del Monte Bianco, del

Lys, delle Grandes Murailles, dell'Ortles-Cevedale) consente di proporre alcune considerazioni di carattere generale.

Il periodo di lieve espansione o di stazionarietà delle masse glaciali registrato negli anni '70 e prima metà degli anni '80, a cui è seguita una fase di rapido e consistente ritiro negli anni successivi, si inquadra nella generale fase di regresso che si è avviata all'inizio del secolo scorso, al termine della Piccola Età Glaciale.

In tale fase si sono infatti alternati momenti di parziale inversione di tendenza rispetto a quella prevalente sul lungo periodo, con periodi di forte accelerazione della fusione degli apparati glaciali, interrotti da periodi di parziale incremento dei ghiacciai.

La fase di marcato ritiro dei ghiacciai italiani registrata negli ultimi anni, come evidenziato più sopra, è correlabile con la riduzione delle precipitazioni nevose ed al modesto ma costante aumento delle temperature. Attualmente la tendenza al rapido forte ritiro dei ghiacciai pare essersi attenuato, in modo più evidente nel Settore Alpino Occidentale, anche se non è possibile parlare di inversione di tendenza. Lo stato di precarietà dei ghiacciai non va comunque considerato come terminato, in particolare nei piccoli apparati, i più esposti a variazioni irreversibili.

BIBLIOGRAFIA

- R. AJASSA e G. BRANCUCCI (1993) - *Nuovo catasto dei ghiacciai italiani*. C.G.I., Torino.
- R. AJASSA, A. BIASINI, G. BRANCUCCI, C. CAPUTO, F. PUGLIESE, M.C. SALVATORE (1993) - *Il Catasto dei Ghiacciai Italiani: primo confronto tra i dati del 1958 e 1989*. Atti Conv. "Una nuova geologia per l'ambiente", Genova - Giugno 1993.
- R. AJASSA, A. BIANCOTTI, A. BIASINI, G. BRANCUCCI, C. CAPUTO, F. PUGLIESE, M.C. SALVATORE (1993) - *Italian Glacier Changes during the past thirty years*. 3rd International Geomorphology Conference. Hamilton - Agosto 1993.
- R. AJASSA, A. BIANCOTTI, G. BRANCUCCI, L. MOTTA, M. MOTTA e E. SATTA (1994) - *Nuove ricerche sui ghiacciai italiani*. Atti Acc. Sc. Tor, 128 (5-6). 147-156.
- S. BELLONI, M. PELFINI, C. SMIRAGLIA (1993) - *I ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedle, settore lombardo. Consistenza e variazioni recenti*. C.G.I., Torino.
- A. BIASINI (1991) - *Caratteristiche e impieghi delle fotografie aeree da alta quota dell'Italia*, Atti del IV Workshop del Progetto Strategico C.N.R. "Clima, ambiente e territorio nel Mezzogiorno", Potenza, 26/29/11/1990
- A. BIASINI e M.C. SALVATORE (1993) - *Fotogrammetria digitale e cartografia glaciologica*. (in stampa)
- S. BELLONI (1992) - *Oscillazioni in atto nei ghiacciai italiani e clima*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 43-57.
- BOLLETTINO DEL COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO - *Relazioni glaciologiche degli anni 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993*, pubblicate in Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., sui numeri 11(2), 12(2), 13(2), 14(2), 15(1 e 2), 16(2), 17(2), Torino.
- A. V. CERUTTI (1992) - *L'espansione dei ghiacciai italiani nel Monte Bianco fra il 1962 ed il 1989*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 67-74.
- A. V. CERUTTI (1993) - *Clima e ghiacciai sul versante italiano del Gruppo del Monte Bianco*. C.G.I., Torino.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1961) - *Catasto dei ghiacciai italiani*. 4 voll., C.G.I., Torino.
- F. DUTTO e G. MORTARA (1992) - *Rischi connessi con la dinamica glaciale nelle Alpi Italiane*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 85-100.

- L. MOTTA e M. MOTTA (1993) - *Il Ghiacciaio del Lys e le sue variazioni storiche*. C.G.I., Torino.
- M. MOTTA (1993) - *Relazione 1993 sulle ricerche in atto sui ghiacciai italiani del Monte Rosa*. E.N.E.L., Torino.
- S. PALMIERI, A. SIANI e A. D'AGOSTINO (1992) - *Tendenze evolutive della temperatura e delle piogge in Italia negli ultimi 100 anni con osservazioni su una serie storica di precipitazioni nevose*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 135-142.
- M. PELFINI e C. SMIRAGLIA (1992) - *Alcune serie secolari di variazioni frontali dei ghiacciai delle Alpi Lombarde*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 143-147.
- R. SERANDREI BARBERO, R. RABAGLIATI, C. ATTARDI, A. DELLA VENTURA e A. RAMPINI (1992) - *Variazioni biennali di superficie dei ghiacciai delle Alpi Breonie, Aurine e Pusteresi nei dati LANDSAT TM del 13 Settembre 1987*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 177-188.
- SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO - C.A.I. MILANO (1992) - *Ghiacciai in Lombardia*. Ed. Bolis, Milano.
- C. SMIRAGLIA (1992) - *Sviluppi recenti e prospettive della ricerca glaciologica in Italia*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 189-194.
- C. SMIRAGLIA (1993) - *Il Ghiacciaio del Calderone (Appennino Centrale). Sue caratteristiche e dinamica recente*. C.G.I. Torino.
- G. ZANON (1985) - *L'attuale tendenza evolutiva dei ghiacciai delle Alpi italiane*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 8(2), 89-97.
- G. ZANON (1992) - *Venticinque anni di bilancio di massa del Ghiacciaio del Careser (Alpi Centrali), 1966-67/1990-91*. Geog. Fis. Din. Quat. - Boll. C.G.I., III s., 15, 215-220.G.
- G. ZANON (1993) - *I ghiacciai del versante trentino del Gruppo Ortles-Cevedale (Valle di Pejo e di Rabbi)*. C.G.I., Torino.

Ghiacciai	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Totale	Area totale	% AREA
<b>Gruppo Montuoso</b>						
Marittime	3		7	10	105,00	0,20
Cozie	6	6	11	23	330,50	0,63
Graie	22	3	178	203	13658,20	26,11
Pennine	5	4	91	100	8387,00	16,04
Lepontine	7	2	25	34	1431,50	2,74
Retiche	127	56	353	533	25114,48	47,64
Noriche	7	8	49	64	2626,94	5,02
Dolomitiche	24	7	27	58	817,00	1,56
Giulie		4	3	7	25,00	0,05
Appennino			1	1	6,20	0,01
<b>TOTALI</b>	<b>201</b>	<b>90</b>	<b>745</b>	<b>1036</b>	<b>52501,82</b>	<b>100,00</b>
<b>%</b>	<b>19,4</b>	<b>8,7</b>	<b>71,9</b>	<b>100</b>		

tabella I - Situazione dei corpi glaciali risultante dal catasto 1958, suddivisi per tipo e per gruppo montuoso.

Classi	Numero	Freq. %	Area tot.	Area %
< 5	90,0	10,8	246,8	0,5
5-100	622,0	74,5	16598,3	31,5
100-200	66,0	7,9	8983,7	17,0
200-300	18,0	2,2	5220,7	9,9
300-400	20,0	2,4	6218,2	11,8
400-500	4,0	0,5	1681,0	3,2
500-600	4,0	0,5	3193,0	6,1
600-700	3,0	0,4	1221,0	2,3
700-800	2,0	0,2	2162,0	4,1
800-900	1,0	0,1	870,8	1,7
900-1000	1,0	0,1	953,0	1,8
> 1000	4,0	0,5	5400,2	10,2
<b>TOTALI</b>	<b>835,0</b>	<b>100,0</b>	<b>52748,7</b>	<b>100,0</b>

tabella II - Catasto 1958: distribuzione dei corpi glaciali, (numero ed area) per classi di estensione areale.

Gruppo Montuoso	tipo A	tipo B	tipo C	totale	Area totale	% AREA
Marittime	5	4	1	10	8,5	0,0
Cozie	13	6	5	24	67,3	0,1
Graie	35	18	175	228	12496,3	25,9
Pennine	30	6	71	107	6598,4	13,7
Lepontine	9	2	25	36	1067,9	2,2
Retiche	161	57	354	572	24433,5	50,7
Noriche	37	2	53	92	2961,0	6,1
Dolomitiche	14	4	19	37	532,4	1,1
Giulie	3	1	3	7	19,0	0,0
Appennino		1		1		
TOTALI	307	101	706	1114	48184,4	100,0
%	27,6	9,0	63,4	100,0		

tabella III - Situazione dei corpi glaciali risultante dal catasto 1989, suddivisi per tipo e per gruppo montuoso.

Classi	Numero	Freq. %	Area tot.	Area %
< 5	101,0	12,5	314,2	0,6
5-100	591,0	73,2	14997,6	30,9
100-200	59,0	7,3	8191,5	16,9
200-300	18,0	2,2	4282,6	8,8
300-400	13,0	1,6	4449,8	9,2
400-500	9,0	1,1	3883,6	8,0
500-600	5,0	0,6	2741,2	5,7
600-700	3,0	0,4	1939,6	4,0
700-800	3,0	0,4	2234,1	4,6
800-900	0,0	0,0	0,0	0,0
900-1000	1,0	0,1	936,5	1,9
> 1000	4,0	0,5	4527,8	9,3
TOTALI	807,0	100	48498,5	100,0

tabella IV - Catasto 1989: distribuzione dei corpi glaciali, (numero ed area) per classi di estensione areale.

CATASTO 58	Tipo A	Tipo B	Tipo C	TOTALI	Area totale	% AREA
Alpi Occidentali	41	15	307	363	23755,7	45,2
Alpi Centrali	108	35	220	363	16099	30,7
Alpi Orientali	52	40	217	309	12640,8	24,1
Appennino			1	1	6,2	0,0
TOTALI	201	90	745	1036	52501,8	100
%	19,4	8,7	71,9	100		

CATASTO 89	Tipo A	Tipo B	Tipo C	TOTALI	Area totale	% AREA
Alpi Occidentali	90	36	272	398	20107,7	41,7
Alpi Centrali	117	28	243	388	16328,8	33,9
Alpi Orientali	100	36	191	327	11747,8	24,4
Appennino		1		1		
TOTALI	307	101	706	1114	48184,3	100,0
%	27,6	9	63,4	100		

tabella VI - Situazione dei corpi glaciali risultante dal catasto 1989.

Diff. 58-89	Tipo A	Tipo B	Tipo C	TOTALI	diff. area	diff. %
Alpi Occidentali	49,0	21,0	-35,0	35,0	-3648,0	-15,4
Alpi Centrali	9,0	-7,0	23,0	25,0	229,8	1,4
Alpi Orientali	48,0	-4,0	-26,0	18,0	-893,0	-7,1
Appennino		1,0	-1,0	0,0		
TOTALI	106,0	11,0	-39,0	78,0	-4311,2	-8,2

tabella VII - Differenze tra il Catasto 1989 e il Catasto 1958.

Classi	Num. 58	Num. 89	Diff. 58-89	Aree 58	Aree 89	Diff. Area
< 5	90	101	11			
5-100	622	591	-31	16598,3	14997,6	-1600,7
100-200	66	59	-7	8983,7	8191,5	-792,2
200-300	18	18	0	5220,7	4282,6	-938,1
300-400	20	13	-7	6218,2	4449,8	-1768,4
400-500	4	9	5	1681,0	3883,6	2202,6
500-600	4	5	1	3193,0	2741,2	-451,8
600-700	3	3	0	1221,0	1939,6	718,6
700-800	2	3	1	2162,0	2234,1	72,1
800-900	1	0	-1	870,8	0,0	-870,8
900-1000	1	1	0	953,0	936,5	-16,5
> 1000	4	4	0	5400,2	4527,8	-872,4
TOTALI	835	807		52501,9	48184,3	4317,6

tabella VIII - Differenze dei corpi glaciali (numero e area) per classi di estensione tra il Catasto 1989 e il Catasto 1958.

Ghiacciaio	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92	92-93
<i>Alpi Occidentali</i>						
Settentr. di Hohnsand	7,5	-4	-15	-5	-7,5	1
Lys	-12,5	-8	-11	3	-11	-7
Toules	0,5	3	-9	-14,5	-12	-2
Rutor	1	-2	-0,5	-10,5	-7	-1
<i>Alpi Centrali</i>						
Orientale di Dosdè	-15	-8	-11	-28	-15	-29
Cedèch	-1	-4	-10	-2,5	-9,5	-6
<i>Alpi Orientali</i>						
Vedretta Rossa	-3	-6	-2,5	-11	-4	-6
Cristallo	-13	-5	-4	0	-12	-8
Sup. dell'Antelao	-1	-2,5	-2,5	-3,5	-3,5	-2,5

tabella IX - Movimenti delle fronti in alcuni ghiacciai campione dei tre settori alpini, fra il 1987 ed il 1993.

Settore Alpino	87-88	88-89	89-90	90-91	91-92	92-93
Alpi Occidentali	40%	86%	90%	78%	90%	66%
Alpi Centrali	68%	71%	81%	74%	89%	86%
Alpi Orientali	94%	90%	90%	94%	93%	88%
Media	67%	82%	87%	86%	91%	80%

tabella X - Percentuale dei ghiacciai in regresso nei tre settori alpini.

CHIARA VANUZZO

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Via Emanuelli, Milano

## METODI E FINALITA' DELLA RICOSTRUZIONE DEL GLACIALISMO ANTICO

### 1 Introduzione

Scopo di questa relazione è quello di descrivere le finalità e alcuni dei metodi che possono essere utilizzati per ricostruire la storia dei ghiacciai alpini, nonché quello di presentare alcuni risultati preliminari raggiunti in una ricerca svolta studiando 143 ghiacciai della Valle d'Aosta.

I ghiacciai sono sempre stati uno degli elementi caratterizzanti il paesaggio alpino. Chiunque abbia osservato per più anni consecutivi lo stesso ghiacciaio avrà notato che si tratta di un corpo dinamico. Un ghiacciaio può infatti essere descritto come un sistema aperto, all'interno del quale si verificano il guadagno, l'accumulo, il trasferimento e la perdita di massa.

La fonte principale dell'accumulo è costituita dalle precipitazioni nevose, ma contribuiscono all'accumulo anche altri processi tra i quali le valanghe, l'acqua piovana che gela, la condensazione. L'ablazione include invece tutti i processi grazie ai quali il ghiacciaio perde neve e ghiaccio. I principali meccanismi attraverso i quali si realizza l'ablazione sono: la fusione, l'evaporazione e la rimozione di neve da parte del vento.

Il ghiacciaio trasferisce ogni anno dalla zona d'accumulo una quantità di massa sufficiente a compensare le perdite per ablazione; si tratta quindi di un equilibrio dinamico.

Quando un ghiacciaio si trova in equilibrio stazionario con l'ambiente e quindi con le condizioni climatiche, l'apporto di massa che si

verifica ogni anno è uguagliato dalla perdita di massa nella zona d'ablazione, il bilancio di massa sarà quindi uguale a zero. Se invece un ghiacciaio non viene più a trovarsi in equilibrio con le condizioni climatiche, se si verificano quindi variazioni nelle precipitazioni solide e nella temperatura media della stagione d'ablazione, si verificheranno delle modificazioni nel suo bilancio di massa, nella quota della Linea d'Equilibrio (Equilibrium Line Altitude - ELA) e quindi nel suo comportamento dinamico (fig. 1). Queste variazioni daranno luogo a modificazioni nella posizione della fronte, che sul terreno saranno leggibili in termini di evidenze geomorfologiche (depositi glaciali e forme di erosione).

La risposta di un ghiacciaio a variazioni climatiche non è istantanea, il ritardo è dell'ordine di  $10^2$  anni per i piccoli ghiacciai temperati, mentre anche di parecchie migliaia di anni per la calotta antartica e per quella groenlandese.

I ghiacciai possono quindi essere utilizzati per ricostruire la storia climatica, infatti dallo studio delle evidenze presenti sul territorio è possibile ricostruire la storia di un ghiacciaio e risalire alle diverse condizioni climatiche che hanno determinato un certo comportamento dinamico.

Per quanto riguarda invece lo studio delle cause climatiche, responsabili delle variazioni nel comportamento dinamico del ghiacciaio, va innanzitutto ricordato che il nostro sistema climatico è sempre stato caratterizzato da una variabilità più o meno accentuata. Attualmente la percezione che la sua instabilità possa essere dovuta anche all'intervento antropico ha reso ancora più attuale lo studio di tutti gli indicatori - tra i quali i ghiacciai - in grado di fornire indicazioni sulle condizioni del clima e sulle modificazioni in atto.

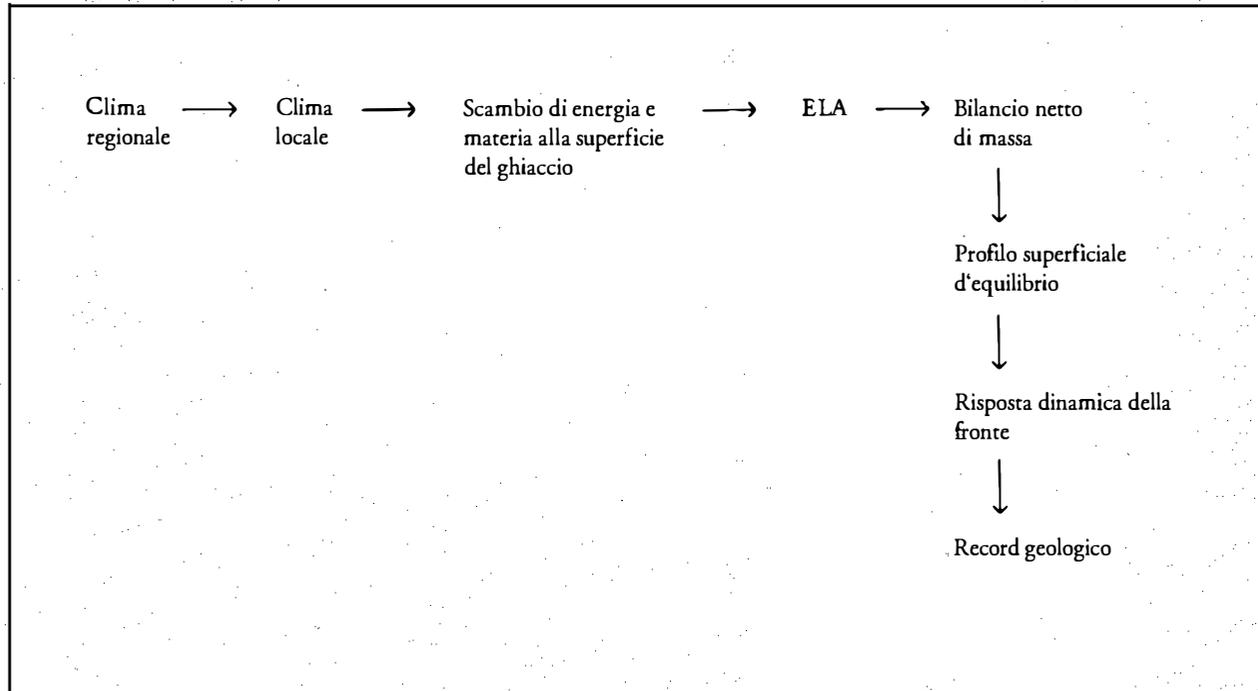


Fig. 1 - Relazioni esistenti tra un ghiacciaio, il clima e la risposta glaciale. Ridisegnato da Andrews (1975) e Porter (1981).

## 2 Finalità e metodi

Nella ricerca che viene presentata in questa relazione sono stati studiati 143 ghiacciai della Valle d'Aosta (fig. 2) e con maggior dettaglio i ghiacciai posti alla testata della Valpelline e della Valtournenche. L'intervallo di tempo considerato è quello che va dalla Piccola Età Glaciale alla seconda metà del XX secolo.

La Piccola Età Glaciale rappresenta una fase di espansione dei ghiacciai alpini sincrona su buona parte del pianeta, avvenuta in risposta a variazioni climatiche di limitata entità, ma registrate globalmente. Per parecchi ghiacciai localizzati sia nella regione alpina sia in altre aree dell'emisfero nord, questa avanzata è stata la maggiore nell'Olocene (Porter, 1981; 1986).

L'inizio della Piccola Età Glaciale, preceduta dal periodo caldo Medievale, può essere collocato tra il XIII e il XIV secolo A.D., il suo culmine va invece posto tra la metà del XVI e quella del XIX secolo (Grove, 1988).

Questo periodo è stato caratterizzato da un generale abbassamento della temperatura su buona parte del nostro pianeta, che ha avuto conseguenze importanti sia sull'ambiente che sulle condizioni di vita delle popolazioni interessate, in particolare quelle ubicate alle elevate latitudini e altitudini, dove esistono condizioni limite per la crescita delle piante e quindi per l'agricoltura. Per quanto riguarda l'arco alpino, esistono sia numerose testimonianze in forma di diari di viaggio, registri parrocchiali, rappresentazioni grafiche sia altrettanto numerosi dati provenienti da ricerche di terreno, volte alla ricostruzione e datazione delle avanzate glaciali nei secoli passati.

Come è già stato descritto nell'introduzione, lo studio della storia glaciale di una determinata zona permette di ricostruire le variazioni ambientali e climatiche di quella zona. Nella ricerca che

viene presentata in questa relazione, questo obiettivo primario è stato raggiunto attraverso quelli che potremmo definire dei sub-obiettivi e precisamente:

- calcolo della riduzione areale dei ghiacciai,
- calcolo della riduzione volumetrica dei ghiacciai,
- calcolo delle variazioni di quota della Linea d'Equilibrio.

I metodi utilizzati in questa ricerca sono stati:

- I - fotointerpretazione,
- II - indagini di terreno,
- III - documenti storici,
- IV - GIS.

## **I Fotointerpretazione**

Il metodo più immediato e semplice per ricostruire la massima estensione olocenica dei ghiacciai quello di individuare e mappare tramite fotointerpretazione i depositi glaciali ed in particolare le morene, relativi a questa fase di espansione. A tale scopo sono state utilizzate le foto aeree alla scala 1:15000.

In generale le morene attribuibili alla massima fase di espansione olocenica, che sulle nostre Alpi si è verificata durante la Piccola Età Glaciale, sono facilmente riconoscibili in foto aerea. Esse presentano la caratteristica forma a lama di coltello, con versanti a notevole pendenza (particolarmente quello interno). Sono generalmente caratterizzate dall'assenza di suolo o dalla presenza di un suolo poco sviluppato e le associazioni vegetali eventualmente presenti sono caratterizzate da specie pioniere.

## II Indagini di terreno

Tramite il lavoro di campagna è stato possibile verificare e definire con maggior dettaglio la massima estensione olocenica dei ghiacciai oggetto di questa ricerca. Gli strumenti di lavoro erano rappresentati da Carte Topografiche Regionali della Regione Autonoma Valle d'Aosta alla scala 1:10.000 e da ingrandimenti di foto aeree, che hanno permesso di verificare con dettaglio la fase di espansione della Piccola Età Glaciale.

Nell'immagine di fig. 3 è riportata l'imponente morena della Piccola Età Glaciale del Ghiacciaio di Cherillon in Valtournenche, in fig. 4 è invece visibile l'alta Valpelline ormai abbandonata dal ghiacciaio di Tsa de Tsan la cui fronte si è ritirata a quota 2560 m mentre nella Piccola Età Glaciale giungeva fino all'Alpe Gorgié (Vanni, 1939) a quota 2150 m. Sul versante destro è ben visibile una diversa colorazione, che indica una netta separazione tra la porzione inferiore del versante più chiara e con scarsa vegetazione, evidentemente coperto dal ghiacciaio nel secolo scorso e la parte superiore di colore più scuro e ben inerbita non interessata dall'azione del ghiaccio; questa linea permette di demarcare la massima quota raggiunta dal ghiacciaio nella Valle. In fig. 5 invece riportato il Ghiacciaio Des Grandes Murailles sempre in Valpelline che fino al 1960 confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de Tsan, in questa immagine è visibile in primo piano la morena laterale sinistra del Ghiacciaio di Tsa de Tsan e un po' più in alto la morena laterale destra del Ghiacciaio Des Grandes Murailles che ci permette di ricostruire l'estensione del ghiacciaio nel secolo scorso. Interessante la foto di fig. 6 gentilmente concessa dalla Collezione Q. Sella di Biella scattata tra la fine del 1800 e l'inizio del 1900 in cui è visibile la massa glaciale del Ghiacciaio Des Grandes Murailles che confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de Tsan a costituire il Basso Ghiacciaio di Tsa de Tsan.

### **III Documenti storici**

Della Piccola Età Glaciale esistono numerose testimonianze, sia in forma di scritti, diari di viaggio, registri parrocchiali, che di materiali iconografici, disegni, acquarelli, carte topografiche. L'utilizzo diretto di queste fonti o di articoli più recenti che di esse riferiscono, permette un'ulteriore verifica di quanto dedotto da foto aerea e sul terreno.

Va comunque ricordato che a volte antiche carte o disegni mancano di elementi topografici o sono troppo imprecisi per permettere una ricostruzione sufficientemente fedele della posizione del ghiacciaio.

Ricostruzione della topografia dei ghiacciai durante la Piccola Età Glaciale

Una volta definita la massima espansione olocenica, tramite l'utilizzo di tutti i metodi sopra citati, questa informazione è stata riportata sulle Carte Tecniche Regionali della Valle d'Aosta alla scala 1:10.000.

Si è poi proceduto per ciascun ghiacciaio alla ricostruzione della topografia della porzione inferiore, relativa alla massima estensione olocenica.

### **IV Sistemi Informativi Geografici**

Le informazioni cartografiche ottenute sono state informatizzate ed elaborate attraverso un GIS (Sistema Informativo Geografico). In questo modo sono stati ottenuti i dati relativi alle variazioni areali, volumetriche e di oscillazione della ELA.

Per poter trasferire le informazioni cartografiche al Sistema Operativo Intergraph, disponibile presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università degli Studi di Milano, sono

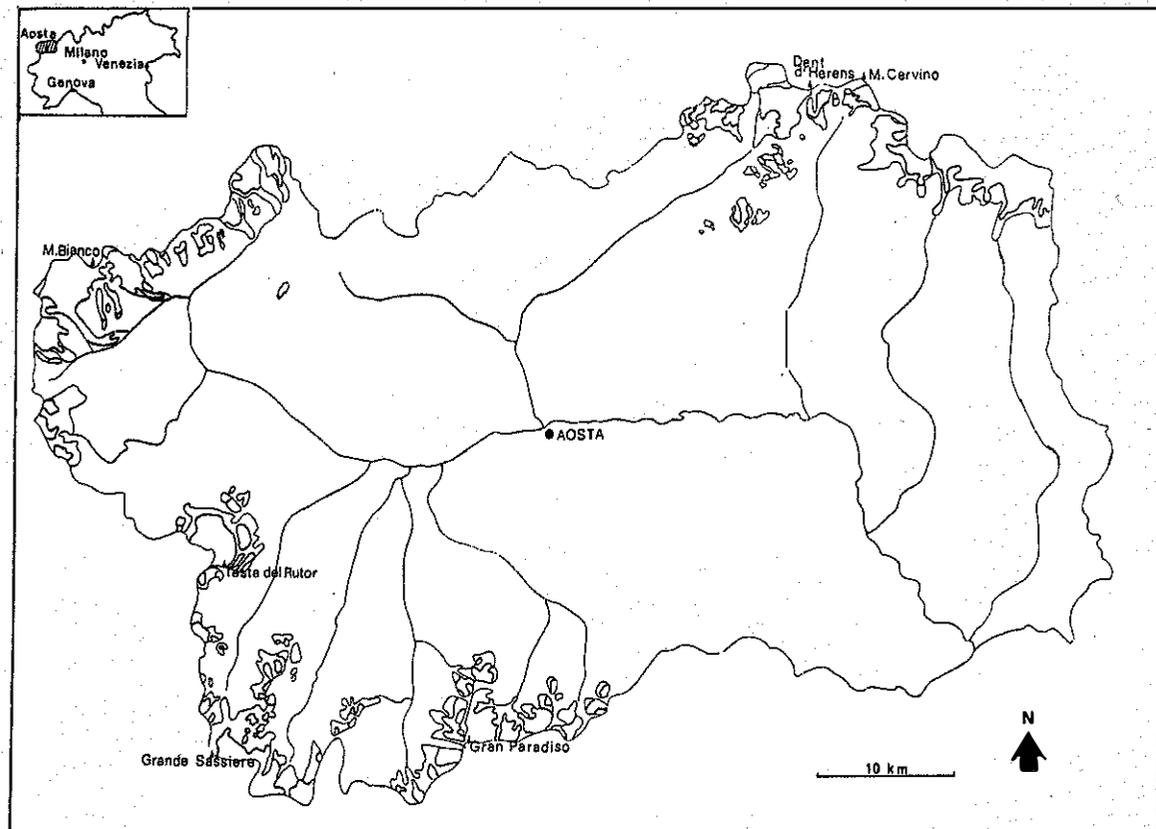


Fig. 2 - La Valle d'Aosta con i ghiacciai oggetto di questa ricerca. La linea spessa indica l'estensione dei ghiacciai nella seconda metà del XX secolo, la linea sottile la massima espansione raggiunta nella Piccola Età Glaciale.

stati riportati a china, su lucido indeformabile, i ghiacciai presenti su ciascuna carta topografica. I lucidi sono poi stati passati allo scanner, il risultato della lettura stato memorizzato in un file raster; successivamente è stata effettuata la vettorializzazione di ogni "file" raster ed infine la georeferenziazione di ogni "file".

In Ilwis è stata effettuata la poligonizzazione di ogni ghiacciaio, e successivamente ad ogni poligono compreso tra due curve di livello è stato attribuito un codice.

Al termine di questa operazione si è ottenuta una tabella di dati areali relativi ad ogni singola porzione di ghiacciaio compresa tra due successive curve di livello.

Questa tabella di dati areali è stata agevolmente gestita con semplici programmi di elaborazione statistica.

Sempre utilizzando Ilwis, disponendo della topografia attuale di ciascun ghiacciaio e di quella relativa alla Piccola Età Glaciale, è stata calcolata la differenza di volume di ghiaccio esistente tra la Piccola Età Glaciale e la situazione attuale. Ovviamente è stato possibile ottenere solo una informazione relativa alla differenza dei volumi poiché non si possiedono informazioni relative al substrato roccioso dei ghiacciai, che non ci permettono quindi di valutare il volume effettivamente occupato dai ghiacciai stessi.

### 3 Calcolo della Linea d'Equilibrio

La Linea d'Equilibrio di un ghiacciaio separa la zona d'accumulo da quella d'ablazione, in corrispondenza di tale linea quindi il bilancio di massa risulta uguale a zero.

L'altitudine a cui è localizzata tale linea è condizionata dalle precipitazioni nevose e dalla temperatura della stagione di ablazione.

Le oscillazioni di quota della Linea d'Equilibrio avvengono in

risposta alle variazioni del bilancio di massa di un ghiacciaio, che sono a loro volta funzione di variazioni meteorologiche (precipitazioni nevose e temperature estive).

Le condizioni climatiche esistenti in corrispondenza della ELA sono considerate quelle minime sufficienti per permettere l'esistenza dei ghiacciai, per questo motivo la conoscenza di tali condizioni è essenziale per comprendere le relazioni tra le variazioni climatiche e le oscillazioni glaciali. (Ohmura *et al.*, 1992).

Il metodo migliore per determinare la quota della Linea d'Equilibrio (ELA) attuale è quello di calcolare il bilancio di massa del ghiacciaio e individuare l'isoipsa in corrispondenza della quale tale bilancio risulta uguale a zero.

Tuttavia attualmente sono ancora pochi i ghiacciai per i quali sono disponibili dati sul bilancio di massa, e quindi sia per il calcolo della ELA attuale che per la sua ricostruzione nel passato, vengono utilizzati metodi indiretti. Quello che generalmente viene utilizzato è il metodo AAR. Questo metodo utilizza il rapporto tra l'area d'accumulo e l'area totale di un ghiacciaio che, per i ghiacciai alpini alle attuali condizioni climatiche, risulta essere uguale a 0.67 ( $AAR = \text{Accumulation Area Ratio} = A_{acc}/A_{tot} = 0.67$ ) (Braithwaite & Muller 1980).

Quindi anche per la realizzazione di questa ricerca per il calcolo della quota della Linea d'Equilibrio sia attuale sia relativa alla Piccola Età Glaciale è stato utilizzato il metodo AAR.

## 4 Risultati

### 4.1 Riduzione areale e volumetrica

I risultati ottenuti al termine delle indagini hanno evidenziato che i 143 ghiacciai studiati hanno subito un ritiro areale dalla Piccola Età Gla-

ciale ad oggi del 41,5%, si è infatti passati da una superficie complessiva di 270,6 km<sup>2</sup> durante la massima fase di espansione della Piccola Età Glaciale ai 158,4 km<sup>2</sup> attuali, con un ritiro complessivo di 112,2 km<sup>2</sup>.

Nell'istogramma di fig. 7 è riportato l'andamento della riduzione areale dei ghiacciai nei diversi gruppi montuosi della Valle d'Aosta.

La massima entità di ritiro si è avuta nel Gruppo del Grande Sassièrè con un valore pari al 56%, si passa poi al Gran Paradiso con un ritiro percentuale del 47%, al gruppo Cervino-Rosa con il 44%, al Rutor con il 39%, al gruppo del Dent d'Hérens con il 38% per giungere infine al Monte Bianco dove si è osservato il minimo valore di ritiro areale pari al 29%.

Per quanto riguarda nello specifico i ghiacciai posti alla Testata della Valpelline e della Valtournenche (fig. 8), i primi (Mont Braoule, Tsa de Tsan, Grandes Murailles, Petites Murailles, Château des Dames, Bella Tza, Solatset) hanno subito un ritiro complessivo del 29,21%, l'area glacializzata infatti è passata dai 20,13 km<sup>2</sup> durante la Piccola Età Glaciale ai 14,25 km<sup>2</sup> attuali, subendo una riduzione di 5,88 km<sup>2</sup>. I ghiacciai della Valtournenche (Mont Tabel, Cherillon, Alto del Leone, Basso del Leone, Pic Tyndall, Cervino, Forca, Teodulo, Valtournenche, Gran Sometta), hanno invece subito un ritiro complessivo maggiore rispetto dei ghiacciai della Valpelline. Complessivamente i 10 ghiacciai studiati ricoprivano nella massima fase di espansione della Piccola Età Glaciale un'area pari a 14,78 km<sup>2</sup>, mentre attualmente tale area si è ridotta a 5,88 km<sup>2</sup> con una riduzione quindi di 8,9 km<sup>2</sup> pari al 60,21%.

I ghiacciai che qui hanno maggiormente contribuito al ritiro sia in termini assoluti che in valore percentuale sono quelli di Valtournenche e del Teodulo. Questi due ghiacciai e quello della Gran Sometta, attualmente considerato estinto, durante la Piccola Età Glaciale costituivano un'unica ampia massa glaciale; anche oggi i due ghiacciai possono essere considerati come un unico corpo, anche se sono uniti solo nel bacino di accumulo e per una superficie assai limitata.



Fig. 3 - La morena ad andamento subcircolare della Piccola Età Glaciale del Ghiacciaio di Cherillon. In basso nella foto la morena di minori dimensioni della lingua sinistra, sempre del Ghiacciaio di Cherillon.



Fig. 4 - Alta Valpelline. Ben visibile sulla destra della foto il confine tra la la porzione superiore del versante vegetata e quella inferiore coperta da detriti ad indicare l'area occupata dal Ghiacciaio di Tsa de Tsan nella Piccola Età Glaciale.

In questo caso il controllo esercitato dalla topografia della porzione orientale della Conca di Cervinia, che si presenta a debole pendenza, è stato determinante nei confronti dell'entità del ritiro glaciale.

Per quanto riguarda invece la riduzione volumetrica dei 17 ghiacciai della Valpelline e della Valtournenche, essa risultata pari a  $0,35 \text{ km}^3$  di ghiaccio. E' importante ricordare a questo proposito che il valore di riduzione volumetrica è sicuramente sottostimato, poiché relativo essenzialmente alla perdita di volume nell'area di ablazione, infatti nella ricostruzione della topografia dei ghiacciai nella Piccola Età Glaciale si è ipotizzato che l'area d'accumulo sia rimasta invariata. Se ciò può essere vero per l'area, non lo è invece per quanto riguarda il volume; notevole infatti è la perdita di spessore che si è verificata nell'area di accumulo dei ghiacciai alpini.

#### **4.2 Variazioni di quota della Linea d'Equilibrio e brevi considerazioni paleoclimatiche**

Nella Piccola Età Glaciale la quota media della Linea d'Equilibrio, calcolata per i 143 studiati, era pari a  $2845 \pm 165 \text{ m}$  mentre la quota media attuale è di  $3015 \pm 197 \text{ m}$ .

I dati relativi alla risalita della ELA sono molto dispersi, la media di questi valori è pari a  $139 \pm 106 \text{ m}$ . Questo valore ha una deviazione standard molto elevata, ciò è dovuto alla grande variabilità delle modalità di ritiro dei ghiacciai e delle condizioni topografiche e di esposizione dei medesimi. Nello specifico si osserva che se si considerano solo i ghiacciai che nella fase di ritiro non si sono frazionati in tanti piccoli ghiacciai, ma hanno solo subito un ritiro frontale, si ottiene un valore di risalita della ELA pari a  $129 \pm 69 \text{ m}$ .

In Valpelline la quota media a cui era localizzata la Linea d'Equilibrio durante la Piccola Età Glaciale era  $2869 \pm 160 \text{ m}$ , mentre la

quota attuale è di  $3004 \pm 150$  m; l'oscillazione media della ELA risulta essere stata pari a  $135 \pm 63$  m.

Per quanto riguarda i ghiacciai dell'alta Valtournenche, la quota media della Linea d'Equilibrio nella Piccola Età Glaciale era pari a  $2923 \pm 152$  m, mentre quella attuale è di  $3132 \pm 154$  m, il valore medio di risalita della ELA è pari a  $209 \pm 80$ .

Poiché la ELA è funzione delle condizioni di temperatura e delle precipitazioni, il suo innalzamento di quota può in prima approssimazione dare informazioni sull'incremento di temperatura verificatosi nell'intervallo di tempo considerato.

Utilizzando il gradiente termico verticale medio annuo, il valore medio di risalita della ELA è stato trasformato in una variazione di temperatura, risultata pari a  $0,7^\circ\text{C}$ . Tale valore costituisce soltanto una prima approssimazione, poiché si deve assumere che il gradiente termico verticale medio annuo non sia variato e non si tiene conto dell'effetto dovuto alle precipitazioni, che viene comunque ritenuto secondario.

#### 4 Conclusioni

Lo studio dell'evoluzione dalla Piccola Età Glaciale ad oggi dei 143 ghiacciai studiati ha fornito ulteriori elementi per la comprensione della storia climatica e glaciale della Valle d'Aosta. I dati ottenuti hanno confermato il trend generale osservato su tutte le Alpi di una risalita della ELA, e una riduzione areale dei ghiacciai (Haerberli, 1995). La ricerca ha inoltre portato ulteriori evidenze della fase di riscaldamento globale, nella quale alla variabilità climatica naturale si sovrappone l'impatto antropico. Si ha quindi un'ulteriore conferma di come i ghiacciai siano degli strumenti essenziali per la ricostruzione della storia climatica passata, ma anche per il monitoraggio attuale del clima.



Fig. 5 - Il Ghiacciaio Des Grandes Murailles. In primo piano, in basso a sinistra, la morena laterale sinistra del Ghiacciaio di Tsa de T̄san, nel quale il Ghiacciaio Des Grandes Murailles confluiva fino al 1960. In secondo piano sempre sulla sinistra la morena laterale destra del Ghiacciaio Des Grandes Murailles.



Fig. 6 - Il Ghiacciaio Des Grandes Murailles tra la fine del 1800 e gli inizi del 1900, quando confluiva nel Ghiacciaio di Tsa de T̄san a formare il Basso Ghiacciaio di Tsa de T̄san (Collezione Q. Sella. Biella).

## BIBLIOGRAFIA

- Andrews J. T. (1975) - *Glacial Systems - an approach to glaciers and their environments*. Duxbury Press, Massachusetts.
- Braithwaite R. J. & Muller F. (1980) - *On the parametrization of glacier equilibrium line altitude*. Proceedings of the Riederlap Workshop, September 1978. IAHS - AISH Publ. 126, 263-271.
- Grove J. M. (1988) - *The Little Ice Age*. Methuen, London.
- Haerli W. (1995) - *Glacier Fluctuations and Climate Change Detection-Operational Elements of a Worldwide Monitoring Strategy*. World Meteorological Organization Bulletin, 44, n. 1.
- Ohmura A., Kasser P., Funk M. (1992) - *Climate at the equilibrium line of glaciers*. Journal of Glaciology, 38, n. 130, 397-411.
- Porter S. C. (1981) - *Glaciological evidence of Holocene climatic change*. In Wigley, T. M. L., Ingram, M. J., and Farmer, G. (eds), "Climate and History". Cambridge, Cambridge Univ. Press.
- Porter S. C. (1986) - *Pattern and Forcing of Northern Hemisphere Glacier Variations during the Last Millennium*. Quaternary Research, 26, 27-48.
- Vanni M. (1939) - *Il ghiacciaio di Tsa-de-Tsan in Valpelline*. Bollettino Comitato Glaciologico Italiano, 19, 61-97.

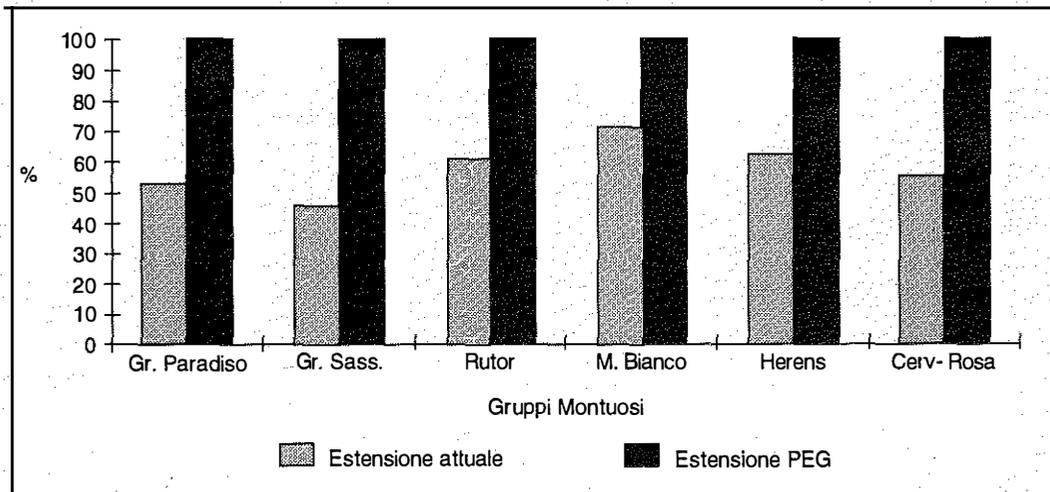


Fig. 7 - Istogramma dell'estensione areale attuale e nella Piccola Età Glaciale dei ghiacciai della Valle d'Aosta nei diversi Gruppi Montuosi.

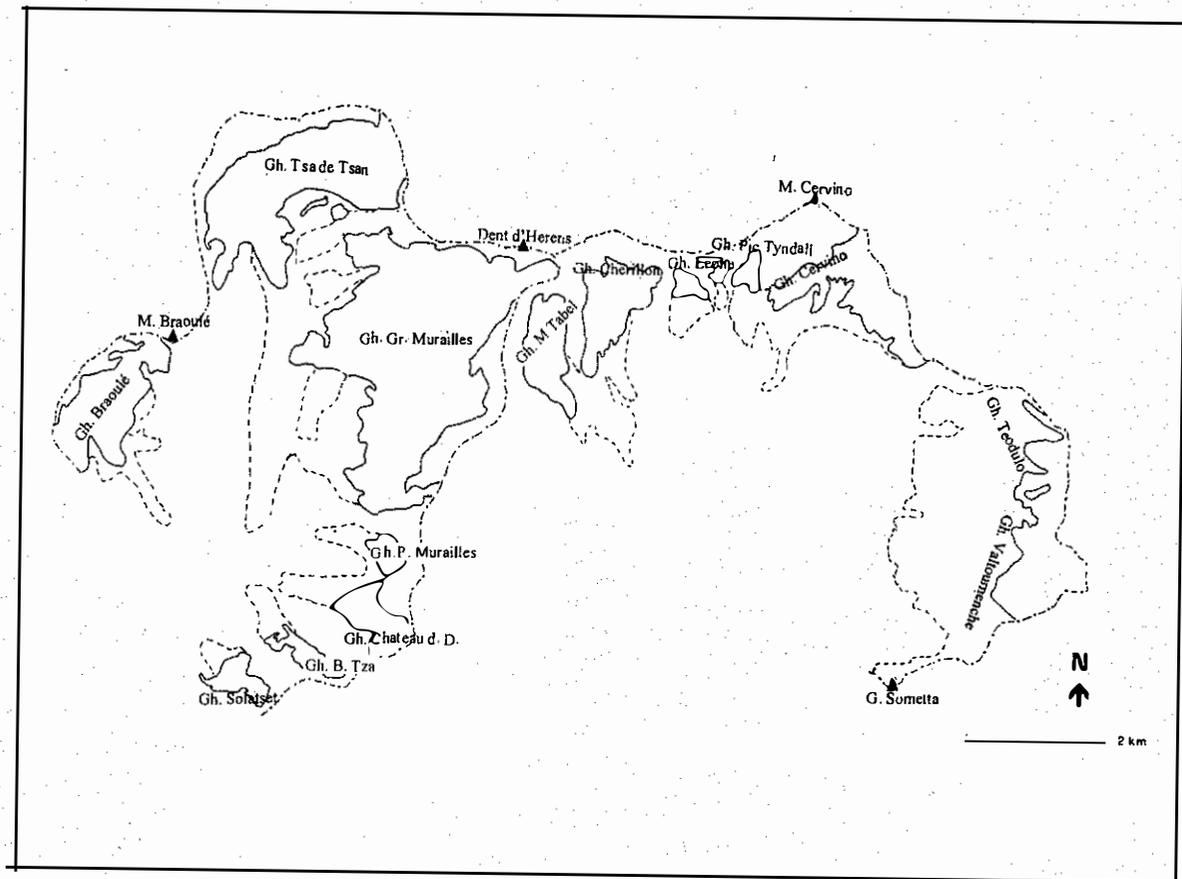


Fig. 8 - I ghiacciai della testata della Valpelline e della Valtournenche. Tratteggiata la massima estensione raggiunta

CLAUDIO SMIRAGLIA

Università di Milano - Comitato Scientifico del Club Alpino Italiano

*Comitato Glaciologico Italiano*

## I GHIACCIAI POLARI, GRANDI ARCHIVI DELLA STORIA DEL CLIMA TERRESTRE

### Introduzione.

E' ormai noto anche a livello di divulgazione scientifica il duplice interesse di tipo ambientale che riveste attualmente lo studio delle masse glaciali. I ghiacciai infatti con le variazioni della loro geometria, soprattutto lunghezza e volume, costituiscono in primo luogo dei sensibili indicatori delle tendenze del clima; in secondo luogo con le loro particolari caratteristiche fisiche e chimiche rappresentano degli archivi insostituibili nella ricostruzione dell'ambiente e del clima antico.

Ciò è particolarmente vero per le grandi calotte polari dove la genesi del ghiaccio avviene con temperature dell'aria costantemente al di sotto di  $0^{\circ}\text{C}$  e con processi di metamorfismo molto diversi rispetto ai ghiacciai temperati. Il più importante processo della fase iniziale del metamorfismo sia in ambito polare sia in ambito temperato è la compattazione (*packing*), attraverso la quale i singoli cristalli, sottoposti alla pressione degli strati sovrastanti, mutano posizione reciproca rispetto ai cristalli circostanti. Tuttavia con questo processo la porosità si riduce solo al 40 % e la densità arriva solo a circa  $0,55 \text{ g/cm}^3$ . Intervengono quindi altri fenomeni a ridurre la porosità e ad aumentare la densità.

Nei climi temperati, dove durante l'estate le temperature dell'aria, anche nelle regioni montuose che ospitano i ghiacciai, superano ampiamente  $0^{\circ}\text{C}$ , alla compattazione si aggiungono fusione e rigelo. La fusio-

ne accelera l'arrotondamento dei singoli cristalli, in quanto questi fondono prima alle loro estremità e, producendo un sottile velo di acqua, favorisce la compattazione; il rigelo amplia le dimensioni dei cristalli ed elimina rapidamente ogni porosità (*sealing off*). Nei ghiacciai delle zone temperate si verifica quindi un'intensa percolazione estiva, che dagli strati superiori si propaga in quelli inferiori, producendo un rimescolamento e una omogeneizzazione delle caratteristiche fisiche e chimiche di ogni strato.

Nei ghiacciai polari, sostanzialmente le calotte dell'Antartide e della Groenlandia, le prime decine di metri sono rappresentate da neve porosa e da nevato, che a maggiore profondità si trasformano in un materiale totalmente privo di porosità, il ghiaccio polare. I processi che intervengono, oltre alla compattazione, sono la sublimazione-condensazione e la diffusione, la cui velocità è condizionata sia dall'entità dell'accumulo di neve, sia dalla temperatura all'interno della neve stessa. In ogni caso, tenendo conto delle temperature tipiche delle calotte polari, costantemente ben al di sotto di 0°C, non si verifica fusione. La chiusura dei canali intergranulari (che blocca ogni contatto per convezione con l'aria esterna) e la mancata fusione implicano che la composizione dell'aria incorporata nei singoli cristalli di ghiaccio sia la stessa che vi era all'esterno quando si verificò la nevicata che diede origine a quel ghiaccio.

In realtà al di sotto di alcune centinaia di metri di profondità man mano che la densificazione aumenta, si producono variazioni nella composizione originale delle bolle d'aria, soprattutto ad opera della gravità che tende a concentrare verso il basso le molecole gassose più pesanti. Le correzioni da apportare sono tuttavia note e di sufficiente precisione.

A profondità maggiori la densificazione porta a una riduzione progressiva del volume delle bolle d'aria incorporate nel ghiaccio e ad un aumento della pressione dei gas atmosferici al loro interno. Più sotto

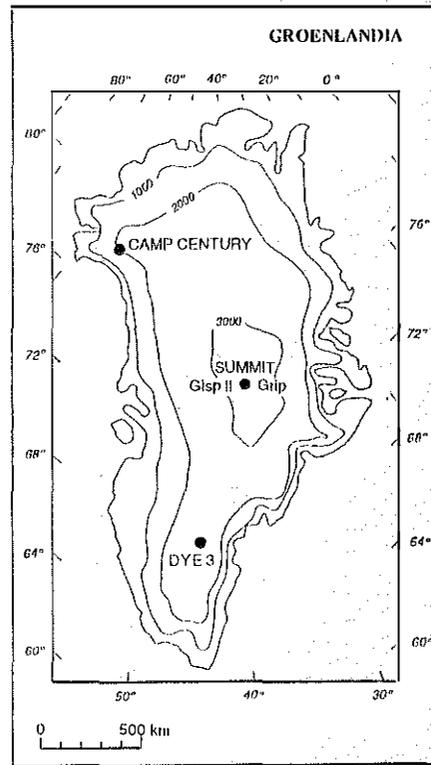
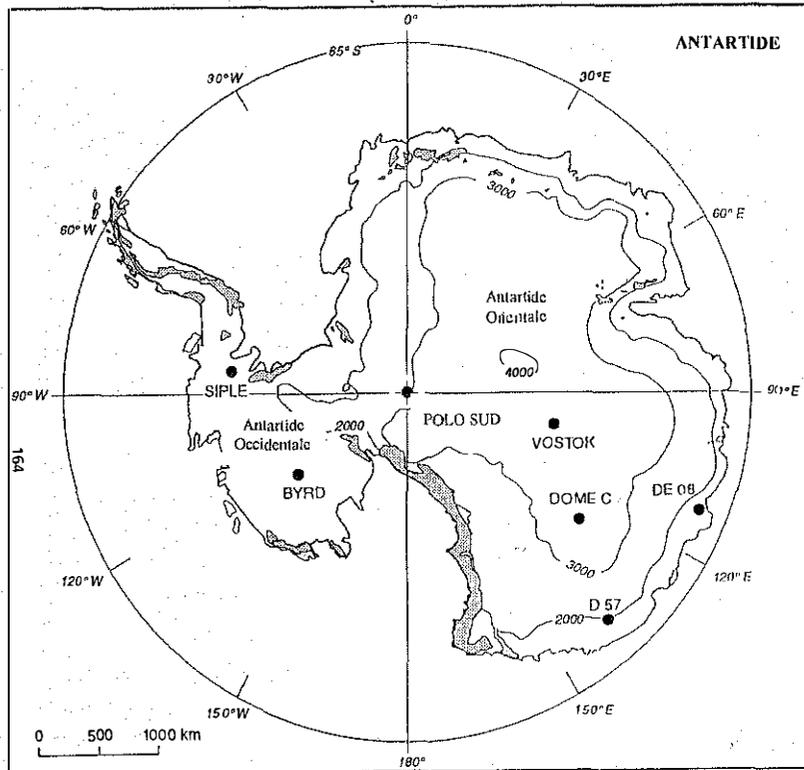


Fig. 1.- Carte schematiche dell'Antartide e della Groenlandia. I pallini neri indicano i siti delle perforazioni profonde (da Jouzel & Lorius, 1995).

ancora, le molecole dei vari gas tendono ad inserirsi progressivamente nelle molecole di acqua del ghiaccio formando i cosiddetti *clatrati*. A questo punto tutta l'aria è completamente ed intimamente incorporata nel ghiaccio sotto forma di clatrati e il ghiaccio stesso non presenta più bolle visibili.

Va inoltre aggiunto che nel ghiaccio ricco di impurità, come quello groenlandese, si possono verificare reazioni chimiche che alterano la composizione dell'anidride carbonica dell'aria contenuta nel ghiaccio. Le variazioni della concentrazione di  $\text{CO}_2$  nel passato vengono dunque ricavate esclusivamente dall'Antartide.

In conclusione, se si prendono determinate precauzioni di ordine sperimentale, le caratteristiche dell'aria contenuta nei ghiacci polari non sono influenzate dai vari processi che avvengono durante la densificazione; si ha quindi la possibilità di ottenere informazioni di enorme importanza ambientale e climatica risalendo nel tempo anche a centinaia di migliaia di anni fa, in particolare sulle temperature (attraverso l'analisi degli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno) e sulla concentrazione di *gas serra*, come l'anidride carbonica e il metano.

### I vari programmi di ricerca

Negli ultimi decenni, a partire dall'inizio degli Anni Sessanta, numerose perforazioni *profonde* (con questa denominazione si intendono le perforazioni che superano i 1000 m di profondità) sono state effettuate sia a livello nazionale che internazionale in Groenlandia e in Antartide (fig. 1). Essendo entrambe in posizione polare, queste due regioni presentano ambienti simili dal punto di vista chimico e fisico; ad un'analisi approfondita rivelano però molte differenze che rendono complementari le ricerche in esse effettuate. La regione polare meridionale è costituita da un continente disabitato (l'Antartide) circondato da

oceani, mentre a settentrione si trova un oceano ghiacciato circondato da continenti dove la presenza umana e le attività antropiche sono estremamente importanti e diffuse. Da ciò derivano sensibili differenze nella circolazione atmosferica, particolarmente per quanto riguarda l'intensità dei flussi fra le medie e le alte latitudini (i flussi, e quindi anche i materiali trasportati, sono più intensi nell'emisfero boreale).

Nelle varie perforazioni effettuate in Antartide e in Groenlandia sono stati estratti campioni di ghiaccio (in italiano vengono detti *carote*, in inglese *ice core*) di migliaia di metri di lunghezza, in alcuni casi raggiungendo il fondo roccioso. Fra le più note vi è sicuramente la *carota* di Vostok, estratta nell'Antartide Orientale presso la base sovietica omonima all'inizio degli Anni Settanta, che ha consentito di retrocedere nel tempo per 220.000 anni coprendo quindi più di un intero ciclo climatico glaciale-interglaciale. Fra le perforazioni più recenti in Groenlandia vi sono quella europea del GRIP (*Greenland Ice Core Project*), cui ha partecipato anche l'Italia, e quella americana del GISP (*Greenland Ice Sheet Project*). Entrambe sono state realizzate a Summit Dome a 3250 m di altezza nel centro della calotta groenlandese e hanno raggiunto il fondo roccioso a oltre 3000 m di profondità, coprendo più di un intero ciclo climatico. Attualmente sono in corso in Antartide le operazioni preliminari per una perforazione europea che dovrebbe arrivare a profondità ancora maggiori. Si tratta del Progetto EPICA (*European Programme for Ice Coring in Antarctica*), che prevede di raggiungere il fondo roccioso a 3500 m di profondità a Dome C sulla calotta orientale per ottenere informazioni sulla storia del clima terrestre fino ad 300.000 anni fa (fig. 2). Anche l'Italia è impegnata in questo progetto con numerosi ricercatori che hanno già effettuato studi geodetici e geofisici.

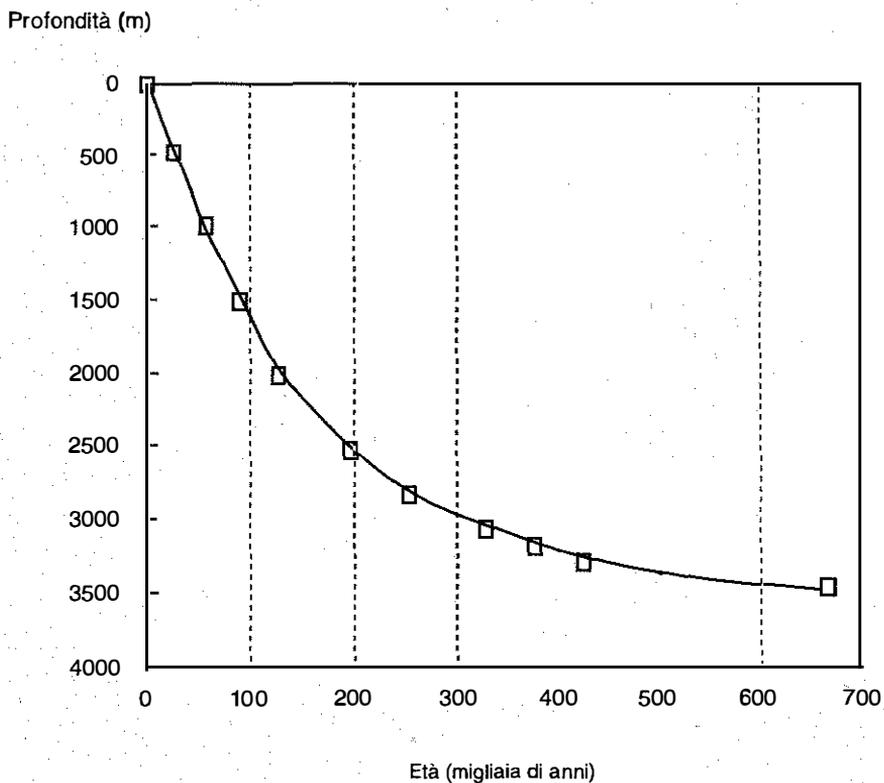


Fig. 2.- Relazione fra la profondità e la prevista età del ghiaccio nella perforazione del Progetto EPICA a Dome C in Antartide.

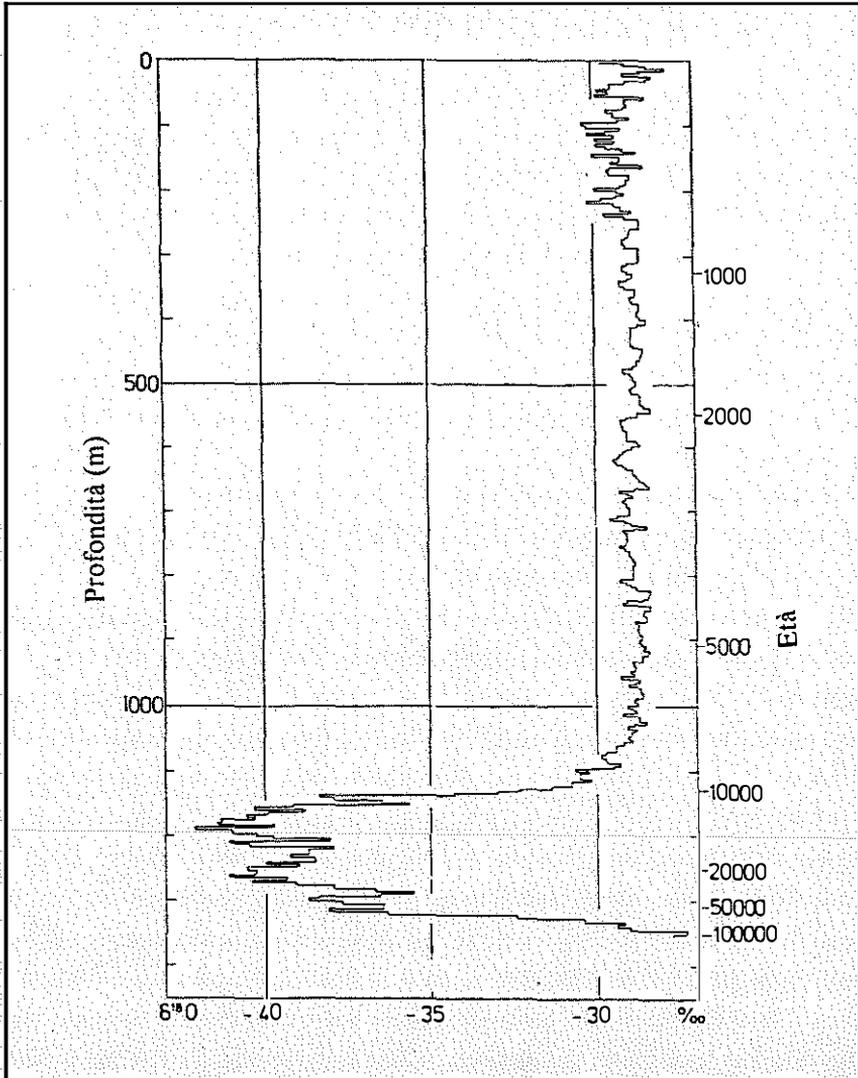


Fig. 3.- Variazione della composizione isotopica dell'ossigeno in funzione della profondità e dell'età del ghiaccio nella *carota* di Camp Century (Groenlandia). Si osservi come al di sotto di 1100 m di profondità, corrispondenti a 10.000 anni fa, i valori isotopici si abbassino rapidamente indicando l'inizio dell'Ultimo Glaciale (da Souchez, 1988).

## Il problema della datazione

In qualsiasi analisi delle *carote* il problema fondamentale e preliminare è quello della datazione dei vari strati di nevato e di ghiaccio, che permette, talora con dettaglio annuale o addirittura stagionale, di cogliere non solo le variazioni della concentrazione dei vari composti chimici, ma anche le oscillazioni dell'accumulo nevoso.

Le tecniche di datazione sono molto varie e dipendono da diversi fattori, quali il dettaglio richiesto, la scala temporale presunta, l'accumulo nevoso medio del sito. Si possono quindi usare:

- 1) tecniche stratigrafiche basate sull'alternanza stagionale di alcuni segnali morfologici e chimici
- 2) livelli che formano orizzonti particolari di riferimento
- 3) decadimento radioattivo di alcuni radionuclidi
- 4) modelli fisico-matematici di flusso

Le tecniche stratigrafiche vengono usate nelle parti superiori delle *carote* e permettono, spesso usate contemporaneamente, di determinare una datazione accurata (annuale) degli strati di nevato e di ghiaccio, contando letteralmente gli anni. Si possono prendere in considerazione per limitate profondità le proprietà fisico-morfologiche della neve, come l'alternanza di strati di brina profonda (che indica un metamorfismo estivo dello strato superficiale) e di nevato a grani fini. Molto diffuso l'uso degli isotopi stabili dell'acqua che presenta il grande vantaggio di non richiedere particolari tecniche per prevenire la contaminazione dei campioni di ghiaccio. Questo metodo si basa sulla relazione esistente fra la concentrazione di isotopi stabili nell'atmosfera, e quindi nel ghiaccio (in particolare deuterio e  $^{18}\text{O}$ ) e la temperatura dell'aria. Si è calcolato che la diminuzione di  $1^\circ\text{C}$  della temperatura dell'aria corrisponda a una diminuzione dello 0,67 % dell'ossigeno 18 e del 6 % del deuterio. Questo fenomeno permette da un lato l'identificazione delle alternanze stagionali (le precipitazioni invernali contengono quan-

tità minori di isotopi rispetto a quelle estive), e quindi di datare l'età del ghiaccio contando le successioni di alternanze estate-inverno, dall'altro di determinare le temperature dell'aria sempre a livello stagionale (fig. 3).

Si possono inoltre utilizzare altri indicatori, come l'acqua ossigenata (la sua concentrazione è maggiore durante l'estate), il sodio, il calcio, che hanno evidenziato sensibili differenze stagionali sia in Antartide sia in Groenlandia.

Particolari orizzonti di riferimento sia naturali sia antropici consentono datazioni assolute degli strati di ghiaccio e di nevato. In particolare notevoli concentrazioni di  $\text{SO}_2$  possono essere correlate all'eruzione del 1815 del vulcano Tambora che ha iniettato nella stratosfera enormi quantità di anidride solforosa. Segnali antropogenici vengono forniti da alcuni radionuclidi, come il tritio, correlabile ai test nucleari del 1955 e soprattutto del 1965.

Nelle parti più profonde delle carote la compressione dovuta alla gravità e la deformazione derivante dal flusso del ghiaccio impediscono l'utilizzo delle tecniche sopra indicate. L'età dei singoli strati diviene infatti una funzione più complessa della profondità ed è quindi necessario ricorrere a modelli matematici di flusso glaciale.

### **Alcuni risultati (indicazioni sul clima)**

Le recenti perforazioni GRIP e GISP hanno permesso per la prima volta di ottenere informazioni in Groenlandia che vanno al di là dell'ultimo periodo glaciale e consentono quindi un confronto con la *carota* di Vostok.

Vi è naturalmente ben documentata l'ultima deglaciazione che ha portato al periodo attuale, detto Olocene. La transizione dall'ultimo glaciale all'attuale post-glaciale è avvenuta attraverso fasi complesse.

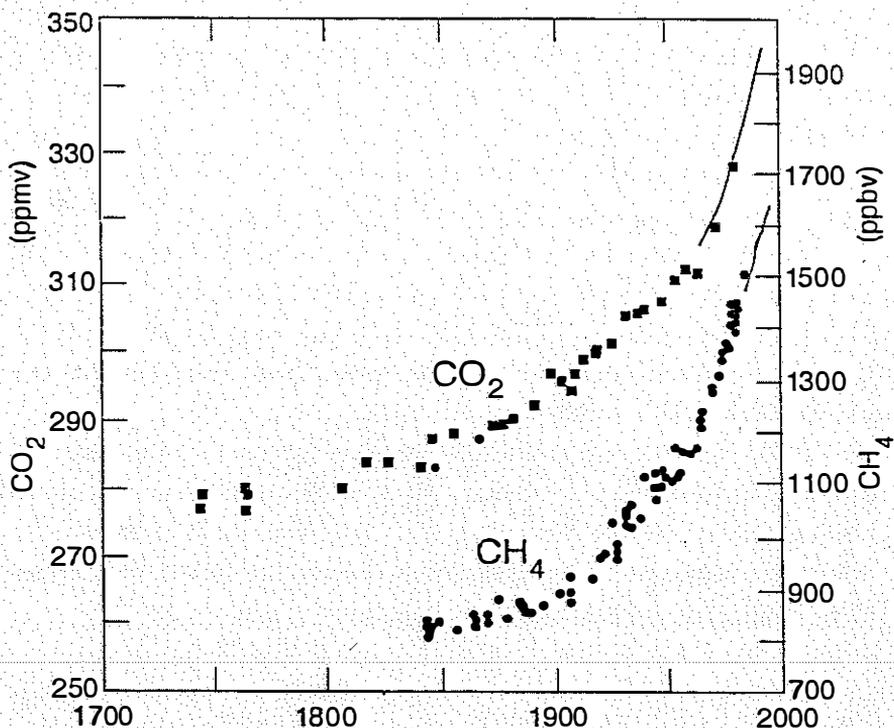


Fig. 4. - Variazioni della concentrazione di anidride carbonica (in parti per milione in volume) e di metano (in parti per bilione in volume) a partire dalla metà del XVIII secolo tratte dall'analisi delle bolle d'aria contenute nel ghiaccio polare (quadrantini e puntini neri). Con il tratto continuo sono indicati i valori misurati direttamente in atmosfera (da Raynaud et Alii, 1995).

Dapprima si è verificata una iniziale fase di riscaldamento seguita da un temporaneo ritorno a condizioni fredde (è il cosiddetto *Dryas recente*); si è poi passati rapidamente verso le condizioni climatiche attuali dell'Olocene. Le temperature hanno subito bruschi incrementi (in Groenlandia si segnalano aumenti di 7°C in 50 anni). Questa fase di transizione, che si chiude circa 11500 anni fa, è segnata anche da una rapida diminuzione della concentrazione delle polveri nel ghiaccio (5-20 anni), che indica il passaggio da una circolazione atmosferica di tipo glaciale ad una di tipo postglaciale. Durante i periodi freddi vi è in effetti un maggiore trasporto di polveri da parte dell'atmosfera, dovuto sia all'aumentata intensità dei flussi, sia alla maggiore disponibilità di materiali fini che le correnti aeree possono assumere in carico. Durante le fasi glaciali si verifica infatti un'espansione delle terre aride accompagnata da un ampliamento della superficie dei continenti dovuto all'abbassamento del livello marino. Durante questa fase di transizione dall'analisi delle carote groenlandesi emerge anche un aumento sensibile e rapido dell'accumulo nevoso, che si sarebbe raddoppiato nell'arco di pochi anni.

Variazioni climatiche rapide si sono individuate anche nell'ultimo periodo glaciale. Si tratta di fasi di incremento termico sensibile (in alcuni casi corrispondente a più della metà del riscaldamento che caratterizza la transizione glaciale-interglaciale) che si verificano in pochi decenni e che sono seguite da un altrettanto rapido ritorno verso condizioni glaciali. Questi eventi, già segnalati attraverso le perforazioni di Camp Century e Dye 3 e denominati "*interstadi di Dansgaard-Oeschger*", dal nome dei due loro maggiori studiosi, sono stati ritrovati anche nei carotaggi più recenti. Nelle carote GRIP e GISP si è rilevata infatti una ventina di interstadi di questo tipo della durata compresa fra 500 e 2000 anni.

Questi eventi richiamano con le loro caratteristiche altri indicatori di rapidi interstadi nell'ultimo glaciale. Si tratta dei cosiddetti "*strati di*

*Heinrich*” trovati nei sedimenti marini dell’Atlantico Settentrionale, il cui accumulo è stato prodotto da iceberg staccatisi dalla grande calotta polare settentrionale. Va anche ricordato che a ciascuno di questi interstadi si associa un incremento sensibile della concentrazione di metano nell’aria.

Da queste analisi emerge un altro dato particolarmente interessante; si è infatti constatato che l’ultimo interglaciale (detto Eemiano), collocabile fra 140.000 e 110.000 anni fa, è stato leggermente più caldo (circa 4°C) dell’Olocene. Anche in questo periodo tuttavia si assiste a una notevole variabilità con fasi fredde della durata compresa fra 70 e 5000 anni che si avvicinano alle condizioni climatiche dei periodi glaciali.

I risultati delle recenti perforazioni groenlandesi trovano riscontro nelle analisi della carota di Vostok condotte a partire dall’inizio degli Anni Settanta da équipes sovietiche, americane e francesi, anche se le varie fasi di raffreddamento e di riscaldamento in Antartide avvengono in modo più lento che in Groenlandia.

### **Alcuni risultati (indicazioni sui gas serra e altri composti chimici)**

Oltre ai dati sulle variazioni climatiche, i ghiacci polari grazie alle loro caratteristiche fisiche possono, come si è detto, fornire informazioni essenziali sull’evoluzione dei gas serra, in particolare dell’anidride carbonica e del metano, e di altri composti chimici. Questa documentazione può essere esaminata a diverse scale temporali, che permettono sia di collocare le influenze antropogeniche sul clima nella giusta prospettiva cronologica, sia di migliorare la nostra conoscenza delle relazioni fra oscillazioni climatiche e variazioni dei gas serra.

Si possono quindi prendere in considerazione: 1) gli ultimi tre secoli, caratterizzati da una sempre crescente attività umana di altera-

zione dell'atmosfera, per i quali le osservazioni strumentali coprono solo gli ultimi decenni, 2) il periodo pre-industriale, in pratica l'ultimo millennio; 3) il ciclo glaciale-interglaciale che copre poco più degli ultimi 100.000 anni.

Per quanto riguarda l'era industriale, l'analisi dell'aria contenuta nei ghiacci polari mostra senza alcun dubbio un incremento esponenziale delle concentrazioni di  $\text{CO}_2$  e di  $\text{CH}_4$  soprattutto a partire dalla metà del XIX secolo (fig. 4). La crescita di anidride carbonica dal periodo preindustriale è stata del 27 %, quella del metano del 145 %. Tali incrementi sono dovuti essenzialmente all'uso dei combustibili fossili e alle trasformazioni antropiche dell'ambiente (ad esempio le deforestazioni) per la  $\text{CO}_2$ , alle emissioni di risaie, animali, discariche per il  $\text{CH}_4$ . Va aggiunto che le misure strumentali dirette (che per l'anidride carbonica cominciano verso la metà degli Anni Sessanta) sono in ottimo accordo con i dati indiretti ricavati dal ghiaccio polare.

Oltre ai dati sui gas serra, dalle carote polari, soprattutto groenlandesi, si possono ricavare informazioni su altri composti chimici e quindi sulla composizione dell'atmosfera degli ultimi 200 anni. È sensibile ad esempio il contrasto fra la concentrazione dei solfati in Groenlandia e in Antartide. Nella prima si registra infatti un sensibile aumento dovuto all'incremento delle emissioni di anidride solforosa in rapporto all'utilizzo dei combustibili fossili nell'emisfero settentrionale (fig. 5). Lo stesso si può dire per i nitrati, che solo in tempi recentissimi mostrano incrementi significativi in Antartide. In entrambe le aree appaiono comunque segnali chiarissimi di particolari eventi naturali, si osservano ad esempio picchi molto netti nella concentrazione di solfati attribuibili ad eruzioni vulcaniche, come quella del Laki nel 1783 o del Tambora nel 1815.

A proposito dell'ultimo millennio, nel periodo precedente lo sviluppo industriale, il clima è stato abbastanza simile a quello attuale; vi sono state tuttavia alcune limitate oscillazioni di temperatura (non

superiore a 1°C) a scala più o meno globale che hanno dato origine al Periodo Caldo Medioevale e alla Piccola Glaciazione. Nel periodo preindustriale la concentrazione di CO<sub>2</sub> non superava le 280 parti per milione in volume, nettamente inferiori agli oltre 300 ppmv del XX secolo, con oscillazioni massime di 10 ppmv. Anche per il metano la situazione è simile: concentrazioni inferiori all'attuale con limitate oscillazioni. I motivi di queste piccole variazioni di concentrazione non sono ancora del tutto chiariti. Si può pensare ad esempio agli effetti ambientali delle piccole oscillazioni climatiche citate, come la diminuzione della copertura vegetale durante la Piccola Glaciazione oppure all'incremento della temperatura delle acque superficiali durante i periodi caldi oppure ancora ad un impatto antropico sensibile anche prima della rivoluzione industriale (come l'intenso diboscamento delle pianure europee avvenuto durante il Medioevo).

Per quanto riguarda il ciclo glaciale-interglaciale, che ha comportato variazioni termiche globali dell'ordine di circa 5 °C, i dati provenienti dalle analisi delle carote polari coprono in modo continuo gli ultimi 200.000 anni e permettono quindi di risalire a tutto l'ultimo ciclo glacia-interglaciale e al glaciale precedente. Il confronto fra le concentrazioni attuali di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> con quelle rilevate dalla carota di Vostok evidenziano in modo drammatico l'impatto delle attività antropiche degli ultimi secoli. Come si vede nella fig. 6, le concentrazioni di anidride carbonica e di metano degli ultimi 160.000 anni non hanno mai raggiunto livelli comparabili con quelli attuali. Si osservano tuttavia oscillazioni sensibili prima dell'epoca industriale che per la CO<sub>2</sub> sono comprese fra 200 e 300 ppmv e per il CH<sub>4</sub> fra 300 e 700 ppbv. Si osserva anche una netta relazione con le oscillazioni della temperatura; le concentrazioni più elevate sono infatti registrate durante gli interglaciali caldi, mentre le minime corrispondono ai periodi glaciali. Si pone quindi il problema delle variazioni dei gas serra in rapporto alle oscillazioni climatiche e del loro contributo all'amplifica-

zione di queste oscillazioni nell'ambito di un ciclo glaciale-interglaciale. Si può ipotizzare che le variazioni della concentrazione di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  siano state inizialmente legate a modifiche fisiche e dimensionali dei loro grandi serbatoi, in particolare gli oceani per la  $\text{CO}_2$  (ricordiamo che le acque fredde assorbono più anidride carbonica di quelle calde) e gli ecosistemi continentali per il  $\text{CH}_4$ .

Queste trasformazioni devono essere state provocate da variazioni della circolazione atmosferica ed oceanica, a loro volta innescate da fenomeni esterni al sistema atmosfera-idrosfera-litosfera; si può pensare in particolare alle variazioni dei parametri orbitali del nostro pianeta che avrebbero provocato modifiche nella distribuzione e nell'intensità dell'insolazione.

Tali fenomeni non sono in grado tuttavia di giustificare totalmente l'ampiezza dei cicli termici fra un glaciale e l'interglaciale seguente. La coincidenza quindi delle variazioni più sensibili di  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  con le maggiori modificazioni climatiche fa ritenere che i gas serra siano stati importanti amplificatori di queste modificazioni. Modelli statistici e di simulazione climatica attribuiscono all'effetto dei gas serra circa il 40-50 % delle variazioni di temperatura osservate. Quindi il riscaldamento registrato al passaggio da un glaciale a un interglaciale ( $4\text{-}5^\circ\text{C}$ ) sarebbe dovuto per circa  $2^\circ\text{C}$  all'aumento della concentrazione dei gas serra.

Le analisi delle carote di ghiaccio hanno evidenziato anche altre modifiche nella composizione della nostra atmosfera, in particolare per quanto riguarda gli aerosol primari (sale marino e polveri) e quelli secondari (solfati), che sono aumentati durante i periodi glaciali.

Il sodio di origine marina nella carota di Vostok presenta scarse concentrazioni durante i periodi caldi e una graduale crescita durante l'ultimo glaciale. Questo nonostante la maggiore estensione del ghiaccio marino durante l'ultima espansione glaciale (oltre 1000 km più a nord), che ha provocato un aumento della distanza fra il mare aperto e la parte

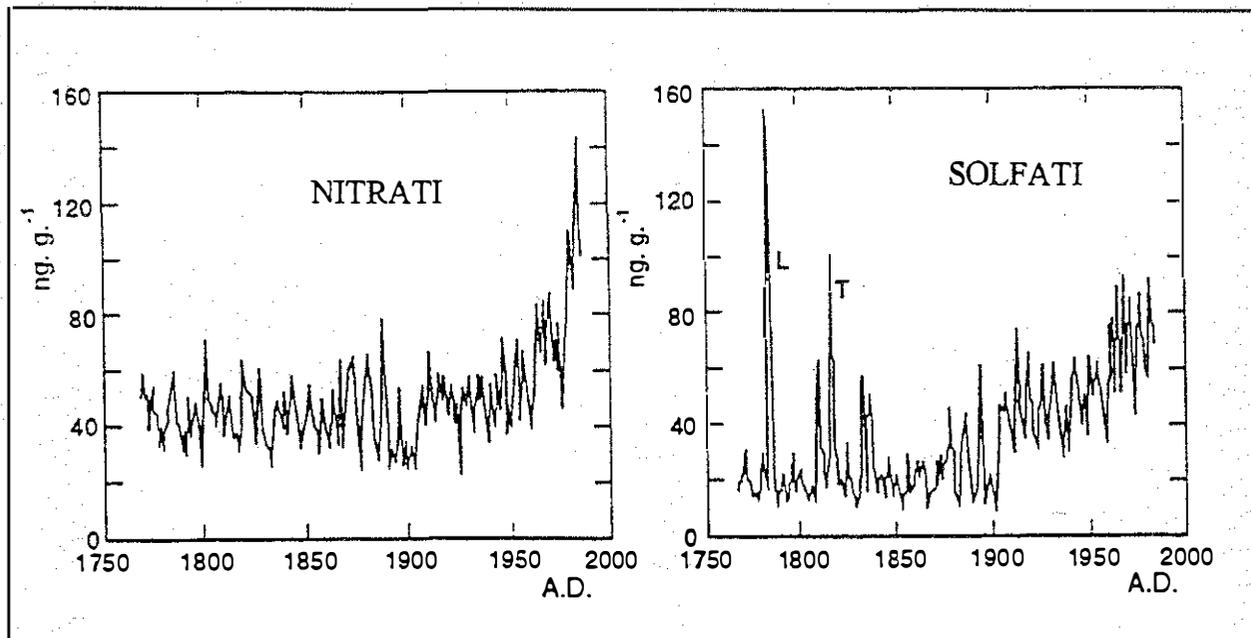


Fig. 5.- Variazioni di nitrati e solfati a partire dal 1750 nella *carota* di Dye 3 in Groenlandia. L e T indicano rispettivamente le eruzioni del Laki e del Tambora (da Legrand & Delmas, 1995).

centrale dell'altopiano antartico, dove è stata eseguita la perforazione di Vostok. Si ritiene quindi che l'incremento del contenuto di sali marini nell'atmosfera antartica sia dovuto ad una maggiore intensità e velocità delle correnti aeree nord-sud durante i periodi glaciali.

### Conclusioni

In conclusione dallo studio delle carote estratte in questi ultimi decenni dai ghiacci freddi polari sono emersi alcuni risultati, che confermano la funzione insostituibile di queste regioni come archivi della storia del nostro pianeta, in particolare:

- la stabilità del clima degli ultimi 10.000 anni (Olocene) in contrasto con la variabilità degli ultimi 100.000 anni, che hanno evidenziato raffreddamenti durante l'ultima deglaciazione e interstadi caldi durante la glaciazione.
- temperature durante l'ultimo interglaciale più elevate di quelle attuali.
- oscillazioni di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> in correlazione con le variazioni termiche
- concentrazioni attuali di anidride carbonica e di metano nettamente superiori a quelle dei 200.000 anni precedenti.
- coincidenza, seppur con minore accentuazione in Antartide, degli eventi verificatisi in entrambi gli emisferi, il che dimostra che si è trattato di fenomeni non a livello locale ma a livello globale.
- maggiore sensibilità della calotta groenlandese a registrare le modificazioni più recenti dell'atmosfera di origine antropica.

Ulteriori studi sulle carote già disponibili sono tuttora in corso, così come sono in fase di realizzazione progetti che dovrebbero ampliare la dimensione cronologica delle nostre conoscenze (ad esempio la perforazione EPICA di Dome C) e consentire una migliore compren-

sione dei complessi rapporti criosfera-atmosfera-idrosfera-biosfera (in quest'ultima comprendiamo anche le attività dell'uomo). Allo stato attuale delle conoscenze le previsioni non possono che stemperarsi in scenari a volte contrapposti. A medio termine si dovrebbe comunque registrare un ulteriore incremento termico globale, che dovrebbe portare ad un aumento della fusione nella Groenlandia Meridionale, compensato da un aumento di precipitazioni nella Groenlandia Settentrionale. Anche l'Antartide Orientale dovrebbe aumentare lievemente di volume a causa dell'aumento del vapore acqueo nell'atmosfera; più instabile è sicuramente la calotta antartica occidentale. Di certo sappiamo che l'*optimum climatico* del Postglaciale è ormai alle nostre spalle; ma per usare le parole dello studioso belga Roland Souchez, "*a meno di fare della fantascienza, nessuno oggi può dire fin dove si estenderanno i ghiacci polari nei prossimi millenni*".

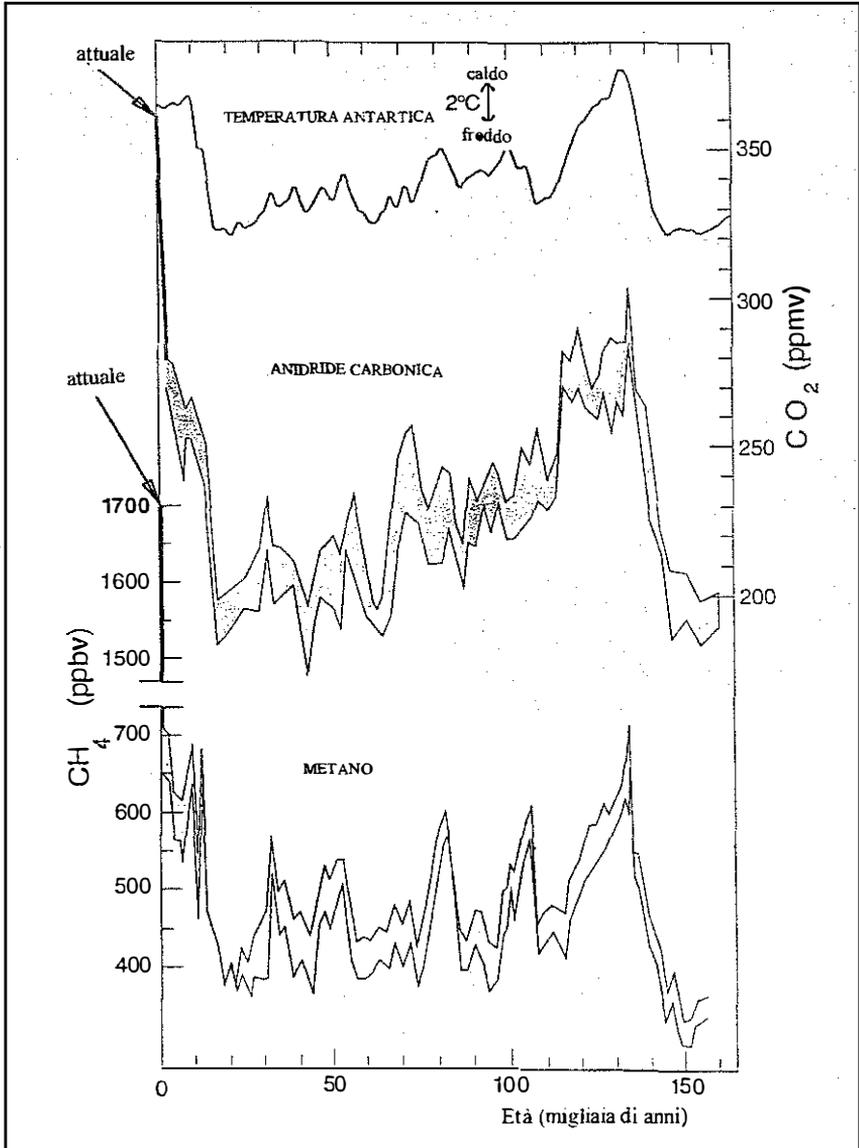


Fig. 6.- Variazioni della temperatura dell'atmosfera e della concentrazione di anidride carbonica e metano nella *carota* di Vostok (Antartide). Sono indicati anche i valori attuali (da Legrand & Delmas, 1995).

## Bibliografia

- JOUZEL J. & LORIUS (1995) - *Glaces polaires: variations rapides du climat*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX<sup>e</sup> siècle", pp. 155-166.
- LEGRAND M. & DELMAS R. (1995) - *Chimie des glaces polaires: un reflet de notre atmosphère passée*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX<sup>e</sup> siècle", pp. 189-166.
- MAGGI V. & CORAZZA E. (1994) - *Greenland Ice-Core Project (GRIP): tre anni di attività*. Memorie Società Geografica Italiana, vol. 51, pp. 135-156.
- OROMBELLI G. (1990) - *Ghiacciai, clima, equilibri ambientali*. Memorie Società Geologica Italiana, vol. 45, pp. 833-837.
- RAYNAUD D., BARNOLA J.M. & CHAPPELLAZ J. (1995) - *Les glaces polaires: une mémoire de l'évolution des gaz à effet de serre*. Colloque d'Hydrotechnique, Grenoble, 15-16 février 1995 "Glaciologie et Nivologie. Etat des recherches et des connaissances à la fin du XX<sup>e</sup> siècle", pp. 201-206.
- SMIRAGLIA C. (1992) - *Guida ai ghiacciai e alla glaciologia. Forme, fluttuazioni, ambienti*. Zanichelli ed., Bologna, 240 pp.
- SOUCHEZ R. (1988) - *Les glaces polaires*. Edirions de l'Université de Bruxelles, 156 pp.
- SUGDEN D. & HULTON N. (1994) - *Ice volumes and climate change*. In: Roberts N. (a cura di), "The Changing Global Environment", Blackwell, Oxford.

## GIAN CARLO ROSSI

C.A.I. - Commissione Scientifica del Comitato Veneto-Friulano Giuliano (VE Mestre)  
Ricercatore presso l'Unità Idro-Geologia Impiantistica del Centro Ricerche Idrauliche e  
Strutturali (CRIS) della Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL S.p.A. (VE-Mestre).

# RICERCHE GLACIOLOGICHE ED AMBIENTALI SUI BACINI VALDOSTANI

## Premessa

I bacini idrologici di tipo nivoglaciale rivestono una notevole importanza per il regime degli apporti idrici: infatti gli apparati glaciali, anche se di estensione limitata (fino a 1 % della superficie totale) esercitano un ruolo mitigatore sulla variabilità interannuale degli apporti derivanti dalle precipitazioni. La copertura nevosa e glaciale svolge inoltre un ruolo importante nella dinamica dei processi che avvengono nell'atmosfera per effetto delle interazioni tra i composti chimici di origine naturale o antropogenica e l'acqua, presente nei tre stati di aggregazione. Le masse glaciali, conservando in maniera sequenziale le tracce degli eventi fissati nelle deposizioni nevose accumulate, costituiscono degli archivi di informazioni climatiche ed ambientali la cui decodifica può contribuire alla conoscenza dell'evoluzione del sistema climatico nel passato prossimo.

Le ricerche intraprese hanno lo scopo di approfondire sia gli aspetti idrologici connessi alla valutazione delle risorse idriche che quelli ambientali del presente e del recente passato.

### 1.0 Descrizione delle Attività

Il CRIS Servizio Idrologico dell'ENEL ha attualmente in corso due programmi di ricerca scientifica in aree alpine glaciali. Il primo

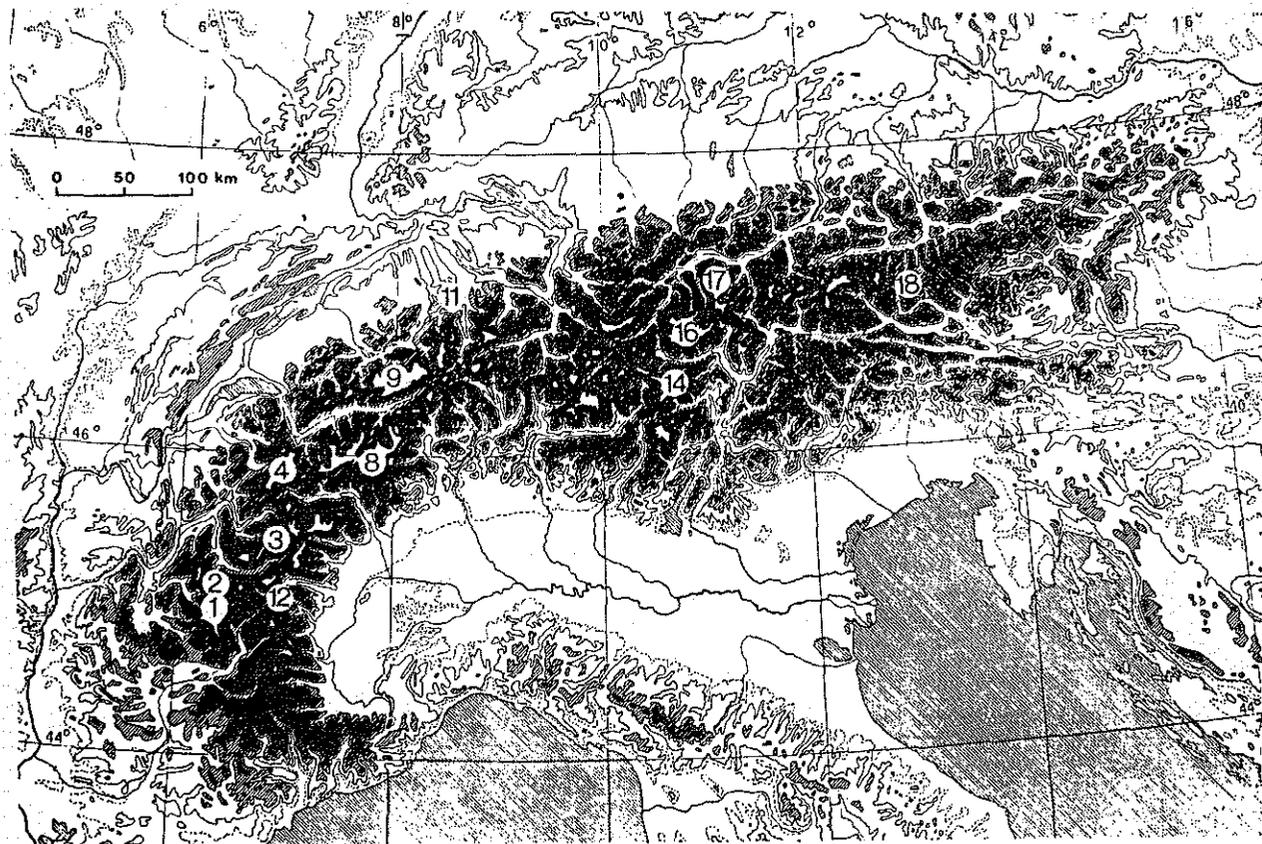
riguarda lo studio dell'influenza delle fluttuazioni climatiche sul regime degli apparati glaciali, e di conseguenza anche sulle relative producibilità idroelettriche, con particolare riferimento a due tipici bacini nivoglaciali dell'arco alpino: i ghiacciai del versante meridionale del Monte Rosa (Lys Occ. ed Orient., Felik ed Indren) ed i ghiacciai della testata della valle della Mare nel gruppo dell'Ortles-Cevedale (Vedretta della Mare e Vedretta Careser).

Il secondo progetto ha una valenza più ambientale, in quanto riguarda lo studio delle deposizioni veicolate dalle precipitazioni nevose in ambiente alpino. Esso si realizza attraverso la partecipazione ad un progetto internazionale denominato ALPTRAC (acronimo di High Alpine Aerosol and Snow Chemistry Study), che è un sottoprogetto di EUROTRAC, il quale, a sua volta, fa parte del progetto scientifico della Comunità Europea EUREKA nell'area ambientale. Questo progetto ha avuto una durata quinquennale e si concluderà alla fine del 1995. Il CRIS vi partecipa congiuntamente al Servizio Ambiente del CRTN ed al Laboratorio di Cosmogeofisica del C.N.R. di Torino (Anfossi et al. (1990)).

Entrambi i progetti prevedono un complesso di attività di ricerca nei bacini valdostani, con l'esecuzione di rilievi geofisici, osservazioni meteorologiche ed idrologiche in siti di alta quota, nonché rilevamenti, prelievi ed analisi chimiche su campioni di neve.

### 1.1 Progetto GHIACCIAI

All'interno di una rosa di ghiacciai alpini di un certo interesse, anche dal punto di vista idroelettrico, sono stati selezionati i due apparati glaciali del Careser - La Mare (gruppo Cevedale) ed il sistema dei ghiacciai Lys e Indren (Monte Rosa), che sono stati ritenuti sufficientemente rappresentativi delle due tipologie fondamentali presenti nel-



Map design by R. Steinacker

Fig. 1 - Localizzazione dei punti di prelievo del Progetto ALPTRAC

l'insieme dei ghiacciai italiani, per lo svolgimento di indagini glaciologiche approfondite miranti all'acquisizione di informazioni idrologiche ed ambientali. Questi due complessi glaciali presentano inoltre la disponibilità di certo numero di rilievi idonei alla restituzione topografica e di osservazioni delle variazioni frontali e di serie storiche di grandezze meteorologiche ed idrologiche. Il programma di indagine prevede:

- Valutazione del bilancio di massa annuale mediante misure di superficie, le cui osservazioni vengono condotte dal Comitato Glaciologico Italiano;
- Acquisizione delle serie storiche di dati meteorologici, idrologici ed eventualmente proxy-data relativi ai bacini di pertinenza dei ghiacciai in esame;
- Rilievo aerofotogrammetrico dei ghiacciai e dei relativi bacini e restituzione cartografica digitale sia delle curve di livello alla scala 1:5000 che del D.T.M. (Modello Digitale del Terreno su griglia quadrata di m 50x50);
- Ricupero ed elaborazione dei rilievi stereofotogrammetrici precedenti, allo scopo di ottenere la successione cronologica di D.T.M. dei ghiacciai conformi al rilievo di partenza;
- Installazione e gestione di stazioni di misura di grandezze meteorologiche da localizzare al di sopra della linea di equilibrio del ghiacciaio;
- Rilievo dello spessore della massa glaciale mediante tecnica idonea alle caratteristiche fisiche dei ghiacciai temperati (ad esempio: sondaggio con microonde, geosismica ecc.);
- Installazione di stazioni idrometrografiche al punto di chiusura più prossimo alla fronte glaciale per la misura dei deflussi al fine di analizzare i differenti contributi derivanti da fusione nivale da quelli di fusione glaciale, anche attraverso opportune tecniche di indagine isotopica;

Indagini collaterali sul glacialismo quaternario del bacino attraverso analisi stratigrafiche e profili pedologici e datazioni di reperti vegetali.

L'obiettivo finale è la messa a punto un modello tridimensionale in grado di descrivere, per un ghiacciaio tipico alpino, l'evoluzione della massa, della dinamica e della morfologia sotto l'azione di fattori forzanti connessi alla variabilità climatica, quali gli apporti, la capacità termica e le caratteristiche reologiche. Nell'ipotesi si riesca in futuro a realizzare l'esecuzione di una perforazione profonda della massa glaciale con recupero della carota di ghiaccio, dette informazioni risulterebbero necessarie per la datazione degli strati di ghiaccio.

## 1.2 Progetto ALPTRAC

I composti chimici veicolati dalle precipitazioni appartengono fondamentalmente a due categorie: i composti naturali (polveri di origine terrestre o cosmica, zolfo vulcanico o zolfo marino, ecc..) e composti di origine antropogenica, volgarmente definiti "inquinanti", come ad esempio i composti di zolfo e gli ossidi di azoto prodotti dalla combustione, l'ammonio di origine agricola, ecc...

Quando questi composti vengono veicolati dalle piogge, essi si trovano in soluzione e quindi sono coinvolti in una serie di reazioni chimiche e di interazioni, anche con i sistemi di raccolta, che rendono difficile l'interpretazione dei risultati dell'analisi evento per evento; al contrario i composti veicolati dalla neve non reagiscono in fase solida e quindi si possono conservare inalterati per lunghi periodi fino al laboratorio. Campionamenti di questo genere sono però poco rappresentati sotto il profilo della variabilità spaziale, sono limitati nel tempo (invernali o primaverili) e sono soggetti all'influenza del possibile rimaneggiamento del manto nevoso per effetto del vento.



Fig. 2 - Stazione meteorologica e sito di campionamento di Colle Vincent (vista verso il Balmenhorn).

Ciò premesso, le attività previste dal progetto ALPTRAC si articolano su quattro linee principali:

SNOSP (alpine wide SNOWpack Sampling Program), che consiste nel campionamento del manto nevoso su circa venti punti di misura, localizzati in ghiacciai alpini ad altitudini comprese tra i 3000 ed i 4000 metri, dislocati in Francia, Svizzera, Italia ed Austria, (Fig.1), con lo scopo di valutare l'ammontare e la distribuzione spaziale e temporale delle deposizioni nevose e dei composti chimici trasportati dalle correnti atmosferiche e depositati, nelle varie forme, in zone alpine remote. I siti italiani sono localizzati sul Colle Vincent (Monte Rosa, Alpi Occidentali) e sul Ghiacciaio Careser (Ortles-Cevedale, Alpi Centro-Orientali) e sono identificati nella Fig. 1 rispettivamente, con i numeri 8 e 16. Le caratteristiche geografiche di questi siti sono riportate in Tab. 1, mentre le date e le caratteristiche dei campionamenti sono riportate nella Tab. 2.

ALASS (ALpine Aerosol and Snow chemistry Study), che si prefigge lo scopo di studiare i principali processi che portano alla deposizione di aerosol, di acidi e di altri composti nel manto nevoso, analizzandone la dinamica evento per evento.

SNOWMET (SNOW METeorological support study) che ha l'obiettivo di fornire l'interpretazione meteorologica agli eventi di deposizione o trasporto segnalati dalle attività precedenti, e più in generale di studiare il trasporto di inquinanti a lunga distanza verso la catena alpina.

CORE (Chemical ice core on alpine cold glaciers) che ha lo scopo di acquisire informazioni sui trend dell'inquinamento nell'ultimo secolo, esaminando campioni di ghiaccio estratti dagli archivi glaciali.

A questo progetto il gruppo italiano ha contribuito partecipando alle attività SNOSP e SNOWMET, mentre si stanno cercando sinergie,

sia per l'esecuzione di una perforazione su un sito italiano, che per lo svolgimento di tutte le indagini sulla carota estratta. Il sito più promettente sotto questo profilo, è anche in questo caso, il ghiacciaio del Lys.

## **2.0 I ghiacciai della Valle di Gressoney**

Nella Valle di Gressoney insistono esclusivamente gli apparati glaciali del versante meridionale del Monte Rosa, le cui caratteristiche desunte dal Catasto compilato per il World Glacier Inventory e non ancora integralmente pubblicato sono riportate in Tab. 3.

## **3.0 Caratteristiche delle installazioni**

In tutte queste indagini resta di fondamentale importanza poter disporre di osservazioni meteorologiche in alta quota, per la cui esecuzione sono state sviluppate ed allestite delle idonee apparecchiature, caratterizzate da una specializzazione spinta per poter affrontare le condizioni richieste dall'esercizio in ambiente ostile. Esse sono riconducibili essenzialmente a due tipi:

- stazioni meteorivometriche;
- stazioni idrometrografiche.

Lo sviluppo e la realizzazione della strumentazione status-of-the-art per l'acquisizione di dati, dotata di elevata affidabilità di funzionamento in condizioni ambientali estreme e ridotta esigenza di manutenzione ha costituito parte integrante del progetto.

L'unità centrale di acquisizione dati è basata su un data-logger Campbell CR10, dotato di 64 kRAM totali di memoria, in grado di

Colle Vincent station

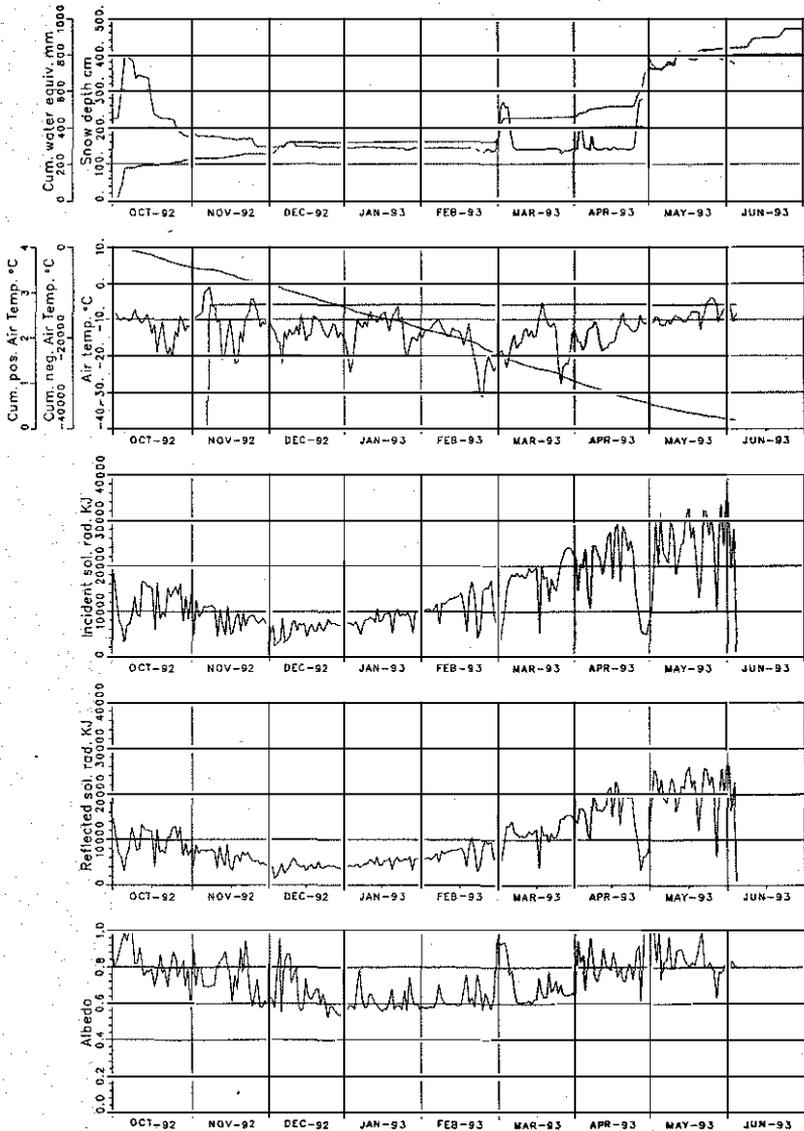


Fig. 3a - Grafici dei dati raccolti dalla stazione meteorologica di Colle Vincent (AO) nel periodo ottobre 92 - giugno 93

gestire l'acquisizione di 12 sensori ad uscita analogica e di altri 2 ad uscita digitale, e di una memoria di lavoro aggiuntiva per l'esecuzione di eventuali elaborazioni in linea.

I dati acquisiti vengono memorizzati nella memoria RAM, dalla quale vengono scaricati in occasione dei sopralluoghi, utilizzando una interfaccia RS-232. E' possibile comunque prevedere anche la trasmissione dei dati via modem attraverso un telefono cellulare E-TACS, mediante il quale può essere effettuato il collegamento in qualsiasi punto della rete telefonica nazionale.

L'alimentazione energetica è fornita mediante pannelli solari costituiti da due elementi di 0.1 m<sup>2</sup>, che permettono una potenza massima di ricarica 16 W. Essi vengono posti verticalmente, per ridurre al minimo la deposizione della neve.

Il range della temperatura di funzionamento del data-logger, per la versione standard è compreso tra -25°C e +50°C, mentre per la versione adatta alle condizioni estreme è compreso tra -55°C e +85°C. Si vede quindi che anche la versione standard permette di operare alle basse temperature che si incontrano nelle normali condizioni di operatività degli ambienti glaciali alpini, tenendo presente che durante il periodo freddo, in genere l'apparecchiatura resta sepolta sotto la neve. A questo scopo, oltre alla esecuzione stagna del data-logger, viene previsto un contenitore stagno che contiene l'interfaccia e le batterie, all'interno del quale viene registrata la temperatura. Durante il periodo di esercizio della stazione Colle Vincent, la temperatura minima registrata all'interno del data-logger è stata -6°C, mentre la temperatura minima della neve, a +0.20 m dal suolo ha raggiunto anche -14°C e la temperatura esterna è scesa sotto i -30°C.

Nel caso di stazioni meteonivometriche i sensori (elencati in Tab. 4) vengono fissati ad una crociera che sormonta un palo in vetroresina di colore bianco, mentre il sistema di acquisizione dati e le batterie di alimentazione vengono inseriti in un contenitore stagno che viene al-

loggato all'interno della parte cava della base del palo. In Fig. 2 è riportata la foto dell'installazione realizzata al Colle Vincent.

Il palo viene fissato su una crociera metallica mediante un giunto a cerniera che ne permette l'abbattimento in occasione delle operazioni di controllo e manutenzione dei sensori. La crociera realizza un piano di appoggio per mezzo di pannelli di legno trattato.

La stazione è strutturata in modo tale da venire montata in fondo valle, alla base delle operazioni, e trasportata con elicottero sul sito di installazione.

Nel caso delle stazioni idrometriche, le cui caratteristiche dei siti di installazione sono riportate in Tab. 2, i sensori di misura sono essenzialmente uno (o più) trasduttori di pressione, opportunamente protetti contro le sovrapressioni causate dall'eventuale intrappolamento nel ghiaccio, ed un sensore di temperatura. L'installazione prevede inoltre la realizzazione di una sezione di canale idonea per la misura idrometrica, possibilmente anche una passerella per le misure di portata, l'alloggiamento della strumentazione ed il sostegno per i pannelli solari. Poiché in queste condizioni è difficile poter realizzare dei canali con sezione regolare e stabile, è opportuno prevedere che i sensori per la misura dell'altezza idrometrica e della temperatura dell'acqua vadano installati in un pozzetto di calma.

Accanto a questi sensori è possibile prevedere anche l'installazione di sensori per la misura di parametri della qualità dell'acqua, quali conducibilità, pH\*, ecc.

L'unità di acquisizione è analoga a quella delle stazioni meteonivometriche; l'alloggiamento del data-logger viene realizzato mediante una cassetta stagna contenente anche l'alimentazione.

## 4.0 Risultati del progetto GHIACCIAI

Allo stato attuale il progetto Ghiacciai sul settore valdostano è ancora nella fase preliminare, però si può prevedere una sensibile accelerazione nell'acquisizione dei risultati scientifici potendo contare sull'esperienza e sulle installazioni già realizzate negli anni precedenti nel corso della realizzazione del Progetto ALPTRAC.

### 4.1 - Osservazioni meteorologiche ed idrologiche

A testimonianza dell'ottimo funzionamento della stazione di Colle Vincent e da quella localizzata presso la Diga Gabiet viene riportato il grafico di funzionamento di tutti i sensori di un periodo particolarmente rappresentativo, soprattutto per le deposizioni. In particolare le Figg. 3a e 3b contengono i grafici delle grandezze meteorologiche registrate nel periodo invernale 1992-93. Il primo grafico registra l'evoluzione del manto nevoso, dal quale si evidenziano notevoli episodi di erosione (fino a 2 metri), e solo dalla fine di aprile del 1993 lo stabilizzarsi delle deposizioni. L'altra curva riporta il totale di precipitazioni cumulate (mm acqua) misurate al Gabiet.

Il secondo grafico riporta la curva della temperatura dell'aria (curva modulata) e le due curve che rappresentano rispettivamente la somma delle temperature positive (tratto orizzontale) e di quelle negative (curva discendente). La temperatura minima registrata è stata  $-31^{\circ}\text{C}$  nella seconda metà di febbraio.

Il terzo, il quarto ed il quinto grafico riportano rispettivamente i flussi di radiazione solare incidente e riflessa ed i valori dell'albedo, grandezza che è data dal rapporto radiazione riflessa/radiazione incidente. Si verifica che nel periodo considerato il valore di questo rapporto resta compreso tra 0.6 (valore tipico del ghiaccio vivo, rimasto scoperto

per effetto dell'erosione) e 0.8, con punte di valori prossimi a 1 (cioè viene riflessa una frazione compresa tra il 60% e l'80% della radiazione solare incidente per effetto dell'elevato potere riflettente della neve fresca).

I primi due grafici della Fig. 3b riportano la velocità del vento (valore medio su 2 minuti) e la direzione del vento. Sono stati misurati ripetutamente episodi con velocità fino a circa 25 m/s (90 km/h), che sono risultati responsabili delle erosioni del manto nevoso, e con vento proveniente prevalentemente da N-NW anche per effetto della canalizzazione del vallone compreso tra la Piramide Vincent ed il Balmenhorn.

Particolare interesse presenta l'ultimo grafico, sempre della Fig. 3b, che riporta nel primo tratto la temperatura della neve misurata da una sonda a -20 cm sotto la stazione, grandezza che risente fortemente dell'influenza della temperatura dell'aria, mentre il secondo tratto riporta la temperatura della stessa sonda posizionata a -10. m di profondità; in questo caso il sensore registra stabilmente una temperatura di circa -4°C.

Alla luce dei risultati, il funzionamento complessivo del sistema di acquisizione e dei sensori delle stazioni si può considerare molto positivo, in considerazione anche delle condizioni estreme nelle quali queste apparecchiature operano. Un grave inconveniente si è verificato nei primi mesi del 1994 con il cedimento della struttura in vetroresina del palo, che è precipitato al suolo e successivamente è stato sepolto sotto una spessa coltre di neve e non più ritrovato. Questo incidente ha stimolato la progettazione di una nuova stazione con sostegno in metallo a struttura tralicciata e con ulteriori innovazioni, apparecchiatura che è in fase di realizzazione e verrà installata appena possibile.

Già dal 1993 è stata installata una stazione idrometrica sull'opera di presa idraulica che raccoglie le acque dell'emissario del ghiacciaio Indren, il Rio Moos in località Z'Indren. La registrazione dei livelli e la taratura della scala di deflusso consente di determinare i volumi

deffluiti contribuendo, oltre alla valutazione del bilancio di massa ed idrologico del ghiacciaio anche ad una migliore conoscenza della risposta di quel particolare bacino nivo-glaciale ad eventi meteorici eccezionali, come quello registrato nel settembre 1993. (Fig. 4). Una iniziativa analoga è in corso anche per il ghiacciaio del Lys con la costruzione di una stazione di misura sul torrente Lys in corrispondenza della forra di Alpe Courtlys, i cui risultati consentiranno una più accurata chiusura del bilancio idrologico complessivo.

#### **4.2 - Bilancio di massa e variazioni superficiali e volumetriche**

La valutazione del bilancio di massa mediante misure dirette di superficie di norma viene condotta utilizzando una rete di paline ablatometriche infisse sul ghiaccio in posizione adeguatamente rappresentativa delle condizioni dell'area circostante, per ciascuna delle quali sia nota la quota. Le misure riguardano le variazioni cumulate della lunghezza sporgente dal manto nevoso o dal ghiaccio delle paline, le quali vengono adeguatamente riposizionate quando il livello di riferimento si approssima ad una delle due estremità.

Alla fine dell'anno idrologico, che si estende convenzionalmente dal 1 ottobre al 30 settembre dell'anno successivo, per ciascuna palina viene valutato il bilancio idrico netto, che può risultare o di accumulo netto, nel caso di un residuo di neve sulla superficie di riferimento del ghiacciaio dell'inizio dell'anno idrologico, o di ablazione netta, nel caso che l'effetto dei processi di fusione di materiali diversi (neve, nevato, ghiaccio) abbia intaccato anche la superficie di riferimento.

Sotto l'ipotesi, generalmente confermata, di una relazione lineare tra l'equivalente in acqua dei termini di accumulo o di ablazione con la quota, viene ricostruita la distribuzione altimetrica del bilancio specifico netto (mm W.E.) per fasce altimetriche equispaziate (di ampiezza 50 o 100 m).

La quota per la quale il bilancio risulta in equilibrio, nota come ELA (Equilibrium Line Altitude) costituisce un importante indicatore climatico in relazione diretta con il bilancio totale di massa annuale del ghiacciaio. In particolare per il ghiacciaio del Lys il valore di ELA oscilla attorno ai 3400-3500 m.

Per calcolare il bilancio di massa complessivo (corrispondente alla variazione volumetrica del ghiacciaio ( $m^3$ ) tenuto conto di una resa in acqua del ghiaccio di 0.9) basta ragguagliare il valore di bilancio specifico relativo a ciascuna fascia altimetrica per la corrispondente superficie ottenuta dalla curva ipsometrica e sommare algebricamente i termini di ogni strato.

La complessità del sistema glaciale del Lys-Indren impone che l'indagine sul bilancio di massa, oltre che quantificare l'ablazione superficiale, tenga conto anche dei flussi di massa derivanti dallo scorrimento glaciale, in particolare dell'area di accumulo, poiché nell'economia delle variazioni volumetriche complessive della massa questi termini pesano in maniera sensibile.

Per far questo si è reso necessario l'allestimento di un inquadramento geodetico dell'area di investigazione, che è stata condotta facendo uso della tecnica GPS (Sistema di Posizionamento Satellitare) e di una cartografia di dettaglio, in scala almeno 1:5000 che si potrà ottenere dalla restituzione del rilievo aerofotogrammetrico condotto in collaborazione con il Comitato Glaciologico Italiano nell'autunno del 1994.

La distribuzione spaziale della velocità superficiale (tridimensionale) nell'area di accumulo del ghiacciaio viene determinato misurando, ad intervalli di tempo successivi, gli spostamenti subiti dai punti di riferimento, che sono rappresentati dalle stesse paline del bilancio di massa. Nell'area del bacino ablatore, soprattutto dove la lingua è sviluppata e canalizzata, e dove peraltro l'influenza della velocità è meno importante, è previsto invece l'impiego del metodo classico, cioè della

valutazione della distribuzione delle velocità superficiali attraverso la misura dello spostamento di un allineamento di massi posti sulla superficie glaciale.

La prima stima quantitativa è stata ottenuta nell'anno idrologico 1993-94, attraverso notevoli processi di approssimazione; questa valutazione, ricavata da osservazioni preliminari, richiede però una conferma con ulteriori osservazioni future, soprattutto quando saranno disponibili le misure idrometriche della stazione di Courtlys. Questo dato qualitativo comporta un evidente saldo negativo, diretta conseguenza delle eccezionalmente sfavorevoli condizioni di scarsità di accumulo e di temperature estive sostenute, che hanno causato una esposizione precoce del ghiaccio vivo. Si ritiene in futuro di poter aumentare il numero dei punti di controllo e di poter determinare la distribuzione delle velocità superficiali.

#### **4.3 - Rilievi geofisici**

Lo scopo dei rilievi geofisici è quello di provvedere ad una descrizione della topografia del fondo allo scopo di determinare pendenze ed orientamento del letto roccioso e spessori della massa glaciale, che sono parametri indispensabili per la descrizione della dinamica dei ghiacciai.

Le tecniche usate per la prospezione geofisica dei ghiacci, in grado di dare risultati quantitativi, sono essenzialmente quelle che sfruttano la riflessione delle emissioni di onde radar oppure di onde sonore (geosismica) del letto roccioso e la determinazione dei relativi tempi di arrivo degli echi. Entrambe queste tecniche presentano diverse difficoltà di esecuzione nel caso di ghiacciai temperati, ragioni per cui dovrebbero essere utilizzate in maniera complementare, eventualmente associando anche rilievi di anomalie del campo della gravità.

Colle Vincent station

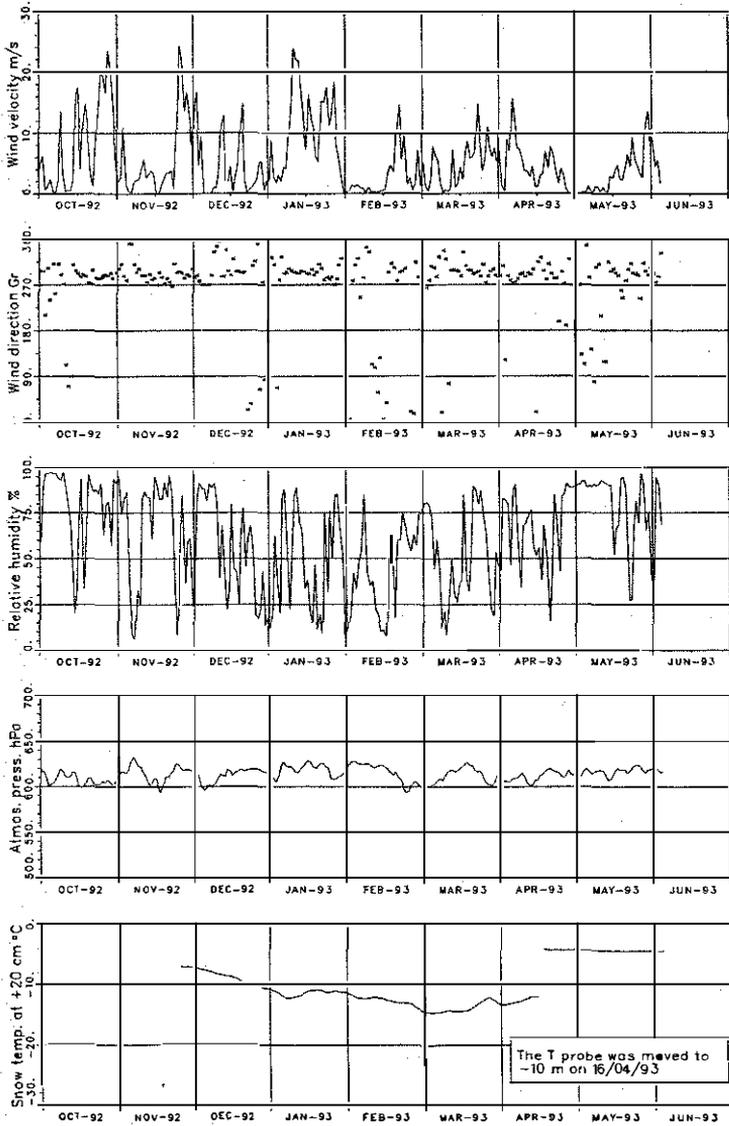


Fig. 3b - Grafici dei dati raccolti dalla stazione meteorologica di Colle Vincent (AO) nel periodo ottobre 92 - giugno 93

Per prima cosa si provvederà all'esecuzione del rilievo radar sul ghiacciaio del Lys, che presenta notevoli difficoltà di accesso e di percorrenza nella parte seraccata, il superamento di pendenze notevoli, ecc., e che è stato programmato con l'impiego di una apparecchiatura applicata alla sospensione baricentrica di un elicottero, la cui posizione verrà georeferenziata mediante uno strumento di navigazione GPS con correzione differenziale.

I risultati della prospezione, essenzialmente le isolinee della topografia del fondo potranno venire acquisite in formato digitale ed associate alla restituzione cartografica per le elaborazioni volumetriche.

## 5.0 Risultati del progetto ALPTRAC

In via preliminare vi è da segnalare la forte dipendenza dell'attendibilità dei risultati scientifici dalla messa a punto di adeguate metodologie di prelievo, trattamento ed analisi di campioni di neve stagionale che evitino ogni possibile contaminazione dei campioni. Le procedure sono state adeguatamente testate mediante intercalibrazione con gli altri laboratori aderenti allo stesso Progetto, ed in conformità a tali procedure tutti gli strumenti ed apparecchiature sono stati precedentemente decontaminati in laboratorio e conservati protetti fino al momento dell'uso (Fig. 5).

Il campionamento integrale del manto nevoso viene di norma effettuato alla fine del periodo di accumulo e prima che la temperatura dell'aria raggiunga, anche episodicamente, valori al di sopra della temperatura di fusione; le modalità prevedono la preparazione di una trincea orientata con il lato più lungo secondo l'asse E-W, che deve raggiungere il livello dello strato autunnale precedente. Tutte le operazioni, dall'analisi stratigrafica della neve (condotta secondo la procedura AINEVA (Cagnati, 1989)) al campionamento vero e proprio e la

misura delle densità degli strati devono essere condotte sulla parete in ombra della buca, che deve essere opportunamente preparata, evitando il contatto della massa nevosa con oggetti diversi da quelli preparati appositamente per il campionamento.

Il prelievo viene effettuato, strato per strato, mediante un campionatore a forma di cassetta rettangolare in acciaio inossidabile e con bordi taglienti. I campioni, sigillati in sacchetti di plastica, vengono riposti direttamente sul sito di campionamento in un freezer preraffreddato, con il quale vengono trasportati poi fino al laboratorio di analisi, nel quale possono essere conservati anche per un lungo periodo in camera fredda. Contemporaneamente presso la diga del Gabiet venivano raccolti mediante un campionatore di sola pioggia (wet-only) i campioni delle singole nevicate, evento per evento, e conservati in frigorifero.

Le metodologie analitiche impiegate per ciascuna specie ionica prevedono l'uso di apparecchiature chimico-fisiche automatiche, e consentono elevatissime sensibilità (qualche ppb).

In questo modo si ottengono le concentrazioni di sostanze contenute in ciascun strato unitario del manto nevoso (5 o 10 cm di spessore a seconda dell'altezza del manto), che può venire associato, attraverso l'interpretazione di informazioni diverse (composizione chimica, stratigrafia della neve, registrazione dei dati meteorologici) con altri strati per identificare l'evento di deposizione cui questa pila di strati appartiene. Una volta nota la data della deposizione, attraverso una simulazione matematica a ritroso di un modello di circolazione atmosferica, potrà essere identificata la traiettoria percorsa dalle masse d'aria che hanno veicolato, nel periodo precedente, quella deposizione.

Il prodotto della concentrazione per il contenuto in acqua di ciascuno strato (calcolato attraverso la densità) dà il carico ionico dello strato, che può essere combinato in vari modi con gli altri per interpretare le caratteristiche del sito rispetto alle deposizioni inquinanti.

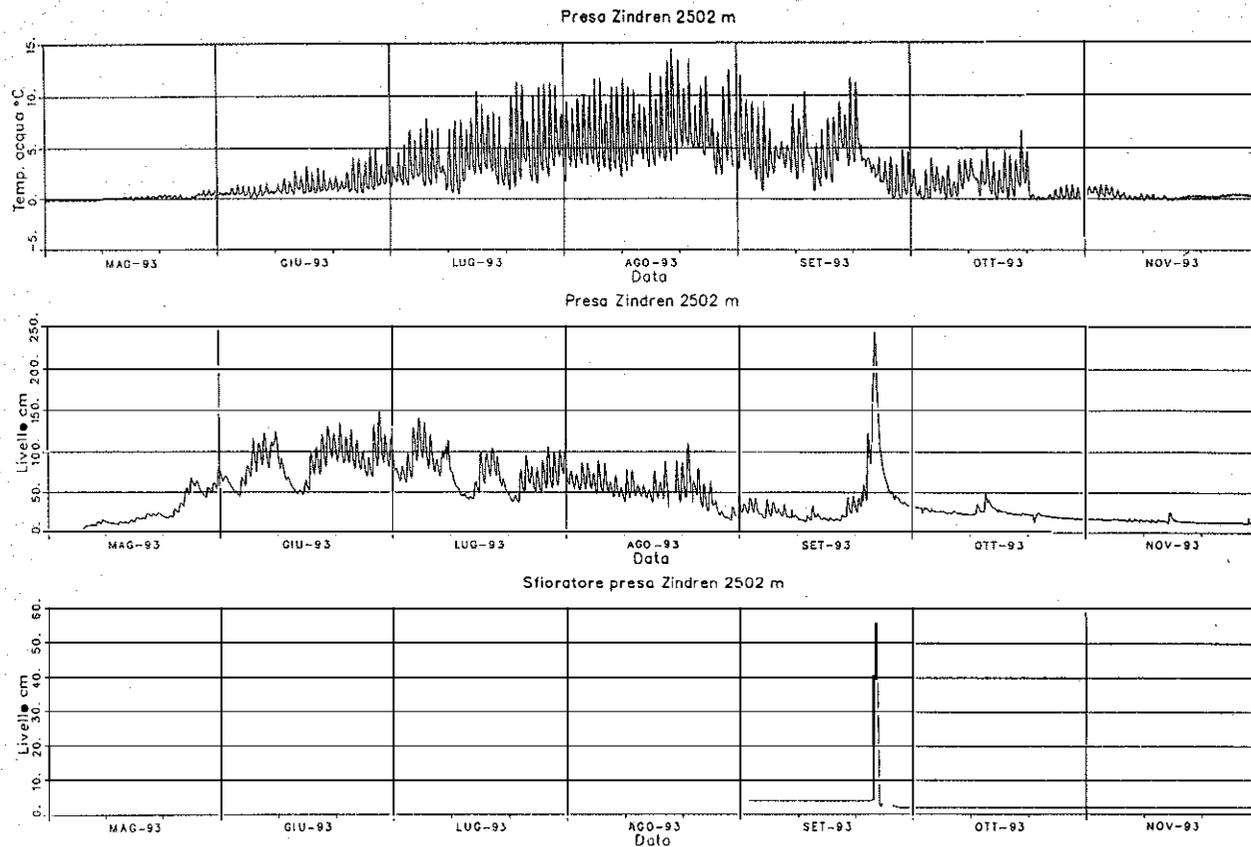


Fig. 4 - Registrazione della temperatura dell'acqua e del livello idrometrico alla presa ed allo sfioratore sul Rio Moos a Z'Indren nel 1993

## 5.1 Interpretazione dei valori delle deposizioni totali

La somma dei carichi di ciascuna specie ionica di tutti gli strati dà il valore delle deposizioni totali; per quanto riguarda l'interpretazione dei dati ottenuti dai campionamenti di Colle Vincent bisogna tenere presente che le deposizioni in grado di accumulare sono prevalentemente quelle che hanno luogo nel periodo aprile-maggio, al contrario di quelle invernali o primaverili che sono invece più scarse e caratterizzate da scarsa resistenza all'erosione.

Le analisi sulle deposizioni nevose di Colle Vincent, che si riferiscono ai campionamenti condotti nel periodo 1992-94 (Tab. 5), evidenziano forti differenze interannuali a causa di eventi di deposizione particolarmente concentrate. I rapporti delle concentrazioni nitrati/solfati misurate sui campioni di Colle Vincent sono inferiori a quello della media dei rapporti osservati sugli altri siti della regione Monte Rosa-Jungfrauoch, che sta ad indicare una più ridotta incidenza delle sorgenti antropiche.

## 5.2 Stima delle caratteristiche di fondo delle deposizioni

Attraverso una opportuna scelta di eventi di precipitazioni nevose la cui composizione non risulti influenzata da contributo di inquinanti, si possono ottenere informazioni circa i valori di concentrazione ionica che possono essere considerati rappresentativi di eventi non perturbati da fenomeni di trasporto a lunga distanza (come nel caso di deposizioni di polveri sahariane) o di trasporto a breve distanza da sorgenti di inquinamento distribuite o localizzate in siti a più bassa elevazione.

Tali valori non sono propriamente i valori di fondo in senso stretto, ma possono essere considerati rappresentativi delle condizioni medie della libera troposfera.

Sono state analizzate le distribuzioni di frequenza cumulata del carico ionico totale e dei carichi delle singole specie ioniche indicatrici dell'inquinamento antropogenico, e, per ogni deposizione annuale sono stati calcolati i valori di carica ionica totale (escludendo  $H^+$  e  $HCO_3^-$ ), la composizione dei campioni è stata organizzata per valore crescente, e sono stati presi in considerazione i campioni compresi nella fascia 5% - 35% di questa successione, calcolando la concentrazione media pesata delle varie specie ioniche. È stato verificato come questo valore medio pesato delle concentrazioni dei campioni compresi nella fascia 5%-35% delle deposizioni totali possa essere considerato una stima (per eccesso) del valore della concentrazione di fondo.

L'analisi della tendenza dei valori di concentrazione di fondo di  $SO_4$ ,  $NO_3$  ed acidità misurati sui tre anni disponibili nelle deposizioni di Colle Vincent, pur nella limitatezza del campione disponibile, mostrano un trend decrescente, conclusione che meriterebbe di essere confermata con ulteriori campionamenti.

Il valore medio del carico ionico calcolato su tutti i campioni di fondo è di circa  $10 \mu Eq l^{-1}$ , dei quali circa  $2 \mu Eq l^{-1}$  provengono dall'acidità,  $2.3 \mu Eq l^{-1}$  (143 ppb) di  $NO_3$  e  $1.4 \mu Eq l^{-1}$  (141 ppb) di  $SO_4$ , questi ultimi risultando in ottimo accordo con quelli riportati in letteratura (Wagenbach et al. (1994), Maupetit et al. (1994)) per lo stesso periodo nei tre siti ALPTRAC contigui.

### 5.3 Valutazione delle deposizioni di eventi particolari

Gli eventi particolari possono essere classificati come: naturali e di natura antropogenica. I primi, che in genere sono dovuti al trasporto di polveri terrigene provenienti dalle regioni sahariane, presentano come carattere distintivo elevate concentrazioni di elementi alcalino-terrosi, mentre i secondi, che vengono originati in

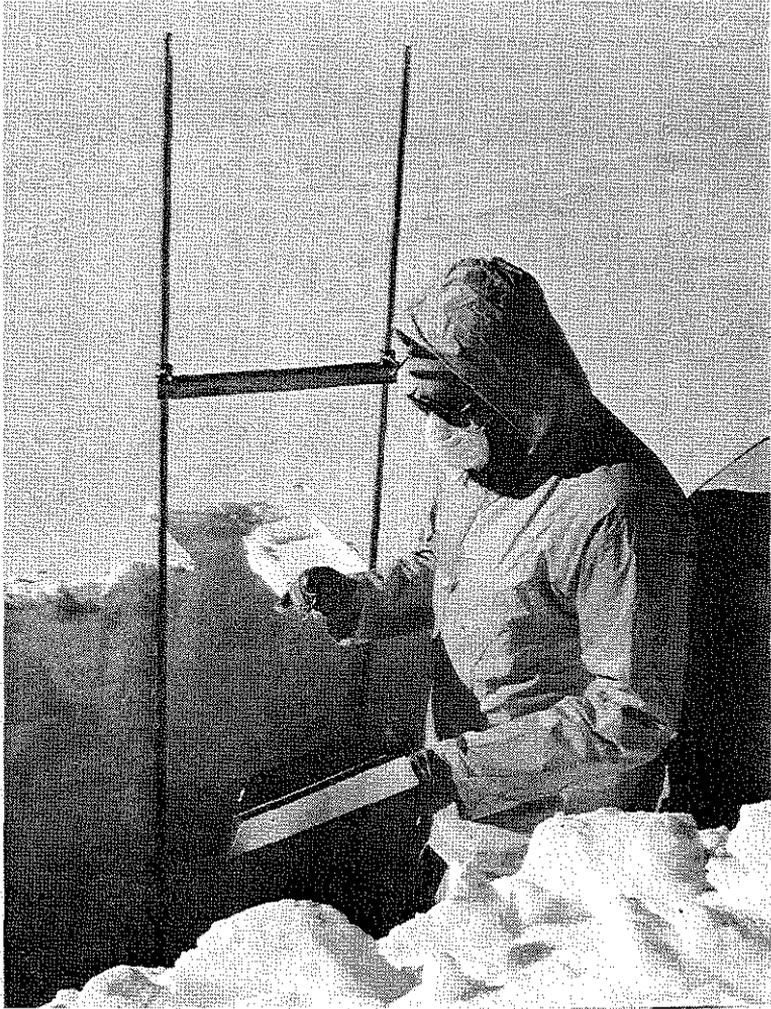


Fig. 5 - Campionamento della neve secondo la procedura ALPTRAC

aree ad alta concentrazione industriale, sono caratterizzati da un arricchimento di  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  e  $\text{NH}_4$ .

La cronologia comparata delle segnalazioni di questi eventi, che peraltro non sono frequenti, è riportata nella Tab. 7. Come si vede, per quanto riguarda siti italiani, è registrato in entrambi un evento nel marzo 1991, evento che è stato osservato peraltro anche in tutti gli altri siti alpini, nell'aprile 1993 è stato rilevato un episodio solo a Colle Vincent, mentre nel 1994 si è avuta segnalazione di deposizioni in entrambi i siti, ma in date differenti.

Nella Tab. 8 sono riportati i carichi ionici delle deposizioni, i valori medi ponderati e i contributi specifici delle deposizioni sahariane rispetto alla deposizione totale, per tutti gli eventi analizzati.

Particolarmente significativo è l'episodio osservato a Colle Vincent nella campagna del 1993: lo strato di deposizione sahariana si trovava ad una altezza di 135 cm dal fondo ed aveva uno spessore di 10 cm, come riportato dal grafico di Fig. 6. Il carico ionico trasportato dalla deposizione rappresenta una frazione dominante di quello contenuto nell'intero spessore del manto nevoso (circa il 70%), mentre l'alcalinità rappresenta circa l'80% dell'alcalinità totale. La composizione di questa deposizione è in buon accordo con il carico ionico delle precipitazioni raccolte con il campionatore wet-only della diga Gabiet il 27/4/93.

Un campione dei residui insolubili provenienti da questa deposizione è stato analizzato per mezzo di un microscopio ottico a diffrazione, ottenendo i seguenti risultati:

quarzo citrino (responsabile della colorazione giallo-pallido)	90%
Feldspati ( $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{CaO}$ , $\text{K}_2\text{O}$ n $\text{Al}_2\text{O}_3$ , m $\text{SiO}_2$ ),	10%
Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e Diorite	

La composizione di questo campione è stata confrontata con quella di un campione di aerosol di sabbia sahariana (dimensione media dei granuli <0.1 micron) proveniente dal deserto tunisino, la cui composizione era: quarzo 30-35%,  $\text{CaCO}_3$  15-20% ed il resto costituito da vari tipi di Feldspati.

Si può quindi ragionevolmente supporre che, nel caso della deposizione di Colle Vincent, il  $\text{CaCO}_3$  e la maggior parte dei Feldspati, che sono più abbondanti nella composizione delle polveri originarie, possano essere stati solubilizzati nel corso della traiettoria spiegando così la forte concentrazione di Ca e di altri elementi alcalino-terrosi che caratterizzano la composizione delle precipitazioni che veicolano le polveri sahariane.

Per quanto riguarda invece l'episodio registrato nel 1994, la deposizione si presentava superficiale e parzialmente erosa dal vento, con le caratteristiche di una deposizione secca. Il confronto tra la composizione dei due strati più elevati e quella del campione di neve superficiale contenente la polvere, escludendo la possibilità che la deposizione secca possa aver diffuso attraverso uno spessore di 20 cm di neve, dimostra come la deposizione secca sia stata preceduta da una deposizione umida di polvere sahariana arricchita di composti antropogenici quali  $\text{NH}_4$  e  $\text{NO}_3$ .

Una stima della composizione della polvere sahariana può essere compiuta sottraendo dalla carica ionica totale del campione (polvere+neve) la carica ionica corrispondente alla massa della sola neve, nell'ipotesi che il soluto abbia la stessa composizione e concentrazione di quello contenuto nel primo strato (Tab. 9).

In questo caso l'apporto di alcalinità è stato particolarmente elevato e tale da far assumere carattere alcalino alla deposizione totale, che altrimenti sarebbe stata acida.

Per quanto riguarda gli episodi di deposizioni di origine antropica, dai diagrammi del carico ionico dei campioni prelevati a Colle Vincent negli anni 1992, 1993 e 1994 si può osservare che nel 1992 gli eventi di deposizione, avvenuti tra la seconda metà di novembre 1991 e l'8 giugno 1992, presentano una concentrazione di inquinanti molto contenuta, senza grosse variazioni, pur evidenziandosi le tracce caratteristiche di singoli eventi di deposizione. Questi sono riconoscibili in quanto

le prime fasi della precipitazione tendono a rimuovere una maggiore quantità di gas e particelle, e quindi gli strati inferiori sono più concentrati rispetto a quelli successivi.

Il prelievo del giugno 1993 di Colle Vincent, rappresentato sempre nell'istogramma di Fig. 7, è caratterizzato anche da uno strato di 20 cm di neve leggermente sporca, seguiti da circa 1 metro di neve aventi caratteristiche simili a quelle già viste per la parte pulita dei campioni 1993. Successivamente il carico ionico rimane sempre elevato, ad iniziare da una deposizione con caratteristiche sahariane, alla quale ne fa seguito una con caratteristiche antropiche (forte presenza di  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  ed acidità), proseguendo poi con campioni anch'essi caratterizzati da apporti di ioni di origine antropica, anche se in concentrazioni leggermente inferiori.

Nei campioni raccolti nel giugno 1994, sempre a Colle Vincent si conserva invece la traccia di un evento autunnale, avvenuto in novembre ma non segnalato in fase di campionamento, ricco in inquinanti, al quale fanno seguito, tra la quota 60 cm e la quota 240 cm (misurare dal fondo della buca), una successione di strati aventi una prima parte molto diluita ed una seconda leggermente più concentrata. Dalla quota 240 cm fino alla superficie è evidente un fenomeno di deposizione alquanto marcato.

A causa delle differenti condizioni meteorologiche cui si riferiscono i campioni esaminati nei tre anni, i valori delle concentrazioni medie ponderate (in  $\mu\text{Eq l}^{-1}$ ) differiscono di anno in anno, come risulta dalla Tab. 6.

## 6.0 Conclusioni

I campionamenti di neve effettuati in alta quota in siti remoti si prestano ad una valutazione delle caratteristiche chimiche della qualità

dell'aria nella libera troposfera, anche se, per motivi di tipo geografico e logistico, non è stato possibile pervenire ad una caratterizzazione continua, limitando le osservazioni al periodo invernale-primaverile.

La variabilità annuale si è rivelata piuttosto elevata, in quanto sporadici eventi di trasporto da medio-lunga distanza sono in grado di alterare profondamente il valore medio delle deposizioni. Tuttavia è possibile identificare questi eventi e detrarre il loro contributo dalla deposizione totale, così da poter effettuare una valutazione delle caratteristiche chimiche che più si avvicinano a quelle di fondo.

Gli episodi a maggiore contributo antropico sono caratterizzati da un più basso rapporto tra la concentrazione di ione nitrato rispetto a quella dello ione solfato. Frequentemente la loro acidità è neutralizzata dalla presenza di elementi alcalino-terrosi. I campioni caratterizzati da un basso contenuto ionico sono sempre acidi per acidità forte (non dovuta cioè allo ione bicarbonato); questa acidità risulta però contenuta e non sembra avere alcuna rilevanza ai fini ambientali, pur rappresentando un segnale di acidificazione dell'atmosfera.

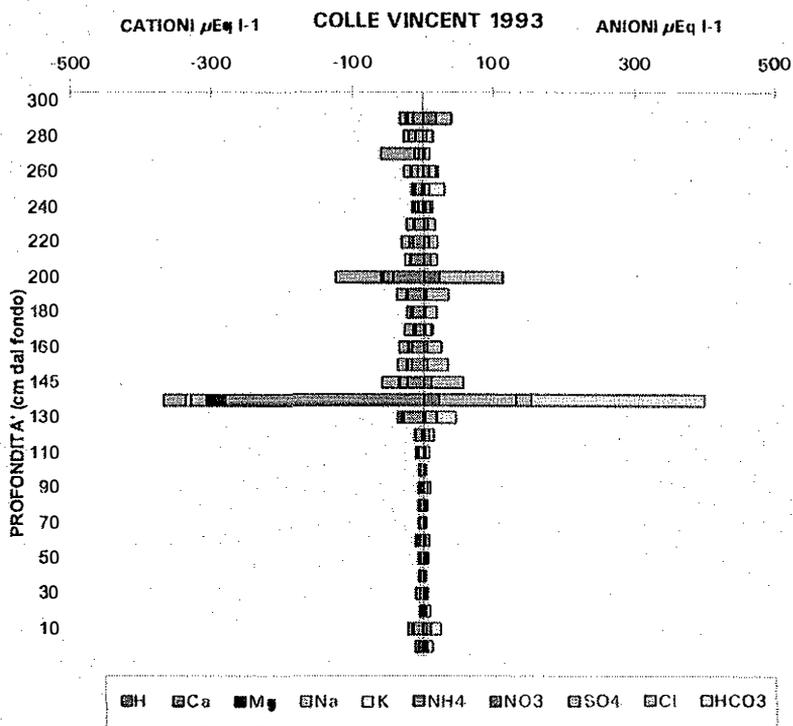


Fig. 6 - Bilancio ionico delle deposizioni campionate a Colle Vincent nel giugno 1993

## BIBLIOGRAFIA

- Anfossi D., Novo A., Rossi G. C., Villone B. (1990): Misure meteorologiche e di deposizione umida di inquinanti in siti alpini di alta quota: metodologie e prospettive. - Workshop su "Effetti degli inquinanti atmosferici e del clima sugli ambienti naturali e sui manufatti" Bressanone oct. 1990.
- Anfossi D., Novo A., Rossi G.C., Villone B. (1990) A contribution to the EUROTRAC subproject ALPTRAC - Campagna 1989. *EUROTRAC Annual Report 1989 Part 3* - Garmisch-Partenkirchen June 1990.
- Cagnati, A. (1984) I servizi valanghe regionali e provinciali dell'arco alpino italiano. *Neve e Valanghe* 0, 7-17.
- Eureka Environmental Project. Eurotrac Subproject High Alpine Aerosol and Snow Chemistry Study. ALPTRAC Proposal prepared by the ALPTRAC steering group, Febr. 1989.
- Maupetit F., Delmas R.J., Novo A., Rossi G. C., et al. (1992): Nitrate and sulphate in alpine glacier snow: preliminary results from 1991 SNO SP campaign. ALPTRAC Meeting Garmisch-Partenkirchen March 1992.
- Maupetit F., Wagenbach D., Weddeling P., Delmas R.J. (1994) Recent chemical and isotopic properties of high altitude cold alpine glaciers. *Atmos. Environ.* (in stampa)
- Nickus U., Kuhn M., Pichlmayer F., Baltensperger U., Delmas R., Gäggeler H.W., Kasper A., Kromp-Kolb H., Maupetit F., Novo A., Preunkert S., Puxbaum H., Rossi G.C., Schöner W., Schwikowski M., Seibert P., Staudinger M., Trockner V., Wagenbach D. (1995) SNO SP: Ion deposition and concentration in high-alpine snowpacks. *Tellus* in press.
- Rossi G. C., Tomasino M. (1991): Impiego dei Sistemi Informativi Territoriali (S.I.T.) nella valutazione della producibilità idroelettrica del manto nevoso e della sensibilità climatica dei bacini nivo-glaciali. VI Convegno Italiano di Glaciologia - Gressoney.
- Rossi G. C. (1992): Climate change impact on an alpine nivoglacial basin: effects on hydropower management. M.I.T. Symposium on "The world at risk: Natural hazards and Climate Change" Cambridge-Mass. (U.S.A.) Jan. 1992
- Wagenbach D., Preunkert S., Schajor R. (1994) Retrospective and present state of the anthropogenic aerosol deposition at a high altitude alpine glacier (Colle Gnifetti 4450 m a.s.l.) *EUROTRAC Annual Report*, Int. Sci. Secr. Garmisch-Partenkirchen July 1994, pp 54-62.

Località	Sestriere	Colle Vincent	Passo Adamè	Careser
Comune	Sauze di Cesana	Gressoney La Tr.	Saviore dell'Ad.	Rabbi
Provincia	Torino	Aosta	Brescia	Trento
Bacino Idrografico	Po- Dora Riparia	Po- Dora Baltea	Po-Sarca	Adige- Noce
Gruppo Orograf.	Roc de Boucher	Monte Rosa	Adamello	Ortles-Cevedale
Ghiacciaio	—	Lys Orient.	Mandrone	Vedr. Careser
Tavoletta I.G.M.	66 I SE	29 I SE	20 III NE	9 II NO
	Colle di Thuras	Alagna Valsesia	Monte Adamello	Cima Sternai
Latitudine	44° 54' 31" N	45° 54' 37" N	46° 08' 53" N	46° 27' 16" N
Longitudine	06° 53' 05" E	07° 51' 40" E	10° 31' 51" E	10° 43' 07" E
Quota m s.l.m.m.	2750	4086	3128	3090
Orientazione del sito	Nord	Sud-Ovest	Nord	Sud
Funzionamento	1990-91	01.11.1991	1.10.1992	29.11.1989

Tab. 1 - Caratteristiche dei siti delle installazioni meteorivometriche ENEL

Località	Alpe Cortlys	Presa Gabiet	La Joux	Ponte di Pietra	Careser Baia
Corso d'acqua	Lys	Rio Indren	Ruitor	Noce Bianco	Rio Careser
Comune	Gressoney L.T.	Gressoney L.T.	La Thuile	Pejo	Pejo
Provincia	Aosta	Aosta	Aosta	Trento	Trento
Bacino Idrografico	Po- Dora Baltea	Po- Dora Baltea	Po- Dora Baltea	Adige-Noce	Adige- Noce
Gruppo Orograf.	Monte Rosa	Monte Rosa	Ruitor	Ortles-Cevedale	Ortles-Cevedale
Ghiacciaio	Lys-Felik	Indren-Gastelet	Ruitor	La Mare	Vedr. Careser
Tavoletta I.G.M.	29 I SO	29 I SE	28 III SO	9 III NE	9 II NO
	S. Jacques	Alagna Valsesia	La Salle	Monte Cevedale	Cima Sternai
Latitudine	45° 52' 42" N	45° 52' 04" N	45° 41' 16" N	46° 25' 29" N	46° 25' 53" N
Longitudine	07° 48' 48" E	07° 51' 17" E	06° 57' 44" E	10° 40' 47" E	10° 42' 26" E
Quota m s.l.m.m.	1997	2502	1605	2283	2640
Inizio funz.	1995	1993	1994	1992	1992

Tab. 2 - Caratteristiche dei siti delle installazioni idrometrografiche ENEL.

	Felik	Lys+Garstelet	Indren	Schkeerpie	Netscho
N. Catasto	I/4L01302001	I/4L01302002	I/4L01302003	I/4L01302004	I/4L01302005
Area (1975) ha	185.8	1182.6	136.9	15.2	27.6
Area (1957) ha	179.0	1143.0	168.0	7.0	19.0
Esposizione bac. acc.	S	S	S	NW	NW
Esposizione bac. abl.	S	SW	S	NW	NW
Lunghezza max m	2450	5600	2400		450
Larghezza max m	1100	4350	1000		700
Quota max m	4175	4530	4130	3040	3090
Quota mediana m	3642	3732	3380		2953
Quota min m	2860	2350	3055	2555	2540
Tipo	montano	vallivo	montano	glacionevato	montano
Alimentazione	diretta	dir.+val.+eol.	dir.+val	valanghe	dir.+val.

Tab. 3 - Caratteristiche dei ghiacciai della Valle di Gressoney - dati del Catasto C.G.I. e W.G.I.

Sensore	posizione	trasdutt.	registraz.	campionamento	
			frequenza	frequenza	durata
Temperatura aria TA	+ 5.50 m	Pt 100	2 h	2 h	istantaneo
Umidità relativa UM	+ 5.50 m	capac.	2 h	2 h	istantaneo
Temperatura neve TN	+ 0.20 m	Pt 100	2 h	2 h	istantaneo
Velocità vento VV	+ 6.00 m	eff. Hall	2 h	5 sec	2 min
Direzione vento DV	+ 6.00 m	potenz.	2 h	5 sec	2 min
Altezza neve HN	+ 5.50 m	Usonic	1 h	2 h	istantaneo
Radiaz. solare incid. RI	+ 5.50 m	cellaMoll	1 h	5 min	1 h
Radiaz. solare rifl. RR	+ 5.50 m	cellaMoll	1 h	5 min	1 h
Pressione atmosf. PA	+ 5.50 m	cella press.	2 h	2 h	istantaneo
Altezza idrometrica HW	- 0.20 m	cella press.	1 h	1 min	1 h
Temperatura acqua TW	- 0.20 m	Pt 100	1 h	1 min	1 h
Tensione batteria BV	interna	—	24 h	2 h	istantaneo
Temp. data-logger TD	interna	—	24 h	2 h	istantaneo

Tab. 4 - Caratteristiche della programmazione dei sensori

Data	9/6/92	16/4/93	4/6/93	7/6/94
spessore del manto (cm)	270	148	295	290
numero di strati identificati	19	5	15	16
livello della deposizione secca (cm)	—	—	201; <b>130</b>	<b>290</b>
data dell'evento di deposizione	—	—	25/4/93	
numero di campioni neve al suolo	27	15	31	28
numero di campione pluv. wet-only	—	22	32	26
equivalente in acqua (mm)	827	458	1052	1115
densità media	0.306	0.308	0.345	0.380
precipit. totali dal 1 ott. (mm)	591.4	547	878	838

Tab. 5 - Caratteristiche dei campionamenti di neve condotti a Colle Vincent .

I valori di livello della deposizione in grassetto corrispondono alla data riportata nella riga sottostante.

total	W.E. mm	Na	NH4	K	Mg	Ca	Cl	NO3	SO4	ACI
<b>1992</b>	827	0.59	3.17	0.32	0.42	2.40	0.72	4.96	7.51	6.28
<b>1993</b>	1052	1.06	9.07	0.39	1.34	14.27	1.23	4.82	15.10	-4.99
<b>1994</b>	1115	2.25	14.20	0.66	2.70	18.53	2.78	13.44	18.44	-3.68

Tab. 6 - Medie pesate delle concentrazioni misurate nelle deposizioni di Colle Vincent ( $\mu\text{eq } l^{-1}$ )

	1989-90							1990-91							1991-92							1992-93							1993-94																			
	O	N	D	J	F	M	A	M	J	O	N	D	J	F	M	A	M	J	O	N	D	J	F	M	A	M	J	O	N	D	J	F	M	A	M	J	O	N	D	J	F	M	A	M	J			
Jungfrauoch						1							1	1												1																						
Colle Gnifetti						1																																										
Colle Vincent	not operating							not operating							not operating							not operating							not operating																			
Sestriere					1								1																																			
La Grave														1																																		
Careser																																																
Sonnblick																																																
Hinterseiferner																																																
Deposizione di tipo sahariano	1							1							1							1							1																			
Deposizione antropogenica	x							x							x							x							x																			
Deposizione di tipo misto	y							y							y							y							y																			

Tab. 7 - Cronologia di eventi di deposizioni particolari riscontrati sui siti del progetto ALPTRAC

	W.E. (mm)	Na	NH <sub>4</sub>	K	Mg	Ca	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	ACI
<b>deposizioni totali (meq m<sup>-2</sup>)</b>										
Careser 1994	1039	1.8	1.4	0.2	1.7	13.5	2.1	6.9	7.5	-2.0
Colle Vincent 1993	1052	1.1	9.5	0.4	1.4	15.0	1.3	5.1	15.9	-5.3
Colle Vincent 1994	1064	2.5	15.8	0.7	3.0	20.7	3.1	15.0	20.6	-4.1
<b>deposizioni sahariane (meq m<sup>-2</sup>)</b>										
Careser 1994	88	0.7	0.5	0.1	0.8	7.9	0.8	1.3	2.2	-5.7
Colle Vincent 1993	34	0.8	1.1	0.3	0.9	9.6	0.7	0.7	3.7	-7.4
Colle Vincent 1994	91	0.4	4.6	0.1	0.5	4.4	0.3	1.9	3.0	-4.8
<b>rapporto dep. sahar./dep. tot. (%)</b>										
Careser 1994	8.5	40.6	38.1	60.9	45.8	58.4	37.4	19.5	29.1	
Colle Vincent 1993	3.3	67.6	11.0	62.6	63.7	64.2	57.0	14.8	23.5	
Colle Vincent 1994	8.6	16.5	29.2	7.9	18.1	21.4	10.3	12.9	14.7	

Tab. 8 - Confronto tra la composizione delle deposizioni di origine sahariana e le deposizioni totali

LUIGI FELOLO

Sez. C.A.I. - U.L.E. Genova

## RICHIESTA DI DIFFUSIONE DELLA CONOSCENZA DELLE VARIAZIONI CLIMATICHE

Questo mio intervento è rivolto a fare una proposta che deriva da una mia esperienza di interessato alla climatologia-storica, ovvero alle variazioni climatiche in epoca storica ma anche protostorica e preistorica.

Quanto dirò è collegabile al precedente intervento della Prof. Cerutti, che ebbi il piacere di ascoltare a Gressoney quando presentò la raccolta di scritti di Umberto Monterin, glaciologo e climatologo valdostano, un vero precursore, da lei curati e pubblicati ad Aosta nel 1987, e che ringrazio ancora in questa occasione per avermi dato quell'opportunità di ascoltarla.

Parlerò prima della mia esperienza.

Nei primi anni '80, dopo che nel precedente ventennio avevo percorso i ghiacciai delle Alpi, da quello della Maledia e a quello dei Forni, entrambi citati questa mattina, mi dedicai più assiduamente ai miei interessi storici e leggendo le cronache scritte da contemporanei del periodo tardo-antico, come Ammiano Marcellino e Giordane, mi sembrò che alcuni degli avvenimenti descrittivi si fossero svolti in condizioni climatiche anomale, o quanto meno diverse dalle attuali.

Per estensione, abituato all'analisi dei rapporti di causa ed effetto nelle vicende umane, prima economiche e quindi storiche, dalle mie mansioni lavorative nell'ambito della finanza internazionale, commercio dei cambi, intravidi rapporti di causa ed effetto fra possibili variazioni climatiche ed eventi tramandatici dalle notizie storiche.

Una definizione di “climatologia-storica”, trovata per la prima volta in “Il Barbarossa” di Franco Cardini, Mondadori, 1985, accompagnata dalla notizia di studi fatti sulla struttura del ghiaccio della Groenlandia per individuare le variazioni climatiche, mi indusse ad informarmi presso quei componenti del mondo accademico che riuscivo ad avvicinare se in qualche università vi era un istituto od un corso per studi di questo genere.

Non riuscendo ad avere informazioni positive fui estremamente grato al prof. Bruno Lombardo dell'Università di Torino, già presidente del Comitato Scientifico Ligure Piemontese Valdostano, quando mi consigliò la lettura di “Tempo di festa, tempo di carestia - Storia del clima dell'anno mille” di Emmanuel Le Roy Ladurie, edito nel 1982 dalla Giulio Einaudi nella collana Paperbacks con il numero 138.

Questo libro è la somma di tutti gli studi di climatologia storica fatti fino al 1967, quando fu pubblicato dalla Flammarion di Parigi con il titolo “Historie du climat depuis l'an mil”. Il titolo italiano è la traduzione di quello usato dalla Allen & Unwin Ltd. di Londra per l'edizione inglese del 1972, riveduta ed accresciuta dall'autore “Times of Feast”, Times of Famine: A History of climate since the year 1000”.

Oggi però sono disponibili in Italia anche i lavori del prof. Mario Pinna dell'Università degli Studi di Pisa, che è il più noto studioso italiano di climatologia storica, fra cui “La storia del clima - Variazioni climatiche e rapporto clima-uomo in età post-glaciale”, Roma, 1984, citato dalla prof. Augusta Vittoria Cerutti nel suo lavoro “Clima e storia in Valle d'Aosta dopo l'anno 1000”, pubblicato sul Bollettino dell'Accademia di Sant'Anselmo ed edito, in estratto, dalla Tipografia Valdostana di Aosta nel 1994.

Nel frattempo avevo già incominciato a raccogliere da quotidiani e periodici articoli riguardanti le variazioni climatiche e a prendere nota di tutte le analoghe notizie esistenti sui miei libri editi sia in Italia che in originale, in altri paesi europei, particolarmente di lingua germanica.

Oggi ho a disposizione una vasta casistica e mi colloco al seguito di quella corrente di studi, di cui fu esemplare rappresentante il francese Fernand Braudel, che considera le variazioni climatiche una delle cause delle vicende umane e quindi del popolamento della montagna, che si è espanso o è regredito in rapporto ai miglioramenti o peggioramenti climatici.

Nel frattempo avevo già inserito osservazioni di climatologia storica in alcuni miei articoli, fra cui quelli pubblicati dalla Rivista Mensile del C.A.I. sul N. 3-4 del 1983 "Popolamento delle alte zone montane in epoche climaticamente favorevoli ed eventi naturali che lo hanno limitato" e sul N. 5 del 1986 "L'abbandono della montagna e le variazioni climatiche".

Osservazioni di climatologia storica le inserii anche nell'articolo di archeoastronomia "Le Montagne Calendario", pubblicato dalla Rivista Mensile del C.A.I. sul N. gennaio-febbraio 1993.

E vengo ora alla mia proposta.

Siccome i ghiacciai sono uno degli indicatori delle variazioni climatiche, ritengo che possa diventare uno degli obbiettivi di questo convegno e dei lavori del Comitato Scientifico Centrale la diffusione del concetto di Climatologia-storica, anche perché i lavori del Gruppo Terre Alte, che hanno come oggetto lo studio e la catalogazione dei segni dell'uomo, arrivano a risultati che della climatologia-storica devono tenere conto.

Cito fra gli ultimi il ritrovamento dello scheletro di un cacciatore mesolitico proveniente da un sito a quota superiore ai 2000 m., durante lo scavo a Mondeval di Sopra.

Sappiamo invece che nell'ultimo millennio l'optimum climatico medievale ha permesso la colonizzazione delle zone più alte delle Alpi precedentemente spopolate, attuata utilizzando i Walser, come fecero signori laici ed ecclesiastici nelle Alpi Centrali, o con speciali concessioni ai coltivatori locali, come fece, nello stesso periodo, il conte del Tirolo.

In Età moderna invece, nel XVII e nel XVIII secolo, la minigiatazione causò l'abbandono degli insediamenti più elevati.

Siccome la climatologia-storica, materia relativamente recente, è ancora troppo poco conosciuta, perfino negli ambienti didattici, ritengo utile la diffusione dei suoi concetti almeno tra i soci del C.A.I.

L'optimum sarebbe un sunto degli studi già assemblati da Ladurie, che si è riferito per buona parte ai ghiacciai delle Alpi.

## ESCURSIONE IN VAL FERRET

Come da programma, il convegno sugli archivi glaciali si è chiuso Domenica tre settembre con una escursione ai ghiacciai della Val Ferret, guidata dalla professoressa Augusta Cerutti che dal 1961 è osservatrice dei ghiacciai del Monte Bianco per conto del Comitato Glaciologico Italiano.

Il numeroso gruppo ha raggiunto con le proprie vetture la piana di Gruetta a 1760 m. di altitudine, dominata dall'ardito versante est delle Grandes Jorasses. Ai piedi della grande parete che ha un a picco più di 1000 m., si apre l'ampio circo del ghiacciaio di Frebouzie. Nei primi decenni del secolo scorso esso era tanto cresciuto in volume e in lunghezza che una potente colata di ghiaccio scendeva dalla soglia del circo fin sul fondovalle della Val Ferret ove restano i grandi massi granitici che la fronte del ghiacciaio portò fin sulla riva destra della Dora, negli immediati pressi della attuale strada carrozzabile. È stato per i partecipanti particolarmente suggestivo ritrovare il punto di vista da cui, intorno al 1820 Gabriel Lory disegnò la veduta del ghiacciaio quando questo si presentava nella sua massima espansione con la grande colata di seracchi che invadeva il fondovalle.

Il gruppo ha poi proseguito a piedi lungo la strada che conduce al rifugio Elena costeggiando le grandi morene storiche del ghiacciaio del Triolet. Una lunga sosta a quota 1850 ha dato modo di osservare questo ghiacciaio e di illustrarne la storia. Esso fu teatro di una gigantesca frana staccatasi nel 1717 dalla cresta spartiacque nel settore nord-occidentale del circo, ove si innalza la guglia che da quell'evento prese il nome "de l'Eboulement" (m 3.590). Il prof. Orombelli, prestigioso geologo dell'Università di Milano, stima il volume della roccia precipi-

tata in 16-20 milioni di metri cubi e la distanza percorsa dalla colata in ben sette chilometri con una velocità che avrebbe potuto aggirarsi attorno ai 100 chilometri all'ora. Questo grandioso evento condizionò tutta l'evoluzione successiva del ghiacciaio. La lingua valliva schiacciata e ricoperta dall'enorme quantità di detrito, con il passare dei decenni, si allungò fino a portare la fronte, in concomitanza con la fase climatica fredda culminata nel 1818, alla quota di soli 1780 m. Così ce lo mostra la bella stampa del Lory, disegnata proprio dalla zona scelta per la nostra tappa. Confrontando sul posto l'antico disegno con il paesaggio attuale, abbiamo potuto constatare da una parte la precisione dell'artista e la sua fedeltà ai particolari tratti dall'ambiente naturale; dall'altra quanto è mutato il paesaggio nei centosettant'anni trascorsi dalla pubblicazione della stampa.

Il ghiacciaio, con il suo lento scorrere, ha trasportato a valle il detrito della frana e a poco a poco lo ha depresso alla fronte e ai lati della lingua valliva formando il grande apparato morenico che avevamo di fronte. Quando le condizioni climatiche divennero non più favorevoli al glacialismo, in particolare nel periodo compreso fra il 1920 e il 1950, le coltri glaciali che scendono dalle quote più elevate ebbero sempre più difficoltà a raggiungere e ad alimentare la lingua valliva che il peso dell'antica frana aveva reso sproporzionatamente lunga. Nel 1938 la cascata di seracchi che univa il circo alimentatore alla lingua valliva si interruppe. La fronte attiva si ritirò a monte della soglia del circo e la lingua valliva, che allora aveva ancora una lunghezza di quasi mille e quattrocento metri, divenne un ammasso immoto di ghiaccio morto, destinato a scomparire. Oggi di questa massa non resta che qualche lembo ai piedi della parete rocciosa, peraltro ben visibile dal nostro punto di osservazione. Tutto l'alveo del vecchio ghiacciaio è ora vuoto ma le grandi e regolarissime morene storiche restano a testimoniare questi due ultimi secoli della storia del ghiacciaio del Triolet.



Triolet - 1984

Proseguiamo il nostro cammino verso il ghiacciaio di Pre de Bar le cui morene deposte nella grande espansione del 1818-1820 sono già dinnanzi a noi in quanto esse si protendono fino a pochi decimetri dall'apparato del Triolet. Confrontiamo queste morene con la rappresentazione cartografica delle lingue vallive dei due ghiacciai nella carta del Mieullet, rilevata intorno al 1860, ai tempi della seconda grande espansione del secolo XIX. Il riscontro è talmente rispondente che davanti ai nostri occhi pare quasi materializzarsi l'antico paesaggio dell'alta Val Ferret, quanto, come raccontano le cronache dell'epoca, l'alta valle era piena di ghiaccio e per raggiungere l'alpeggio di Pre de Bar, nei pressi dell'attuale rifugio Elena, il sentiero doveva inerpicarsi sulle balze del fianco vallivo non raggiunte dalla corrente glaciale.

A quota 1900 entriamo nell'antico alveo glaciale, cosparso di materiale morenico ma già saldamente conquistato dalla vegetazione pioniera che ci offre ancora tardive fioriture di grisantemi alpini e di campanule. Risalendo il letto abbandonato dal ghiacciaio negli ultimi settant'anni, riconosciamo a quota 1970 il cordone morenico formato dall'espansione degli anni '20, poi a quota 2000, quello degli anni '40 ed eccoci al cospetto della fronte attuale, a quota 2.075. Malgrado che da sei anni il ghiacciaio di Pré de Bar, come tutti gli altri del massiccio del Monte Bianco, sia entrato in fase di contrazione e la lingua valliva si sia già accorciata di una settantina di metri, la fronte si presenta ancora possente, con un notevole spessore di ghiaccio. Alla porta, ove sbocca il torrente sub glaciale, le spaccature profonde permettono di vedere le fantastiche luci azzurre, uno dei più accattivanti aspetti del mondo glaciale.

I glaciologi non perdono tempo e armati di cordella metrica eseguono le misurazioni dai capisaldi tradizionali per stabilire l'ampiezza del regresso effettuato dalla fronte nel corso degli ultimi dodici mesi. Si tratta di una ventina di metri nella zona centrale della fronte, circa il doppio di quanto si riscontrava negli anni

passati. Eppure il 1995 è un anno favorevole al glacialismo che ha visto arricchirsi notevolmente le coltri nevose negli alti circhi. Ma le fronti dei ghiacciai vallivi risentono ancora della scarsa alimentazione degli anni passati e solo fra cinque o sei anni potranno essere raggiunti dalle coltri che stanno formandosi in alto.

Tutto il gruppo ha poi raggiunto il Rifugio Elena dove, dopo essersi soffermato sullo spettacolare terrazzo panoramico, ha concluso il riuscitissimo convegno con allegro pranzo sociale a base di polenta e di specialità valdostane.





finito di stampare  
nel mese di novembre 1997  
dalla  
Tipo-litografia  
CHIAIS  
Vercelli  
Via Crispi, 14  
tel. (0161) 25.12.70  
fax (0161) 21.57.13

