



# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

---

XX CICLO DEL  
DOTTORATO DI RICERCA IN  
GEOSTORIA E GEOECONOMIA DELLE REGIONI DI CONFINE

**IL MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI DEL  
*GLOBAL CHANGE* SUI SISTEMI NATURALI.  
INDAGINI E CAMPAGNE GLACIOLOGICHE SUL  
GHIACCIAIO DI FONTANA BIANCA IN ALTO ADIGE.**

DOTTORANDO  
Dott. ANDREA DI LULLO

COORDINATORE DEL COLLEGIO DEI DOCENTI  
CHIAR.MO PROF. *GIANFRANCO BATTISTI*  
*UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE*

TUTORE E RELATORE  
CHIAR.MO PROF. *CLAUDIO ROSSIT*  
*UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE*



# **INDICE**

<b>0.</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	p. 1
-----------	---------------------------	------

**Parte Prima**

**FONDAMENTI TEORICI DI GLACIOLOGIA**

<b>1.</b>	<b>STRUTTURA E FORMAZIONE</b> .....	p. 12
<b>2.</b>	<b>MORFOLOGIE GLACIALI</b> .....	p. 17
2.1	Crepacci .....	p. 17
2.2	Morene e massi erratici .....	p. 18
2.3	Rocce montonate .....	p. 18
2.4	Funghi, Bedier e Mulini .....	p. 19
2.5	<i>Permafrost e Rock glacier</i> .....	p. 20
<b>3.</b>	<b>IL BILANCIO DI MASSA</b> .....	p. 22
3.1	Il metodo glaciologico diretto .....	p. 23
3.2	Il bilancio di massa specifico su un punto del ghiacciaio e sull'intera superficie .....	p. 25
3.3	Il profilo verticale del bilancio di massa.....	p. 27
3.4	La linea di equilibrio .....	p. 27
3.5	<i>Accumulation Area Ratio (AAR)</i> .....	p. 29
3.6	Unità di misura .....	p. 29

**Parte seconda**

**IL GHIACCIAIO DI FONTANA BIANCA**

<b>4.</b>	<b>I GHIACCIAI DELL'ALTO ADIGE</b> .....	p. 31
<b>5.</b>	<b>I GHIACCIAI DELLA VAL D'ULTIMO</b> .....	p. 34
<b>6.</b>	<b>IL GHIACCIAIO DI FONTANA BIANCA</b> .....	p. 36
6.1	Prime ricerche di A. Desio .....	p. 36
6.2	Il catasto dei ghiacciai del 1983 .....	p. 42

6.3	Il catasto dei ghiacciai del 1997 .....	p. 43
6.4	Lo stato attuale .....	p. 47
6.5	Primi bilanci di massa .....	p. 53

### **Parte Terza**

#### **ATTIVITÀ SUL CAMPO**

<b>7.</b>	<b>ANNO IDROLOGICO 2006 - 2007</b> .....	p. 56
<b>8.</b>	<b>ATTIVITÀ INVERNALE</b> .....	p. 57
8.1	Sondaggio .....	p. 57
8.2	Trincea .....	p. 60
<b>9.</b>	<b>ATTIVITÀ ESTIVA</b> .....	p. 63
9.1	Attivazione delle stazioni idrometriche .....	p. 63
9.2	Lettura delle paline ablatometriche .....	p. 67
9.3	Rilievo del contorno glaciale .....	p. 72
9.4	Misure di Portata .....	p. 74
9.5	Chiusura del bilancio .....	p. 76

### **Parte Quarta**

#### **ELABORAZIONE DATI E ANALISI RISULTATI**

<b>10.</b>	<b>ELABORAZIONE DATI</b> .....	p. 79
10.1	Contorno glaciale .....	p. 80
10.2	Calcolo dell'accumulo invernale .....	p. 83
10.3	Il bilancio di massa .....	p. 90
10.4	Analisi idrologica .....	p. 100
10.5	Analisi meteorologica .....	p. 105

<b>11. LE VARIAZIONI VOLUMETRICHE DEL GHIACCIAIO</b> .....	p. 108
<b>12. CONFRONTO TRA I DATI DEL CATASTO 1983 E 1997</b> .....	p. 112
<b>13. VARIAZIONE DELLA CURVA IPSOGRAFICA</b>	p. 115
<b>14. CONSIDERAZIONI CLIMATICHE</b> .....	p. 117
<b>15. CONCLUSIONI</b> .....	p. 123
15.1 World Glacier Monitoring Service .....	p. 123
15.1.1 <i>L'estate dell'anno 2003</i> .....	p. 130
15.2 Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC) .....	p. 131
15.2.1 <i>Breve sintesi del IV Rapporto di Valutazione</i>	P. 133
15.2.2 <i>Proiezioni dei futuri cambiamenti del clima</i>	p. 138
15.3 Considerazioni finali .....	p.142
 <b>ALLEGATI</b> .....	 p. 145
 <b>ELENCO FIGURE</b> .....	 p. 160
 <b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	 p. 168

# **INTRODUZIONE**

Nel sistema climatico la criosfera, che consiste di neve, ghiaccio fluviale e lacustre, ghiaccio marino, calotte glaciali, piattaforme di ghiaccio galleggianti e terreno gelato, è legata intrinsecamente al budget energetico superficiale, al ciclo dell'acqua, al cambiamento del livello del mare e allo scambio di gas in superficie. In termini di massa glaciale e di relativa capacità di riscaldamento, la criosfera è la seconda più grande componente del sistema climatico, dopo l'oceano. Essa integra le variazioni climatiche su un ampio campo di scale temporali, facendone un sensore naturale di variabilità climatica e costituendo una visibile espressione del cambiamento climatico (IPCC, 2007).

Circa 20.000 anni fa le Alpi erano un immenso ghiacciaio. Sporadicamente emergeva qualche cima dalla superficie gelata, che sembravano quasi delle isole di roccia nel mare di ghiaccio. Da quando ebbe

inizio il disgelo, a stadi alterni, la fusione di ghiaccio fu costante. Oggi rimane ben poco di questa immensa distesa di ghiaccio. Nonostante la “piccola era glaciale” che ha caratterizzato le Alpi tra il 1300 e il 1850 d.C., la fase di ritiro è continuato incessantemente, raggiungendo attualmente lo stadio di maggior contrazione degli ultimi 5.000 anni.

Nell’ultimo secolo poi, il rapporto tra l’uomo e la montagna e di conseguenza con il mondo glaciale è cambiato molto rapidamente. Queste aree una volta tradizionalmente repulsive per l’insediamento dell’uomo sono diventati luoghi di svago per lo sci estivo e invernale e l’acqua di fusione dei ghiacciai viene utilizzata, in molti casi, per la produzione di energia idroelettrica. Sovente i sistemi glaciali sono stati esageratamente “ammansiti” e inquinati. Nel loro raggio d’azione sono state costruite case, strade e sono stati direttamente interessati da infrastrutture turistiche, illudendosi di poterli controllare e utilizzare quasi senza limiti, trascurando la loro pericolosità e dimenticando che possono, semplicemente, sciogliersi rendendo spesso inutili tali attrezzature. Oggigiorno la fusione dei ghiacciai, i crolli, gli svuotamenti di laghi effimeri e il regredire del permafrost, causati dal globale aumento della temperatura, minacciano, ancora più di un tempo, un territorio dove l’antropizzazione ha ormai raggiunto livelli elevatissimi (Corti, 2006).

I ghiacciai risentono in misura sensibile delle variazioni climatiche anche lievi e rappresentano per questo motivo un ottimo indicatore sia del cambiamento climatico generale sia degli effetti di quest’ultimo sull’ambiente montano che li ingloba. Ma bisogna anche ricordare che reagiscono in modo complesso alle variabilità climatiche. Il loro progressivo ritiro lascia sul paesaggio montano segni indelebili, come ad esempio le morene, che ci aiutano a ricostruire sia le situazioni glaciali del passato, che quelle climatiche. I ghiacciai conservano nel ghiaccio informazioni sul clima del passato sotto forma di bolle di gas, livelli di fango. La loro funzione di riserva d’acqua è di vitale importanza per la fornitura d’acqua

delle regioni limitrofe. Capire i loro cambiamenti in relazione a quelli climatici è di fondamentale importanza per pianificare in futuro la gestione delle risorse idriche. È necessario conoscere e interpretare questi differenti aspetti per studiare le variazioni delle masse glaciali e la crescita o il ritiro degli stessi.

I ghiacciai sono veri e propri “archivi” delle caratteristiche dell’atmosfera e delle sue modificazioni attribuibili alle attività umane: la neve porta con sé e trattiene informazioni sullo stato dell’atmosfera che vengono conservate negli strati dei ghiacciai perenni. I ghiacciai antartici conservano memoria delle condizioni dell’atmosfera fino a mezzo milione di anni fa, mentre le informazioni conservate nei ghiacciai delle Alpi sono relative ad un arco di tempo più breve e recente.

Le aree montane elevate ed alpine del mondo giocano un ruolo fondamentale e del tutto particolare nei processi idrologici del pianeta e nell’idrologia regionale di tutti i continenti. È nelle regioni alpine che i fenomeni meteorologici, glaciologici, periglaciali e di circolazione dell’acqua hanno le interazioni più intrinseche e complesse, nonché la variabilità in brevi scale spazio – temporali (Roots e Glen, 1982).

In tale processo il Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) creato nel 1988 svolge un ruolo di primo piano, fornendo ai “decisori” politici un’autorevole valutazione scientifica. Durante il 2007 è stato pubblicato il Quarto Rapporto di Valutazione (AR4), dal quale si comprende un evidente nesso di causalità tra consumo di combustibili fossili, determinato da attività antropiche, aumento dei gas serra e aumento della temperatura media globale, con conseguente variazione del clima. Tale rapporto ha costituito il fondamento scientifico per la conferenza delle parti tenutasi a Bali nel dicembre 2007, che ha visto riuniti nell’ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC - *United Nations*

*Framework Convention on Climate Change*) i rappresentanti di oltre 180 paesi.

I ghiacciai alpini sono accreditati di essere, quindi, come si è avuto modo di accennare, utili indicatori delle variazioni climatiche e, al contempo, sono tra le prime “vittime” che ne subiscono i cambiamenti. La riduzione delle superfici e dei volumi glaciali significano non solo una diminuzione delle riserve idriche ed energetiche, ma pure un’ aumentata esposizione di nuove fasce di territorio a rischi ambientali, proprio nei decenni in cui la frequentazione dell’alta montagna si è consolidata, come esigenza turistica e sportiva ormai radicata nella società attuale.

Le recenti riduzioni di massa glaciale sono correlate con l’aumento della temperatura dell’aria in superficie. Questo accade soprattutto per le regioni a nord del 65°N, dove le temperature sono salite di circa il doppio della media globale negli ultimi quaranta anni. Al momento il ghiaccio permanente copre il 10% della superficie terrestre, ma di questo solo una minima parte si trova nelle calotte glaciali e nei ghiacciai, se si escludono l’Antartide e la Groenlandia.

Il calcolo del bilancio di massa costituisce una delle metodologie più affidabili per ottenere informazioni sullo stato di salute dei ghiacciai e per raccordare direttamente la loro evoluzione annuale con i parametri meteorologici. Il bilancio di massa annuale può essere definito come la differenza tra l’accumulo di neve e l’ablazione di neve, nevato e ghiaccio che si verificano nel corso di un anno idrologico sulla superficie di un ghiacciaio (Diolaiuti, 2001). Misurare il bilancio di massa dei ghiacciai è importante per molteplici ragioni. Le variazioni nel tempo della distribuzione del bilancio di massa è il risultato più evidente dei mutamenti nell’accumulo invernale e nell’ablazione estiva sulla superficie dell’intero ghiacciaio. Infatti, monitorando la distribuzione delle variazioni del bilancio di massa nel tempo, si possono ritrovare i cambiamenti climatici. Inoltre, i cambiamenti di volume, anche dei ghiacciai piccoli, possono avere effetti

significativi sul livello del mare (Maier, 1984; Schwitther e Raymond, 1993). Come se non bastasse, i ghiacciai regolano la perdita d'acqua delle zone glaciali, immagazzinandola d'inverno e rilasciandola d'estate.

In tale ottica l'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano si occupa dell'osservazione, del calcolo di alcuni bilanci di massa, dell'aggiornamento del catasto e della cartografia dei ghiacciai dell'Alto Adige. Uno dei metodi più efficienti e rappresentativi per il monitoraggio degli effetti del *global change* sui sistemi naturali è fornito dall'analisi del bilancio di massa dei ghiacciai. Le indagini e le campagne glaciologiche sul ghiacciaio di Fontana Bianca rappresentano quindi una risorsa non comune, dal momento che le osservazioni sono cominciate nei primi anni ottanta.

La presente ricerca non si sarebbe potuta realizzare senza la disponibilità accordatami dalla direttrice dell'Ufficio Idrografico, la dott.ssa Michela Munari, che ha concesso al sottoscritto la possibilità di partecipare alle attività inerenti il ghiacciaio di Fontana Bianca durante l'anno idrologico 2006-2007. In particolare si è rivelata prezioso si è rivelato il sostegno e la diretta collaborazione che mi è stata offerta dall'ing. Roberto Dinale e da Christoph Oberschmied, hanno seguito lo scrivente, sia sul campo che nell'elaborazione dei dati. Per tale motivo, un particolare ringraziamento va indirizzato all'ing. Dinale che ha fornito non solo le basi dati utilizzate per tutte le elaborazioni effettuate e per le cartografie prodotte, ma anche l'ausilio e le competenze richieste da tematiche molto specifiche ed i riferimenti puntuali per i sopralluoghi programmati nell'area d'indagine. Al tempo stesso una sentita gratitudine va al previsore valanghe Oberschmied, che grazie alla sua ventennale esperienza sul campo ha saputo sempre offrire, oltre ad un operatività sul campo senza pari, ottimi spunti di riflessione sulle tematiche affrontate. La sollecitazione per effettuare alcune analisi si è concretizzata grazie a questa diretta collaborazione ed il lavoro è stato seguito con continuità e con interesse partecipativo.

Il lavoro si basa su un piccolo ghiacciaio di circo in alta Val d'Ultimo, nel gruppo dell'Ortles-Cevedale, nella porzione sud occidentale della Provincia dell'Alto Adige. Il nucleo della ricerca è costituito dall'esposizione delle attività svolte sul ghiacciaio durante l'anno idrologico 2006-2007 e dalle relative elaborazioni dei dati sviluppate in ufficio.

La prima parte, di carattere generale, riporta una descrizione di sintesi della geomorfologia glaciale, con particolare attenzione rivolta alle forme morfologiche tipiche dell'ambiente alpino. A conclusione viene descritto inoltre l'argomento centrale della trattazione, vale a dire il bilancio di massa, con la sua definizione ed i parametri di riferimento.

La seconda parte focalizza l'attenzione sull'oggetto di studio, il sistema glaciale di Fontana Bianca. Vengono ripresi i primi studi a tale riguardo del prof. Desio del 1927 e le informazioni presenti nel catasto dei ghiacciai altoatesini del 1983 e del 1997. Viene analizzata quindi altresì la situazione strutturale del ghiacciaio come appariva nell'estate 2007 e, infine, vengono riportati i primi studi sul bilancio di massa effettuati dall'allora direttore dell'ufficio Idrografico, l'ing. P. Valentini. Dal 1991 le campagne di misura si sono succedute con regolarità, in collaborazione tra il suddetto ufficio provinciale di Bolzano e l'Istituto di Geografia dell'Università di Innsbruck, sotto la supervisione del prof. G. Kaser, docente nella struttura austriaca. Dal 2003, le attività sono svolte, invece autonomamente dall'Ufficio Idrografico.

La vera e propria fase operativa viene descritta nella terza parte dell'elaborato, dove vengono esposte, in ordine cronologico, tutte le operazioni effettuate sul campo. Si parte da quelle necessarie per calcolare la quantità di neve accumulatasi durante l'inverno, cioè dalla misura dell'altezza del manto nevoso, per arrivare attraverso i sondaggi, al calcolo della densità della neve per mezzo delle trincee scavate. Durante l'attività estiva si procede all'attivazione delle due stazioni idrometriche, installate in corrispondenza dei due rii che sgorgano dalle rispettive lingue glaciali ed

alle relative misure di portata; si passa quindi alla lettura delle paline ablatometriche e poi al rilievo del contorno glaciale tramite rilievo GPS ed alla chiusura del bilancio con l'ultima lettura di tutte le aste di misura presenti sul ghiacciaio.

Il passaggio successivo, esposto nella quarta parte, consiste nell'elaborazione e sviluppo dei dati raccolti in campagna e nell'analisi dei risultati. Partendo dalla stima della nuova estensione del ghiacciaio, si sono definiti l'accumulo invernale ed il bilancio di massa. Sviluppando i dati raccolti dalle due stazioni idrometriche è stato possibile fare alcune considerazioni importanti di natura idrologica, comparando tali indicazioni con l'analisi meteorologica dell'anno considerato. Altre importanti valutazioni sono state fatte analizzando le variazioni volumetriche dal primo rilievo georadar effettuato nel 1996 e dal confronto dei dati riportati nel catasto del 1983 e del 1997. Studi interessanti sono emersi dall'analisi della variazione della curva ipsografica tra il 1997 ed il 2007 e dal confronto delle serie dei bilanci di massa in ventuno anni di misure.

L'ultima parte riporta una comparazione con i dati pubblicati biannualmente sul Bollettino dei Bilanci di Massa (GMBB - *Glacier Mass Balance Bulletin*) edito dal Servizio Mondiale di Monitoraggio dei Ghiacciai (WGMS - *World Glacier Monitoring Service*) con sede a Zurigo. Su tali bollettini vengono riportati i dati, secondo standard omogenei, dei principali ghiacciai del pianeta soggetti a misurazioni, in modo da rendere possibile un confronto tra i diversi anni ed i diversi ghiacciai. Il ghiacciaio di Fontana Bianca è uno dei sette ghiacciai italiani pubblicati sulla rivista ed uno di quelli che vanta la serie temporale di rilevazioni più lunga. In seguito viene ampliato il campo d'indagine a scala globale, offrendo una breve sintesi del Quarto Rapporto di Valutazione (AR4) emesso dal Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*). In tale ottica si sono solo accennati brevemente gli aspetti più pertinenti con la tematica affrontata, eludendo volutamente un

argomentazione troppo profonda e dispendiosa, in un contesto non appropriato. Sono stati evidenziati infatti, solo le tendenze future dei principali parametri che influenzano direttamente il mondo glaciale, cercando di collegare i risultati ottenuti a livello locale con il *trend* del pianeta.

In ultima analisi non si può certo prevedere quale sarà l'evoluzione futura. O meglio, in tali condizioni di riscaldamento globale e di sofferenza per l'ambiente glaciale, la tendenza è nettamente di ritiro e scioglimento. Ma la storia ci insegna che la scala temporale d'azione delle masse glaciali (cicli di circa 100.000 anni) non è la stessa che regola la vita dell'uomo, e quindi se in questo secolo si stia vivendo una fase di regressione, questo non esclude che in futuro avremo una nuova espansione glaciale. Basterebbe infatti una diminuzione di tre o quattro gradi della temperatura media della terra per innescare una fase di espansione glaciale (Smiraglia, 1992). Comunque si pensi al futuro rimane inalterata l'importanza che rivestono i ghiacciai per comprendere la storia climatica e atmosferica del pianeta e della stessa nostra storia.

Non posso concludere questa introduzione senza ringraziare quanti in varia misura e modalità hanno contribuito alla realizzazione di tale ricerca. In primis il prof. C. Rossit che ha saputo sempre incoraggiarmi e indirizzarmi nei momenti di difficoltà. Il personale dell'Ufficio Idrografico, in particolar modo, Roberto e Christoph, oltre che per la formazione e l'affiancamento, per l'amicizia dimostratami. Tutti gli amici che, famiglia inclusa, in questi anni hanno accompagnato fisicamente e spiritualmente, il sottoscritto nelle "gite in montagna", ed hanno contribuito alla formazione della mia cultura della montagna. Ultima, ma sicuramente non per importanza, Micaela, che ha reso possibile la realizzazione di un sogno....

**Parte Prima**  
**FONDAMENTI TEORICI DI**  
**GLACIOLOGIA**

I ghiacciai sono considerati tra le più belle meraviglie naturali presenti sulla terra. Ai giorni nostri essi ricoprono, assieme alle calotte glaciali, circa un decimo della superficie terrestre (un'area estesa all'incirca quanto l'Africa) ed il loro volume complessivo si aggira tra i 30 e i 35 milioni di chilometri cubi (IPCC, 2007). Per milioni di anni sono stati responsabili di imponenti cambiamenti del paesaggio, scolpendo, modellando o spostando enormi quantità di materiale roccioso. Attraverso il loro grandioso processo erosivo hanno probabilmente plasmato i gruppi montuosi più affascinanti del mondo.

Nei paragrafi seguenti si cercherà di fornire e rivedere brevemente gli elementi basilari della morfologia glaciale delle aree alpine, oggetto di studio della presente ricerca, tralasciando volutamente una trattazione più approfondita e generale.

## 1. STRUTTURA E FORMAZIONE

Un ghiacciaio è una spessa massa di ghiaccio che si forma sulla terraferma in seguito al durevole e progressivo accumulo di neve, che nel tempo si compatta e ricristallizza. Affinché si verifichino le condizioni appena descritte le precipitazioni nevose invernali devono superare la totalità delle “perdite” estive. Queste, fusione ed evaporazione, vengono comprese nel termine ablazione. I presupposti necessari per la formazione dei ghiacciai (nel caso in oggetto) sono la quota elevata, la temperatura bassa e abbondanti precipitazioni nevose. La trasformazione da neve a ghiaccio avviene in molti anni e per passaggi graduali dovuti alla pressione della neve soprastante e a ripetuti e complessi eventi di disgelo e rigelo (Castiglioni, 1979).

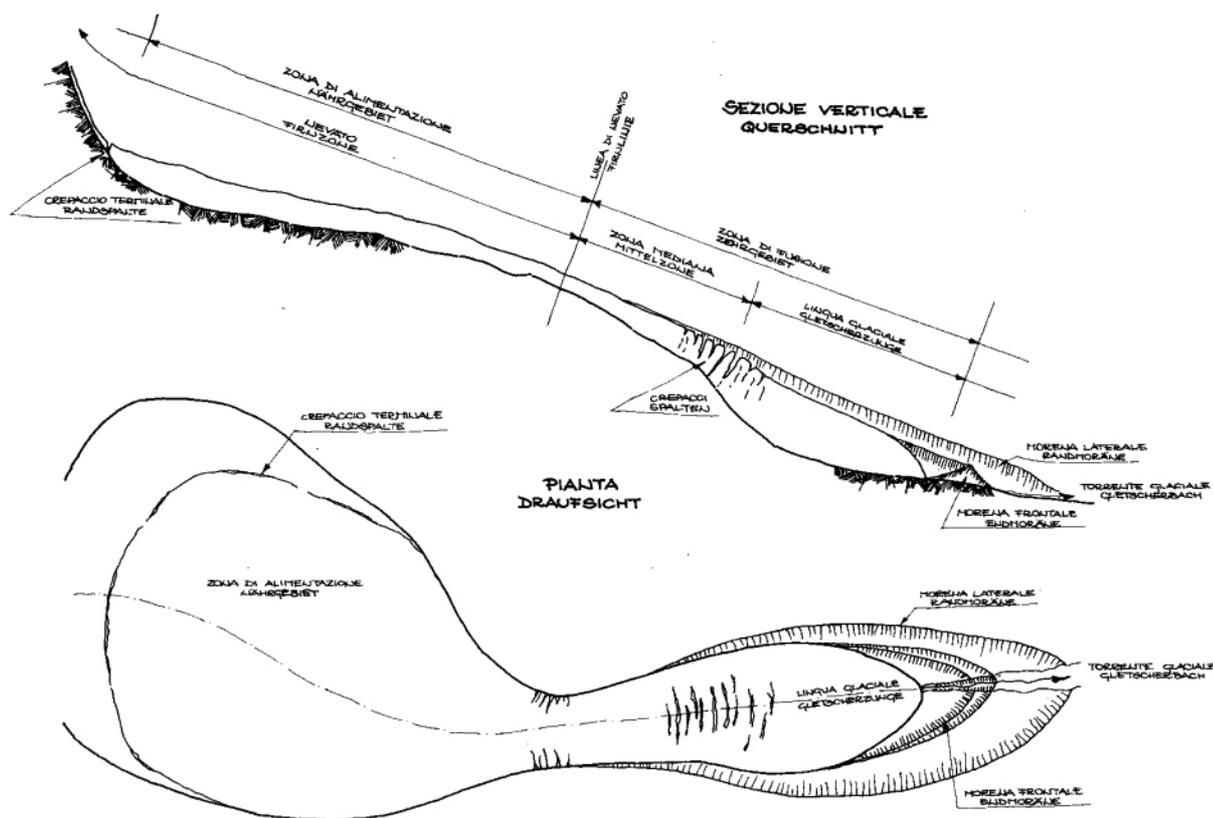


Fig. 1.1 – Sezione verticale e pianta di un tipico apparato montano (Fonte: Valentini, 1985).

L'altra caratteristica fondamentale dei ghiacciai è la componente dinamica degli stessi. Infatti l'apparato glaciale con il movimento gravitativo trasferisce ghiaccio, neve e detriti rocciosi, dalla zona di accumulo verso la zona di ablazione. La velocità di tale spostamento varia da parte a parte all'interno di un ghiacciaio e dipende fortemente dalla topografia del luogo.

Una prima semplice divisione può essere realizzata tra ghiacciai di montagna (o locali), condizionati dalla topografia, e ghiacciai continentali (*inlandis*), le calotte glaciali, non condizionate dalla topografia della roccia sottostante. I ghiacciai montani costituiscono solo l'1% del totale, e si possono a loro volta tradizionalmente distinguere, secondo il Catasto dei Ghiacciai Italiani, in:

- tipo pirenaico: hanno una discreta zona di accumulo ma mancano di una vera e propria lingua; fra questi troviamo la maggior parte dei ghiacciai delle Alpi; possono assumere molte forme a seconda delle condizioni morfologiche del substrato roccioso (ghiacciaio di circo, pianalto, falda, pendio, sella, sommità, canalone, vallone, ecc.);
- tipo alpino: hanno un grande bacino di accumulo e una notevole lingua senza che derivino da rilevanti confluenze;
- tipo himalaiano: derivano dalla confluenza di bacini e colate diverse che formano un'unica colata di discreta lunghezza.

La maggior parte dei ghiacciai italiani sono di tipo montano, con superfici e spessori piuttosto limitati, privi di una lingua ben sviluppata, conglobati in circhi, nicchie, canali e alimentati prevalentemente da valanghe (Smiraglia, 1992).

Un'altra suddivisione, molto importante per comprendere i meccanismi di movimento e di azione morfologica dei ghiacciai, è quella fatta in base alla temperatura. È questo fattore che determina la

trasformazione della neve e dell'acqua in ghiaccio, che regola l'ablazione e la circolazione dell'acqua, che definisce la velocità di scorrimento e l'entità dell'erosione. Si possono così distinguere i "ghiacciai temperati" da quelli "freddi". I primi si trovano costantemente alla temperatura di fusione del ghiaccio, attorno ai  $0^{\circ}\text{C}$ , e vi è presenza d'acqua al loro interno ed alla base. Essendo la temperatura correlata alla pressione, al livello del mare l'acqua pura congela a  $0^{\circ}\text{C}$ ; se invece si aumenta la pressione, la temperatura di congelamento scende. Con spessori glaciali di 1500 m si hanno pressioni tali da far scendere la temperatura di congelamento a  $-1^{\circ}\text{C}$ . Sulle Alpi però non si hanno spessori di tale entità e quindi le temperature di fusione alla base non arrivano a  $-1^{\circ}\text{C}$  (Smiraglia, 1992). Quindi i ghiacciai dell'arco alpino sono temperati. Ad essi si contrappongono i cosiddetti "ghiacciai freddi", che hanno temperature ben al di sotto del punto di fusione e quindi non presentano acqua né in superficie né al loro interno. Sul fondo la roccia e il ghiaccio sono saldati assieme.

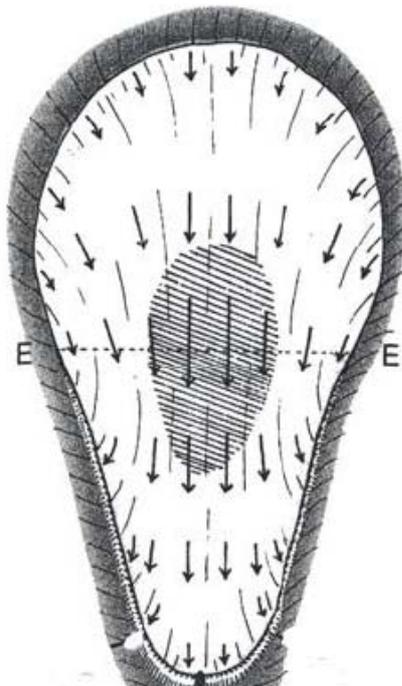


Fig. 1.2 – Distribuzione delle velocità superficiali di un ghiacciaio montano (Fonte: Andersen e Bjorns, 1994).

Il ghiacciaio è anche una massa in movimento ed è questa la vera causa della morfologia glaciale. Il movimento di un ghiacciaio si può assimilare a quello di un fluido molto viscoso e tanto è maggiore lo spessore del ghiacciaio, tanto più forte è la sua forza erosiva. Quindi i ghiacciai si muovono grazie alla spinta della gravità mentre si oppongono al suo movimento l'attrito con il fondo roccioso e gli attriti interni dovuti alle deformazioni che si generano nel muoversi. Le velocità misurate, sulle lingue dei più grandi

ghiacciai Alpini, sono di qualche decina di centimetri al giorno cioè di 50-100 metri all'anno, ma si raggiungono anche velocità superiori nei fiordi della Groenlandia e nell'Himalaia dove si hanno lingue che procedono a ritmi di 1000-1500 metri all'anno. La velocità è maggiore in superficie ed al centro, dove si hanno spessori maggiori, diminuendo via via con la profondità e con l'avvicinarsi ai bordi del flusso (fig. 1.2).

I ghiacciai sono sistemi naturali molto sensibili che reagiscono, con un certo ritardo, con oscillazioni più o meno ampie di volume e di superficie alle influenze ambientali (Bachmann, 1980).

L'esistenza di un ghiacciaio dipende dalla differenza tra i "guadagni" e le "perdite": la quantità di neve che cade e che si accumula nell'arco di un anno deve superare la quantità di quella che viene persa per ablazione, cioè per fusione, sublimazione, trasporto eolico e valanghe di ghiaccio. Se l'accumulo e l'ablazione si compensano il ghiacciaio è in equilibrio e si definisce stazionario; nel caso prevalgano gli apporti si avrà una situazione di espansione della lingua glaciale e, in caso contrario, di ritiro. Se, per quanto riguarda l'accumulo, sono le precipitazioni a determinarne l'incremento, per l'ablazione è l'energia, ed in particolar modo la radiazione solare, a delimitarne la fusione. Sulle Alpi la radiazione solare è responsabile di circa l'80% dei processi di ablazione.

Ogni ghiacciaio può essere suddiviso in due zone. La prima di accumulo della neve viene chiamata bacino collettore e il suo limite inferiore è detto limite delle nevi permanenti e varia in funzione di clima e latitudine. Questa è tipicamente caratterizzata da temperature più basse che consentono alla neve di conservarsi durante l'estate. La seconda è la zona di ablazione, la parte inferiore del ghiacciaio, dove la neve invernale viene sciolta assieme ad uno spessore variabile di ghiaccio. Il confine tra la zona dove prevale l'accumulo con quella dove domina l'ablazione è la linea di equilibrio (ELA - *Equilibrium Line Altitude*). In questo settore il flusso di ghiaccio lungo il ghiacciaio è massimo e maggiore è anche il trasporto.

Il movimento di un ghiacciaio si può assimilare a quello di un fluido molto viscoso e tanto è maggiore lo spessore del ghiacciaio, e inclinata la superficie di scorrimento, tanto più veloce questo scivolerà lungo il pendio. Quindi i ghiacciai si muovono grazie alla spinta della gravità mentre si oppongono al suo movimento l'attrito con il fondo roccioso, e gli attriti interni dovuti alle deformazioni che il ghiaccio deve subire per potersi muovere. Le velocità misurate, sulle lingue dei più grandi ghiacciai alpini, sono di qualche decina di centimetri al giorno cioè di 50-100 metri all'anno.

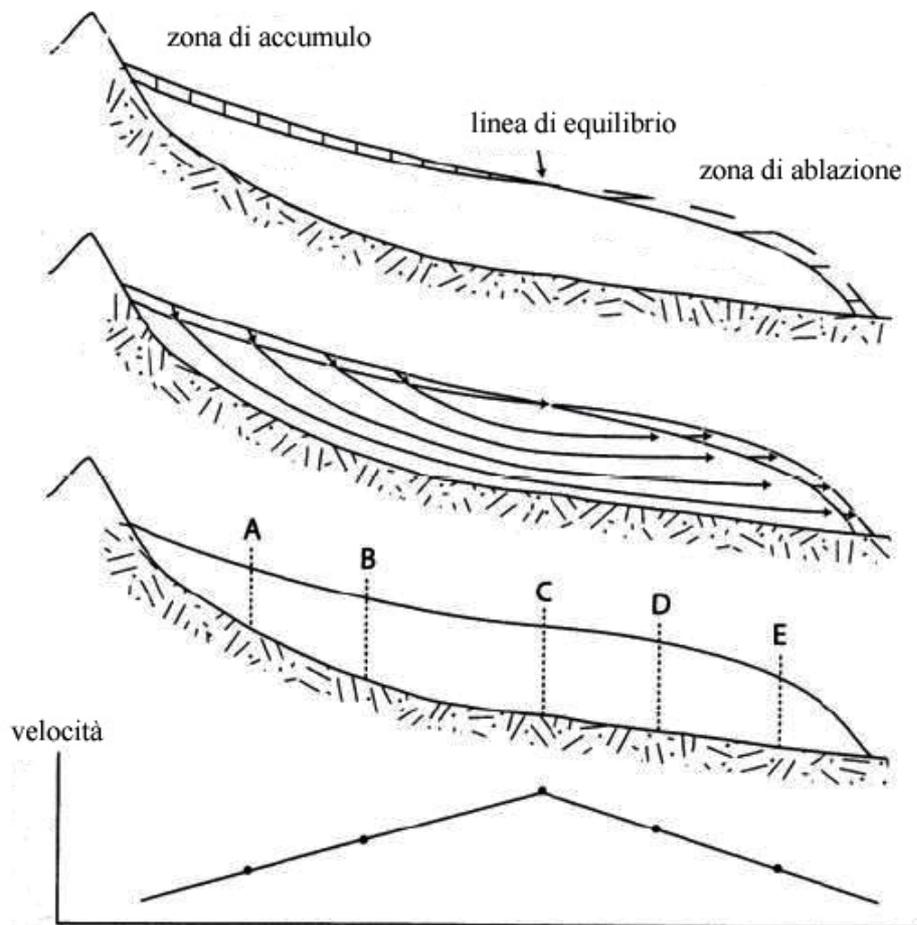


Fig. 1.3 – Profili longitudinali di un ghiacciaio che illustrano: la zona di accumulo e quella di ablazione; le linee di flusso; la velocità in diversi punti (Fonte: Hock & Goodfellow, 2005, ridisegnato).

## 2. MORFOLOGIE GLACIALI

Con l'arrivo dell'estate il mondo glaciale cambia completamente aspetto e la sua fisionomia appare più chiara ed evidente. Le distese immacolate di neve si trasformano a poco a poco in pianori di ghiaccio grigio mettendo a nudo un complesso sistema di tagli e fratture che prima tenevano nascosto. Dossi dolci e lineari appaiono in tutta la loro incoerenza e precisione geometrica disegnando lunghe creste di detrito. Vengono cioè mostrate le forme più classiche e conosciute di morfologie determinate dal flusso dei ghiacciai in atto e quelle lasciate dall'ultima glaciazione.

### 2.1 Crepacci

Il limite della plasticità della massa glaciale e la differenza di velocità all'interno dello stesso, si manifestano quando il ghiacciaio incontra ostacoli e reagisce con forti compressioni e stiramenti. Quando le deformazioni e le conseguenti tensioni di taglio vincono la resistenza del ghiacciaio si aprono profonde fenditure che danno luogo ai crepacci. Queste fessure di origine meccanica si aprono in corrispondenza di ostacoli che si interpongono al moto del ghiacciaio, e in quanto permanenti, anche i crepacci si ripresentano nella stessa posizione con lo stesso orientamento. Poiché la velocità principale del ghiacciaio è quella longitudinale, tali crepacci si sviluppano in senso ortogonale e sono detti trasversali. Altri tipi di crepacci sono quelli marginali, che si formano per attrito con le pareti laterali, mentre quelli terminali si sviluppano ai piedi delle ripide pareti che sovrastano il bacino collettore. Quando si presentano scalini di roccia pronunciati, che determinano una brusca accelerazione, si originano delle fratture articolate in ogni direzione, dando luogo a vere e proprie torri di ghiaccio, i cosiddetti seracchi.

## **2.2 Morene e massi erratici**

La quantità di materiale trasportato dai ghiacciai appare molto più comprensibile osservando le morene. Il detrito incoerente che si sposta nel sistema ghiacciaio deriva da crolli e frane, che scendono dalle pareti circostanti ai circhi e dal materiale raccolto dal fondo dell'alveo glaciale. Queste, a seconda della posizione, vengono definite come superficiale, laterale, mediana, interna o di fondo. Sono caratterizzate da materiale eterogeneo per granulometria, dai grossi blocchi, alle sabbie fino ai limi, con ciottoli sfaccettati, striati ed a spigoli smussati.

I massi erratici sono un'altra testimonianza della presenza di un antico ghiacciaio e della sua capacità di trasportare materiale anche per lunghe distanze. Si tratta di blocchi rocciosi, anche di grosse dimensioni, che si possono trovare in zone lontane dal loro ambiente di formazione. I più conosciuti e curiosi sono stati depositati inseguito al ritiro dei ghiacciai dopo l'ultima glaciazione. Molto noto è quello che si trova sulla cima del Penegal, altopiano sulla strada per il passo della Mendola, che termina a precipizio sulla valle dell'Adige. Sulla sommità, tra due grossi larici presso il belvedere, è visibile un masso erratico proveniente, data la composizione geologica scistoso-cristallina, probabilmente dalle Alpi Venoste, e deposto lì durante l'ultima glaciazione.

## **2.3 Rocce montonate**

Nelle aree ormai deglacciate sono visibili delle rocce lisciate a forma di dosso, allungate nel verso del flusso del ghiacciaio che anticamente le ricopriva. Queste possono avere dimensioni che vanno dal metro a qualche centinaia di metri. Tali forme sono il risultato dell'esarazione di fondo del ghiacciaio, dovute all'azione sinergica dell'effetto abrasivo e dello

sradicamento (*quarrying*). Infatti, queste si presentano, in profilo longitudinale, arrotondate sul lato rivolto a monte e ripide e scabre su quello a valle. Sulla loro superficie sono inoltre visibili scannellature e striature dovute all'azione abrasiva dei detriti trasportati dal ghiacciaio, che unita ai fenomeni di percolazione dell'acqua sub-glaciale e al fenomeno di gelo e rigelo, ne determinano la frantumazione.

#### **2.4 Funghi, Bedier e Mulini.**

I funghi sono il frutto di un'ablazione differenziale, e si trovano tipicamente nel bacino ablatore. Si creano come risposta al rallentamento della fusione, grazie alla presenza di una lastra o un blocco di roccia sul ghiaccio. Questa diversità di scioglimento eleva a guisa di fungo, appunto, il masso rispetto all'area circostante. Sono strutture temporanee, perché destinate comunque a sciogliersi e a cadere verso sud, dove è prevalente l'azione dell'irraggiamento solare.

Durante l'estate nel bacino ablatore, le acque di fusione superficiali, danno vita a morfologie glaciali particolari come le *bedieres* che sono canali di ruscellamento preferenziale delle acque di scioglimento che incidono la massa glaciale, anche per alcuni metri di profondità, sviluppandosi con un andamento meandriforme. Da sottolineare che i solchi delle acque di fusione, contrariamente alla superficie del ghiacciaio, sono lisci come uno specchio (Bachmann, 1980).

Lo scorrimento superficiale di queste acque finisce spesso in cavità verticali, detti mulini. Si aprono soprattutto su lingue glaciali estese, a scarsa pendenza e poco crepacciate. Questi hanno origine quando le acque di fusione superficiale (ablazione) riescono ad insinuarsi all'interno di fessure nel ghiaccio e ad instaurare moti circolari che assumono grande capacità di

erosione. Sulle Alpi, queste cavità verticali possono raggiungere diametri consistenti, che arrivano anche ai 10 metri.

## 2.5 *Permafrost e Rock glacier*

Con il termine *permafrost* si indica la porzione di terreno permanentemente ghiacciato, a causa delle temperature medie dell'aria molto basse. Definito come terreno gelato per almeno due anni consecutivi, rappresenta un elemento importante, anche se poco evidente, della criosfera. Al di là delle terre alle "alte latitudini" (Canada, zone siberiane, Alaska), il *permafrost* è presente solo localmente con spessori modesti, come nel caso delle Alpi. A causa del riscaldamento climatico globale non si ritirano solo i ghiacciai, ma si scioglie sempre più anche il ghiaccio delle zone di *permafrost*, per cui una delle nostre riserve di acqua potabile diminuisce ed il materiale sciolto d'alta montagna si destabilizza sempre di più. Frane di crollo, caduta massi e colate detritiche ne sono la conseguenza.

I *rock glacier* o ghiacciai di roccia, ricordano nella loro forma allungata con struttura lobata le lingue glaciali. Sono caratterizzati da un lento movimento verso valle, simile alle colate laviche, e dalla totale copertura detritica e generalmente terminano con una ripida scarpata disposta ad arco convesso. Tra gli studiosi più accreditati vi è chi sostiene che i *rock glacier* deriverebbero da ghiacciai ricoperti di abbondante detrito caduto dalle pareti laterali (*ice core rock glacier*), mentre altri invece ritengono indipendente dal ghiacciaio la loro formazione, che avrebbe origine dalla cementazione di detrito con ghiaccio interstiziale (*ice cemented rock glacier*). Questa seconda ipotesi considererebbe, dunque, i ghiacciai di roccia semovente come un'espressione del *permafrost* alpino. Si può affermare comunque con certezza che questi costituiscono senza dubbio un

elemento ricorrente che caratterizza il paesaggio alpino, poiché ad una primo censimento se ne contano circa un migliaio (Smiraglia, 1992).

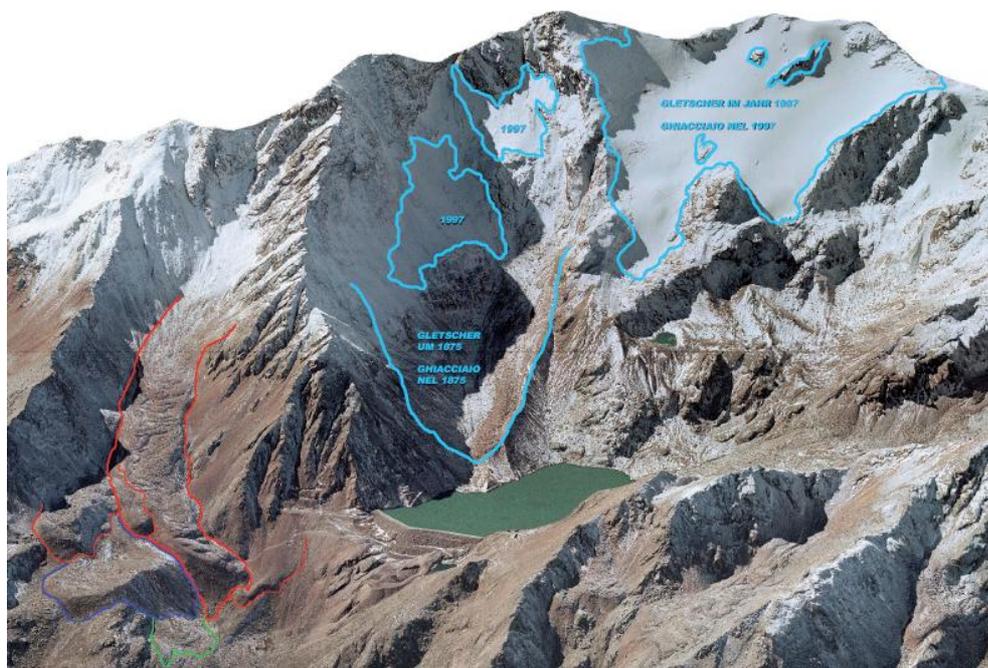


Fig. 2.1 – Visione tridimensionale del bacino dove sorge il ghiacciaio di Fontana Bianca. In basso a sinistra è visibile un *rock glacier* (Fonte: Ufficio Geologico della Provincia Autonoma di Bolzano).

### 3. IL BILANCIO DI MASSA

Nella complessa catena di processi che collega il clima e i ghiacciai, il bilancio di massa è l'elemento più direttamente correlabile con le variazioni delle condizioni dell'atmosfera (IAHS, 1991).

Il bilancio di massa di un ghiacciaio può essere determinato o approssimato attraverso vari metodi che devono essere adattati al clima e all'idrologia di una particolare area glaciale. Di seguito sono riportati i più comuni e più usati; nel paragrafo successivo si affronterà in maniera specifica il metodo glaciologico diretto, utilizzato per le analisi condotte in questa ricerca.

Il metodo geodetico permette la stima della variazione di volume mediante l'utilizzo di modelli digitali del terreno, ricavati da immagini satellitari, da foto aeree e recentemente da rilievi con il laserscan<sup>1</sup>. Confrontando i dati di due differenti momenti si è in grado di calcolare la differenze di volume. Questo metodo è utilizzato per calcolare il bilancio di massa su lunghi periodi, per esempio ad intervalli di 10 anni, e magari costituire una verifica al metodo glaciologico diretto. Risulta tuttavia molto dispendioso e impegnativo da organizzare.

Il metodo idrologico considera il ghiacciaio come un serbatoio d'acqua e analizza il flusso durante un anno. Considerando il bilancio di massa l'incognita da calcolare si ha che:

---

<sup>1</sup> Il laser scanner terrestre è una tecnologia che è stata introdotta di recente nel campo del rilevamento; l'apparecchiatura permette di ricostruire modelli tridimensionali attraverso la registrazione di scansioni singole o multiple. La strumentazione, generando un impulso laser infrarosso, registra parte del segnale riflesso dell'oggetto colpito. L'unità di misurazione del tempo rileva l'intervallo tra l'emissione del segnale e l'impulso di ritorno, essendo nota la direzione del raggio nello spazio rispetto ad un sistema di riferimento interno allo strumento, ogni singolo punto viene posizionato con coordinate x, y, z relative, registrandone anche l'intensità di segnale in funzione della riflettività del materiale colpito. Le scansioni permettono così di acquisire in tempi brevi milioni di punti in modo automatico, coniugando alla velocità d'esecuzione un'elevata accuratezza.

$$B = P - Q - E \pm \Delta S \quad (X)$$

B	bilancio di massa
P	precipitazioni
Q	deflussi
E	evapotraspirazione / sublimazione
$\Delta S$	altri termini

Per un'analisi di tale metodo si rimanda al capitolo 10.4, dove si affronta tale problematica in riferimento al ghiacciaio di Fontana Bianca.

### **3.1 Il metodo glaciologico diretto**

Un metodo molto usato è il cosiddetto “metodo glaciologico diretto” basato sulla misura annuale dell’accumulo e dell’ablazione sul ghiacciaio (Østrem, 1991), mediante rilevamenti diretti su punti localizzati strategicamente sull’intero ghiacciaio; è ideale a breve termine e per aree piuttosto contenute (Kuhn, 2003). Ormai ampiamente utilizzato, consiste nel calcolarne il bilancio di massa, cioè la somma algebrica fra l’entità degli accumuli e l’entità dell’ablazione (Zanon, 1965). Si ritiene quindi che l’applicazione del metodo sia altamente consigliabile almeno su ghiacciai campione, anche perchè il costo complessivo della ricerca è modesto, se confrontato con altri metodi largamente utilizzati, quale la aerofotogrammetria (Diolaiuti et al., 2001). Gli errori che possono ridurre la precisione di questo metodo sono numerosi. Alcuni sono direttamente legati alle misure effettuate sul terreno (ad esempio, scarsa significatività dei siti ove sono collocate le paline, oppure il loro numero troppo ridotto, errori di lettura dell’accumulo e dell’ablazione, non coincidenza delle date in cui vengono effettuate le misure con il massimo dell’accumulo e il massimo

dell'ablazione, etc.), altri derivano dall'elaborazione dei dati raccolti (carte topografiche di base poco precise, estrapolazione troppo approssimativa dei valori puntuali delle paline alle aree circostanti, ecc.).

Il bilancio di massa è dato dalla differenza tra la quantità di neve e ghiaccio (precipitazioni, valanghe) accumulato durante il periodo invernale e la quantità di neve e ghiaccio persi (fusione, sublimazione, valanghe di ghiaccio e deflazione eolica) dal ghiacciaio preso in esame in un intervallo di tempo ben definito. Viene utilizzato l'anno idrologico, che, convenzionalmente, inizia il 1 ottobre e termina il 30 settembre successivo, condizioni climatiche permettendo. Le variazioni climatiche coinvolgono direttamente la temperatura e le precipitazioni, che influiscono a loro volta sul bilancio di massa. Banalmente un ghiacciaio con un prolungato bilancio negativo è fuori equilibrio e si ritirerà; al contrario quello con un costante bilancio positivo si espanderà.

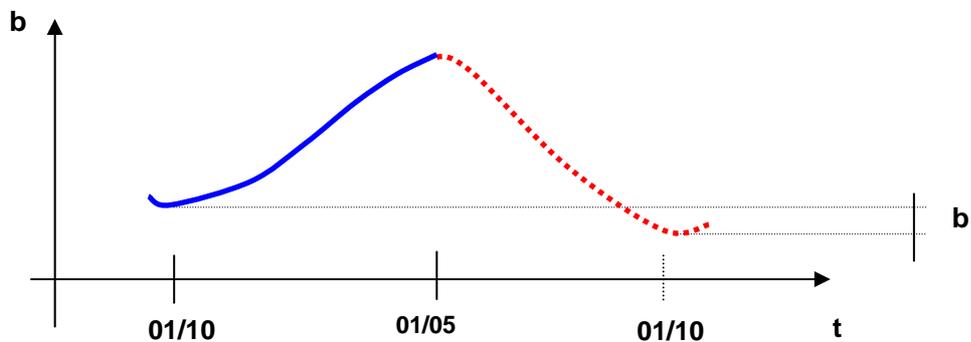


Fig. 3.1 – L'andamento tipico di bilancio di massa in un anno idrologico: con la linea continua è rappresentato l'accumulo, con quella puntinata l'ablazione.  $b$  rappresenta il bilancio di massa.

Il bilancio invernale rappresenta la precipitazione nevosa accumulata su di un ghiacciaio nel corso dell'inverno. Alla distribuzione della neve caduta contribuiscono attività eolica e valanghiva. In senso idrologico stretto l'inverno comincia il primo ottobre e finisce il 30 aprile di ciascun anno idrologico, in alta montagna tuttavia non sempre è possibile

attenersi a tali scadenze. Attorno al 30 aprile, in posizioni del ghiacciaio predefinite vengono scavate opportune trincee nella neve invernale. In questo modo è possibile identificare l'orizzonte della neve autunnale, generalmente più scuro e duro, e misurare la densità della neve. Nota quest'ultima è facilmente calcolabile l'equivalente in acqua del manto nevoso, espresso in  $\text{kg/m}^2$  oppure in millimetri.

Dopo il massimo accumulo primaverile, si procede all'osservazione dello scioglimento (ablazione) del manto nevoso prima e del ghiaccio poi, fintanto che, generalmente a settembre o ad inizio ottobre, non subentra l'accumulo successivo. Riferimento per tali osservazioni sono le cosiddette paline ablatimetriche<sup>2</sup>, aste trivellate nel ghiaccio che con lo scioglimento vengono ad emergere sempre più dallo stesso. L'emersione relativa delle paline moltiplicata per la densità della neve e/o del ghiaccio rappresenta la perdita di massa espressa in  $\text{kg/m}^2$  o mm di colonna d'acqua. La lettura dell'emersione delle paline e lo spessore dell'eventuale neve invernale residua avviene attorno al 30 settembre. Nuovamente, a partire dai valori puntuali vengono estrapolati quelli areali, e definito il bilancio estivo. Dalla differenza tra accumulo invernale e bilancio estivo risulta il bilancio di massa netto annuo del ghiacciaio osservato.

### **3.2 Il bilancio di massa specifico su un punto del ghiacciaio e sull'intera superficie**

Il bilancio di massa di una superficie unitaria di un ghiacciaio coincide con la variazione media di spessore ( $h$ ) di tale porzione di ghiacciaio ed è detto bilancio di massa specifico di tale colonna di ghiaccio.

Detto  $b(P)$  il bilancio di massa specifico in un punto qualsiasi  $P(x,y,z)$  di un ghiacciaio (espresso in metri di equivalente in acqua

---

<sup>2</sup> Cfr. capitolo 9.2 p. 67.

[m WE]), esso può essere quantificato come il risultato dell'integrazione della sua variazione nel tempo:

$$b(P) = \int_t \dot{b}(P) dt$$

Nella pratica delle campagne glaciologiche per ogni punto di misurazione (palina) P, il tempo  $\Delta t$  copre l'intervallo tra due uscite sul campo successive e, quando tale intervallo coincide con un anno idrologico, da questa ultima informazione risulta il bilancio di massa specifico relativo a tale anno idrologico per quel punto (fig. 3.1, pag. 24).

Integrando su tutta la superficie del ghiacciaio  $S$  il bilancio di massa specifico  $b(P)$  si ottiene il bilancio di massa del ghiacciaio stesso:

$$B = \int_t \int_S \dot{b}(P) dt dS = \int_S b(P) dS = \rho \Delta V$$

Questo è solitamente espresso in termini di metri cubi di equivalente in acqua [ $m^3$  WE] oppure di chilogrammi [kg]; in questo ultimo caso moltiplicando la variazione di volume  $\Delta V$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t$  per la densità del ghiacciaio  $\rho$ .

Il bilancio di massa specifico  $b$  è utile per confrontare gli studi glaciologici relativi ad apparati differenti. Detta  $S_G$  la superficie del ghiacciaio esso si calcola come:

$$\bar{b} = \frac{B}{S_G} = \frac{\rho \Delta V}{S_G} = \rho \bar{\Delta h}$$

Tale espressione evidenzia la relazione tra variazione volumetrica  $\Delta V$  e di spessore  $\Delta h$  espressa in metri di equivalente in acqua [m WE] (Kaser et al., 2003).

### 3.3 Il profilo verticale del bilancio di massa

In questa ricerca il bilancio di massa è stato calcolato per intervalli altitudinali ed espresso quindi in funzione della quota. In tale modo è possibile rappresentare la curva del profilo verticale del bilancio di massa (VBP, *Vertical Mass Balance Profile*, fig. 3.2). Tipicamente l'andamento di tale curva rimane molto simile negli'anni, anche se il bilancio di massa varia di volta in volta, mentre cambia il punto di intersezione con l'asse della quota ( $z$ ), che indica la quota in cui il bilancio di massa è uguale a 0.

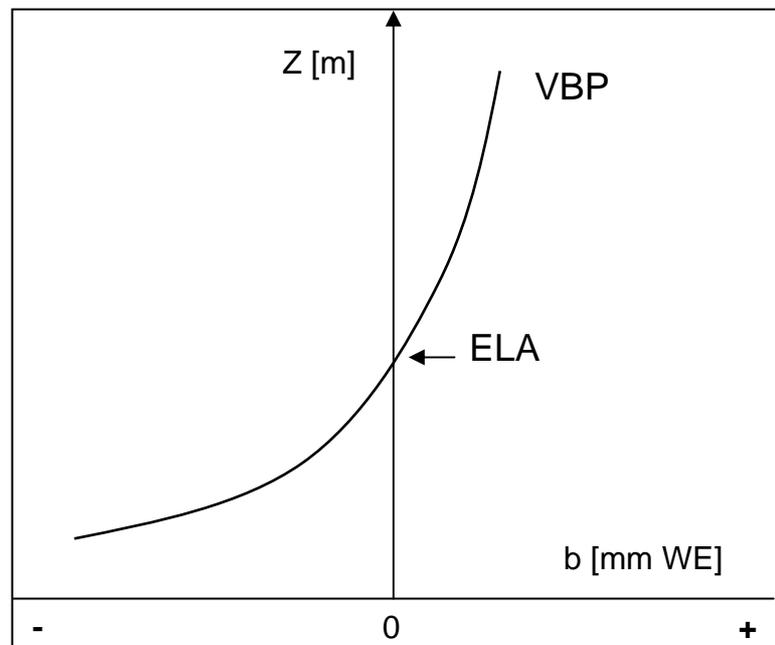


Fig. 3.2 – Il profilo verticale del bilancio di massa (VBP) e la posizione della linea di equilibrio (ELA).

### 3.4 La linea di equilibrio

L'*equilibrium line altitude* (ELA) è la linea altitudinale dove il ghiacciaio è in equilibrio, dove cioè la variazione di massa è zero.

Corrisponde all'intercetta della linea *VBP* con l'asse *z* della quota. Lo spostamento di questa lungo l'asse rappresenta la distribuzione di massa sul ghiacciaio. Essa rappresenta il limite tra la zona di accumulo e quella di ablazione in uno specifico anno idrologico. Per esempio, nel caso questa aumenti, si sposti cioè verso l'alto, una maggior regione del ghiacciaio sarà soggetta ad ablazione e il sistema tenderà al ritiro. Con  $ELA_0$  viene indicata la posizione teorica della linea di equilibrio, calcolata sulla base della curva ipsografica<sup>3</sup>.

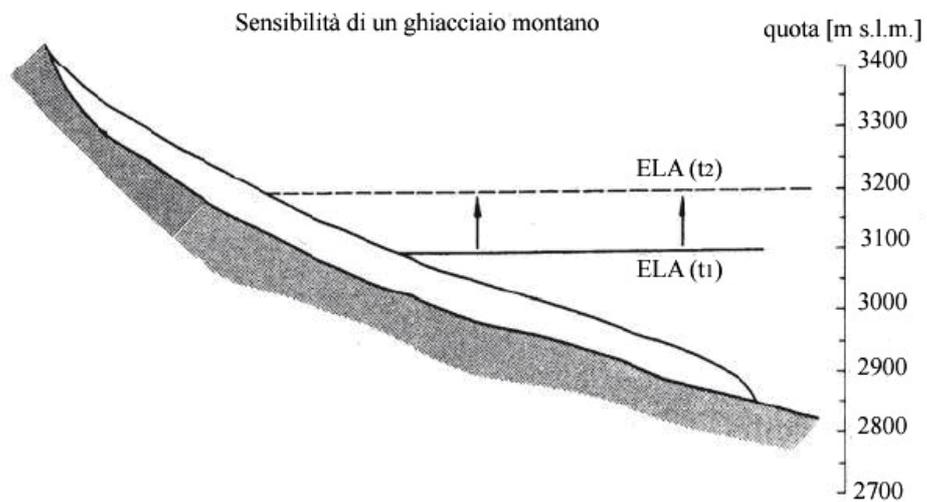


Fig. 3.3 – Effetto di un incremento della quota della linea di equilibrio in un ghiacciaio vallivo (Fonte: Sugden e John, 1984, ridisegnato).

La sensibilità di un ghiacciaio è condizionato dalla sua stessa morfologia, ed è definita come il cambiamento di un fattore in risposta ad una variazione di un parametro di controllo. Per esempio la sensibilità ai cambiamenti di temperatura esprime come il bilancio di massa varia in relazione alle variazioni termiche dell'aria. Ghiacciai piccoli saranno più

<sup>3</sup> Curva indicante la frazione della superficie di un bacino posta al di sopra di una data altitudine. È una rappresentazione cumulativa dei dati, con gli assi delle ordinate e delle ascisse aventi la medesima lunghezza. Ciò consente di confrontare aree con caratteristiche altitudinali ed estensioni diverse.

sensibili, così come quelli più inclinati, poiché uno spostamento anche minimo della ELA coinvolgerà superfici ampie.

### **3.5 Accumulation Area Ratio (AAR)**

L'indice AAR indica il rapporto fra l'area di accumulo ( $S_A$ ) e quella totale del ghiacciaio ( $S_G$ ) ed è anch'esso un ottimo indicatore del bilancio e viene calcolato a fine dell'anno idrologico.

$$AAR = S_A / S_G$$

Secondo Kaser (2003) valori di AAR attorno a 0.6-0.7 (il 60-70% della superficie glaciale è soggetta ad accumulo) sono tipici dei ghiacciai alpini alle medie latitudini ed indicano uno stato stazionario. Risultati inferiori a 0.6 evidenziano un bilancio negativo e conseguentemente quelli superiori a 0.8 un bilancio fortemente positivo (Smiraglia, 1992). Essendo la superficie di accumulo delimitata a valle dalla linea di equilibrio, le due variabili sono direttamente collegate tra loro.

### **3.6 Unità di misura**

Il bilancio di massa viene espresso considerando la massa d'acqua immobilizzata in forma solida nel ghiacciaio stesso (Castiglioni, 1979). Le unità di misura utilizzate per esprimere la variazione media di spessore di una superficie unitaria (bilancio specifico) sono chilogrammi su metro quadro [ $\text{Kg}/\text{m}^2$ ], nel sistema internazionale (S.I), o millimetri di equivalente in acqua [ $\text{mm we}$ ]. Se riferito direttamente alla variazione volumetrica si impiegano i metri cubi di equivalente in acqua [ $\text{m}^3 \text{ we}$ ].

**Parte Seconda**  
**IL GHIACCIAIO DI**  
**FONTANA BIANCA**

#### **4. I GHIACCIAI DELL'ALTO ADIGE**

Un ghiacciaio è il risultato di particolari condizioni climatiche ed al mutare di queste l'apparato glaciale reagisce aumentando oppure diminuendo di superficie. Viceversa, le osservazioni e le ricostruzioni riguardo i mutamenti dei ghiacciai testimoniano l'andamento del clima. Essi rappresentano inoltre una fondamentale riserva d'acqua per molti bacini idrografici dell'arco alpino ed il monitoraggio delle variazioni di forma e di massa degli stessi risulta di particolare importanza anche in funzione della pianificazione delle risorse idriche.

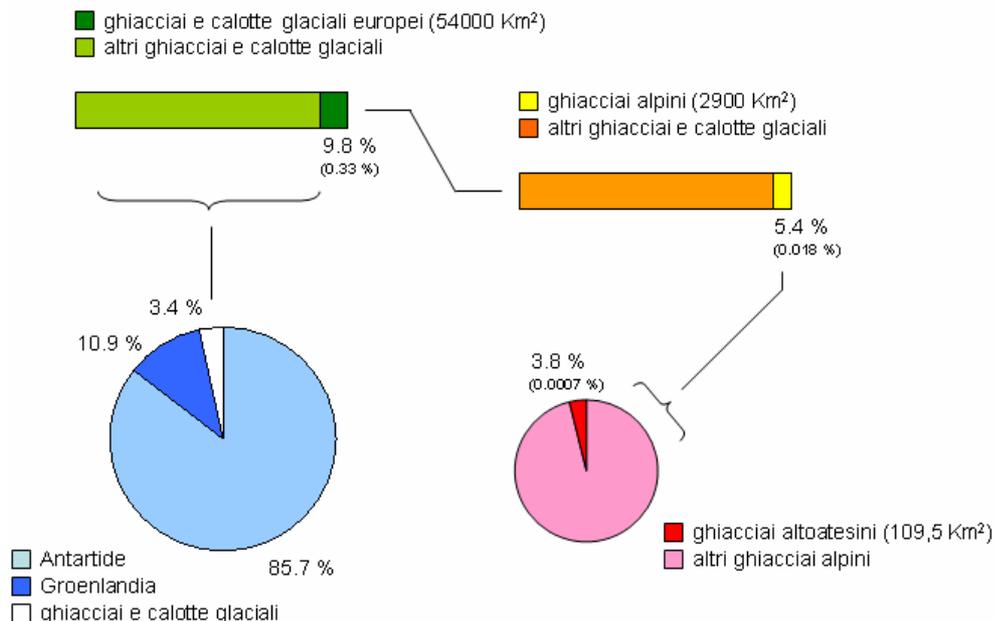


Fig. 4.1 – Distribuzione dei ghiacciai nel mondo (Fonte: IAHS, 1989).

Secondo una stima dell'*International Association of Scientific Hydrology* (IAHS, 1989) la superficie terrestre ricoperta perennemente da ghiacciai e calotte glaciali ammonta a circa 549.056 km<sup>2</sup>. Aggiungendo a tale valore anche Antartide e Groenlandia i ghiacci ricoprono circa 15.86\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>. Da solo, l'Antartide ha, tuttavia, una superficie di 13.59\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> e la Groenlandia di 1.726\*10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>. È quindi visibile che la rimanente superficie ricoperta da calotte glaciali e ghiacciai di montagna su tutto il pianeta risulta circa pari al 3.4 %. Considerato questo 3.4 % pari al 100 %, i ghiacciai europei, incluse l'Islanda e le isole Svalbard, ne rappresentano il 9.8 %, equivalenti a 54.000 km<sup>2</sup> circa. I ghiacciai alpini raggiungono invece circa 2900 km<sup>2</sup>, mentre quelli presenti sulle montagne dell'Alto Adige 109.5 km<sup>2</sup>, ovvero lo 0.2 % di quelli presenti in Europa e lo 0.0007 % in riferimento al mondo (fig. 4.1).

Su 800, dei 160.000 ghiacciai che si stima esistano al mondo (Meier e Bahr, 1996), vengono eseguite misure frontali (IAHS, 1998) e per 50 di essi viene calcolato il bilancio di massa (IUGG, 2005). La maggior parte di

tali ghiacciai si trova sulle Alpi e in Scandinavia. I ghiacciai alpini rappresentano gli apparati osservati da maggior tempo e con maggiore precisione; ad esempio le campagne glaciologiche per la determinazione del bilancio di massa sul Hintereisferner sono iniziati nel 1952, secondi in Europa solo a quelli sullo Storglaciären nella Lapponia svedese.

In Alto Adige gli studi glaciologici sono coordinati dall'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano e si sviluppano a più livelli di dettaglio, dalle misure frontali di avanzamento e/o arretramento delle fronti, alla gestione ed aggiornamento del catasto provinciale dei ghiacciai, alla produzione dei bilanci di massa su alcuni apparati glaciali<sup>4</sup>.

Questa ricerca riguarda il Ghiacciaio di Fontana Bianca (Weissebrunnferner) che occupa la testa della Val d'Ultimo (Ultental).

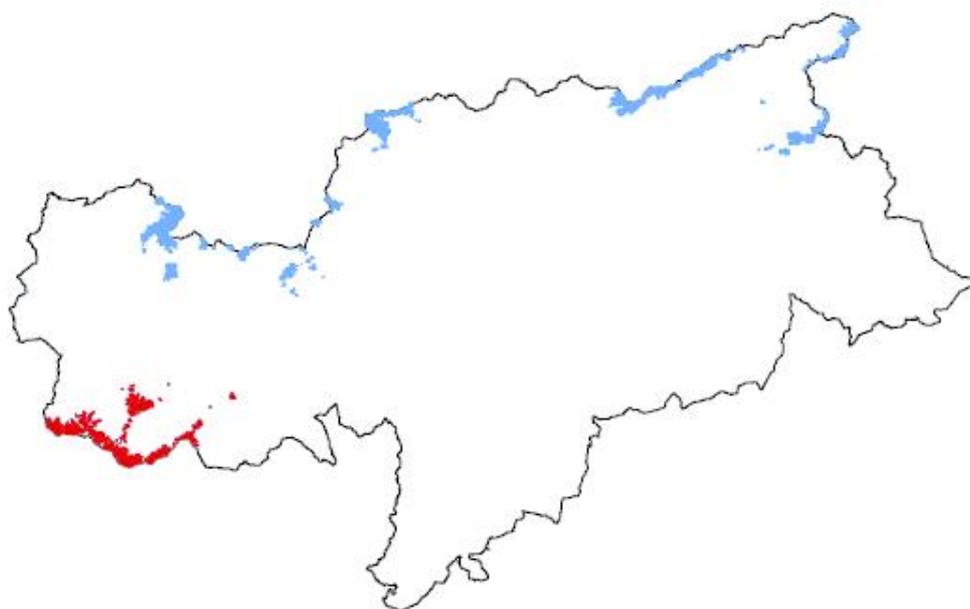


Fig. 4.2 – Distribuzione dei ghiacciai in Alto Adige. In evidenza il gruppo dell'Ortles – Cevedale (Fonte: Prov. Aut. di Bolzano, 1997).

---

<sup>4</sup> Dal 2003 i risultati delle campagne glaciologiche per il calcolo del bilancio di massa sui ghiacciai di Fontana Bianca, Vedretta Lunga e Malavalle sono pubblicati sui *Glacierreport*, editi dall'Ufficio Idrografico della Prov. Aut. di Bolzano.

## 5. I GHIACCIAI DELLA VAL D'ULTIMO

La Val d'Ultimo è la valle più lunga fra tutte quelle che si irradiano dal gruppo dell'Ortles-Cevedale. Dalla foce nella piana di Lana, nei pressi di Merano, si estende per circa 40 Km in direzione sud-ovest, fino allo spartiacque con il bacino di Rabbi da cui trae origini, all'interno del Parco Nazionale dello Stelvio. Si tratta indubbiamente di una valle particolare: all'ingresso il rio Valsura (Valschauer Bach) scorre incassato a fondovalle separando nettamente i graniti di Monte Croce (destra idrografica) dalle rocce micascistiche (sinistra idrografica). Tale zona è caratterizzata dai vigneti che si sviluppano lungo i versanti della valle (fig. 4.3). Attualmente la strada rimonta in quota lungo la sponda sinistra e soltanto a S. Pancrazio ritocca il fondovalle. A S. Valpurga, circa a metà percorso, attorno ai 1200 m s.l.m., la valle si addolcisce meravigliosamente ospitando masi, con i loro tetti a scandole fermati da sassi, gli orti curati come giardini ed i campi ordinati.



Fig. 5.1 - La forra a sinistra e i vigneti a terrazzamenti sulla destra.

In questo punto, oltre 9 Km in linea d'aria separano i due spartiacque di questo imponente bacino idrografico che caratterizza la Val d'Ultimo. Oltre l'abitato di S. Gertrude, arroccato nel bosco, la valle diventa veramente alpestre con i due rami di Fontana Bianca-Lago Verde e del solco di Montechiesa. La vegetazione si fa sempre più rada e lascia spazio alle

conche detritiche che anticipano morene e ghiacciai a 3000 metri (Artoni, 1984).

I ghiacciai della Val d'Ultimo sono fenomeni limitati alla Valle del Lago Verde ed, ormai, l'unico degno di interesse è quello di Fontana Bianca. In passato, però, giacevano sul versante orientale della cresta Cime Sternai la Vedretta del Lago Verde (Grün See Ferner) e la Vedretta del Passo di Fontana Bianca (Weissbrunner Joch Ferner), oltre alla già citata Vedretta di Fontana Bianca (Weissbrunnferner). Dei primi due rimangono solo glacionevati destinati quindi ad estinguersi.

## **6. IL GHIACCIAIO DI FONTANA BIANCA**

Il ghiacciaio di Fontana Bianca fu menzionato per la prima volta con il suo nome attuale dal Mojsisovics nel 1865 che lo definì l'unico ghiacciaio della valle; nel 1872 J. Payer nella sua monografia sul Gruppo Ortles - Cevedale aggiunse alla descrizione alcuni dati tecnici; E. Richter (1888) menzionò due ghiacciai, così come riportato nella Spezial Karte der Orler-Gruppe del D.u.Oe.A.V. (1891); nell'elenco dei ghiacciai di C. Porro (1925) si trovano indicati il Ghiacciaio di Fontana Bianca e quello meridionale di Gioveretto. Fu solo Desio (1928) ad introdurre i toponimi dei due ghiacciai minori e ad iniziare un'osservazione scientifica del ghiacciaio maggiore. Sono infatti suoi i primi segnali per la misurazione delle fronti.

### **6.1. Prime ricerche di A. Desio**

Nel presente capitolo sono riportate le osservazioni fatte dal prof. Desio nelle sue campagne di studio sui ghiacciai dell'Ortles-Cevedale. Dato l'indiscusso carisma e la fama scientifica che ha sempre accompagnato i suoi studi e le sue ricerche nelle aree più disparate del mondo, è sembrato corretto inserire le sue informazioni dettagliate e precise che fotografano il carattere del personaggio, e che testimoniano l'accuratezza metodologica di approccio anche per il ghiacciaio di Fontana Bianca.

Esse sono interessanti non solo come documentazione storica, ma come fonte di notevoli indicazioni per esaminare un quadro evolutivo del ghiacciaio di Fontana Bianca dal 1928 al 2007.

Vedretta della Fontana Bianca

Latitudine: 46°29'00" - Longitudine: 1°41'00".

Quota della cima più alta sovrastante: 3442 m

Quota del punto più alto del ghiacciaio: 3300 m

Quota del punto più basso del ghiacciaio: 2900 m.  
Lunghezza massima: 1075 ha  
Larghezza massima: 950 m  
Inclinazione media: 21°  
Area: 54,44 ha  
Esposizione: est.  
Alimentazione prevalente : diretta  
Tipo morfologico e specie : Il ordine, di ghiacciaio circo.

Il primo cenno descrittivo del ghiacciaio è quello contenuto nella nota di A. Desio (1928) nella quale è riportata la quota della fronte nel 1927 (2844 m). Dati sulle variazioni della fronte raccolti da A. Desio, E. Cartom, G. M. Ghidini, O. Gretter si trovano nel Bollettino del Comitato del Comitato Glaciologico Italiano n. 8 (1928), n. 12 (1932) e n. 15 (1935).

Le rappresentazioni cartografiche anteriori alla tavoletta dell'I.G.M. "Cima Sternai" (1910) sono o poco fedeli, o riproducono condizioni glaciologiche molto diverse da quelle attuali. La tavoletta rende abbastanza bene il ghiacciaio nel suo complesso. Pure buona è la rappresentazione della tavoletta "Cima Sternai" (1963) che rispecchia la situazione all'epoca del rilievo (1962). Nel Catasto dei Ghiacciai Italiani (1961) porta il n. 713.

b) Vie d'accesso: la fronte del ghiacciaio viene raggiunta dal Rif. Canziani dopo aver contornato il Lago Verde, risalendo i valloni detritici che sovrastano il lago verso ovest, in circa una ora e mezza.

c) Segnali: i primi segnali intorno alla fronte di questo ghiacciaio vennero posti da A. Desio (1928) il 5 agosto 1927. Eccone l'elenco:

Colata destra.

1 Su enorme masso di fillade a vernice rosso-ruggine infossato nella morena laterale destra presso un piccolo saliente, alquanto sopra la fronte, presso un torrentello che scende nel Lago Verde, a 13,60 m dal ghiaccio.

2 Sui lastroni di fillade a vernice rosso-ruggine che stanno presso il punto dove s'inizia la zona rigonfia e crepacciata della colata destra del ghiacciaio, sulla destra di questa a 8,10 m dal ghiaccio.

3 Su masso subtriangolare di fillade a vernice rosso-ruggine posto sulla morena laterale destra sotto il segno 2 a 20 m dal ghiaccio.

4 Su grande masso ovoidale di fillade a vernice rosso-ruggine presso il lato destro della fronte. Il segnale non è stato misurato nel 1927 perchè il margine di ghiaccio era coperto dalla neve. Nell'agosto 1931 distava 15,90 m dal ghiaccio.

5 Su masso prismatico di fillade a vernice rosso-ruggine dinnanzi al centro della fronte ed a 32,85 m dal ghiaccio. Nell'agosto 1934 gli operatori del C.A.I. G. M. Ghidini ed O. Gretter aggiunsero l'indicazione S. F. 2 (stazione fotografica) accompagnata da una nuova freccia.

6 Su grande masso piatto di, fillade a vene quarzose e vernice giallastra, posto sulla morena frontale, presso il lato sinistro della fronte ad 10,70 m dal ghiaccio.

Nella stessa occasione A. Desio fissò pure una stazione fotografica: St. Fot. Su grandioso masso di fillade grigia sul cordone morenico abbandonato di sinistra.

Nell'agosto 1934 un altro segnale venne aggiunto da G. M. Ghidini e O. Gretter sulla fronte della colata destra:

A 34 Su masso piramidale di fillade a patina giallastra posto sulla morena presso l'estremità sinistra della fronte a 19,30 m dal ghiaccio.

Colata Sinistra. (segnali di A. Desio del 1927).

A Su piccola cupola arrotondata di fillade emergente dalla morena frontale a 24,15 m dal ghiaccio.

B Su grande masso irregolare di fillade grigia posto sulla morena davanti alla parte centrale della fronte a 14,65 m dal ghiaccio.

C Su enorme masso quadrangolare di fillade grigia sulla destra del torrente glaciale, presso il punto più basso della fronte, a 12,10 m dal ghiaccio.

Nell'agosto 1934 i suddetti operatori aggiunsero il nuovo segno:

D 34 Su grande masso di fillade grigia posto sulla morena presso il lato sinistro della fronte a 17,10 m dal ghiaccio.

#### d) Descrizione

La Vedretta della Fontana Bianca è contenuta in una insenatura della montagna, una specie di ampio circo molto incavato, che il ghiacciaio riempie traboccando inferiormente con due brevi colate dalla soglia sormontata da un cocuzzolo roccioso. Nella parte superiore riveste la cresta che da Cima Sternai (3442 m) va a Cima Lorchen (3348 m) e poi prosegue per il Passo Fontana Bianca (3153 m). Sotto la zona superiore il ghiacciaio si appiana sensibilmente sin verso 3050 m, ove hanno, inizio le due colate terminali.

La colata destra è la maggiore; è lunga circa 350 m e larga 200 m. Poco sotto la sua separazione dal corpo del ghiacciaio, in corrispondenza di un salto roccioso, presenta una notevole convessità con larghi crepacci longitudinali, mentre più in basso si distende ripida lungo una scarpata, allargandosi a ventaglio e terminando con un'unghia sottile acclive e un po' sfrangiata, coperta ai lati da morene galleggianti.

La lingua sinistra è più breve e più stretta della precedente. Trabocca da una soglia limitata da due dossi rocciosi e scende con forte pendenza allargandosi anch'essa a ventaglio nella parte inferiore e terminando con una fronte sottile ed in parte coperta dalla morena.

Le morene deposte hanno un notevole sviluppo. Nel 1927 la fronte della colata destra era circondata da un vallo frontale alto circa 4 m e da due cordoni morenici laterali. Sino al 1934 fra la fronte e la morena v'era una pozza d'acqua nella quale s'immergeva appena l'unghia terminale.

Sviluppo quasi pari ha l'apparato morenico della colata sinistra. La morena frontale è bassa e distava già nel 1927 una cinquantina di metri dalla fronte. Grandiosa è la morena laterale destra, mentre quella sinistra è piuttosto scarna e si confonde con la falda morenica frontale della Vedretta del Passo Fontana Bianca. Più in basso, verso 2780 m, esiste un argine morenico frontale assai più elevato del precedente.

Le acque di sgelo sgorgano dalle due colate, sotto l'estremità inferiore della colata destra, dal lato sinistro di quella sinistra, e si riuniscono prima di raggiungere il principale immissario del Lago Verde.

La Vedretta della Fontana Bianca nel 1961 ha conservato un aspetto abbastanza simile a quello del 1927 sebbene sia sensibilmente smagrita in spessore, non raggiunga più la cresta sommitale e le due colate terminali si siano notevolmente ridotte. La lingua meridionale, o destra, è tuttora la più bassa ed estesa; ha abbandonato la scarpata occupata nel 1927 e si arresta lungo il salto roccioso. Scomparsi sono i crepacci e la convessità della superficie. La fronte ha forma semicircolare, è piatta e sottile e poggia su roccia in posto. Più ripida è, invece la fronte settentrionale che sembra arrestarsi, spesso bordata da una frangia di neve, su roccia in posto. Al momento della visita la vedretta era innevata e non si notavano crepacci.

#### e) Variazioni

Le misure ai segnali, che qui di seguito riportiamo, furono limitate al periodo dal 1927 al 1934:

Colata destra

<b>Segnali</b>	<b>1927</b>	<b>1931</b>	<b>1934</b>
<b>1</b>	13,60		
<b>2</b>	8,10	32	
<b>3</b>	20	29,50	
<b>4</b>		15,90	21
<b>5</b>	32,85	45	70
<b>6</b>	10,70	20,30	32,70
<b>A '34</b>			19,30

Colata sinistra

<b>Segnali</b>	<b>1927</b>	<b>1931</b>	<b>1934</b>
<b>A</b>	24,15		50
<b>B</b>	14,65	48	47,50
<b>C</b>	12,10	22,80	58,90
<b>D</b>			17,10

Dai dati su esposti possiamo ricavare le seguenti medie degli spostamenti frontali ed i relativi valori medi annui:

periodo a cui si riferiscono le osservazioni	variazione media nel periodo considerato	variazione media annua
Colata destra		
1927-31	- 13,80	- 3,45
1931-34	- 14,17	- 4,72
Colata sinistra		
1927-31	- 22,00	- 5,50
1931-34	- 17,80	- 5,93

## 6.2 Il catasto dei ghiacciai del 1983

Il catasto dei ghiacciai della Provincia Autonoma di Bolzano è stato compilato con i dati raccolti nelle estati dal 1976 al 1982. La base cartografica utilizzata è stata quella delle tavolette IGM (scala 1:25.000), anche se queste non corrispondevano alla realtà riscontrata sul campo. Tale cartografia è stata quindi corretta con l'ausilio delle informazioni fornite dalle foto aeree rilevate nel settembre del 1975. Sono state predisposte delle schede secondo quanto indicato dalla Temporary technical Secretariat per il World Glacier Inventory, apportando solo modeste varianti. Il territorio dell'Alto Adige è stato suddiviso in bacini, come indicato dalla normativa di Zurigo. Il codice si compone di 12 caratteri alfanumerici. Le prime sette identificano il bacino dell'Adige, le tre caselle seguenti indicano il bacino fino al 4° ordine, secondo l'ordine inverso di Strahler<sup>5</sup>. Le ultime due cifre indicano l'unità glaciale presente nel bacino, numerata in senso orario.

I/4L001      101    03

I/      Italia  
4L      Bacino dell'Adriatico  
001    bacino dell'Adige  
101    bacino del lago Verde - Valsura -  
03      Ghiacciaio di Fontana Bianca

---

<sup>5</sup> I metodi di *gerarchizzazione* e conseguente classificazione geomorfologica di un reticolo fluviale possono essere di due tipi: "da monte" e "da valle". I metodi più utilizzati sono quelli da monte e fra essi quelli di Horton e di Strahler. L'ordine delle varie aste che compongono il reticolo fluviale di un bacino si può determinare in pratica per mezzo di queste regole (metodo di A.N. Strahler, detto anche di Horton-Strahler): un'asta che non nasce dalla confluenza di altre due è di primo ordine (quindi le aste di primo ordine sono quelle più lontane dalla sezione di chiusura); un'asta di ordine n e un'asta di ordine (n-1) congiungendosi danno origine a un'asta di ordine n; due aste di ordine n congiungendosi danno origine a un'asta di ordine (n+1).

Codice di identificazione . . . . .

Numero di Catasto . . . . .

NOME . . . . . Ghiacciaio Fontana Bianca

Sinonimi . . . . . \_\_\_\_\_

Bacino idrografico Lago Verde - Valsura - ADIGE

Tipo Ghiacciaio montano

Massima elevazione del bacino :

Nome Cima Sternai \* m.s.m.

Quota massima del ghiacciaio . . . . .

Quota minima . . . . .

Superficie totale (Km<sup>2</sup>) . . . . .

Differenza area Catasto . . . . .

Data osservazione . . . . .

AAR . . . . .

Tendenza . . . . . incerta (innevamento residuo)

NOTE : . . . . . Possiede due piccole lingue separate da  
uno sperone roccioso.

Fig. 6.1 – Indicazioni principali della scheda del catasto del 1983 sul ghiacciaio di Fontana Bianca.

### 6.3 Il catasto dei ghiacciai del 1997

Le informazioni relative al catasto del 1997 contenute in questo capitolo sono ancora in corso d’opera, poiché è in fase di ultimazione l’analisi dei toponimi italiani e tedeschi delle zone montane dell’Alto Adige.

Il presente catasto dei ghiacciai, denominato AA1997, fa riferimento ad una serie di dati digitali di base tratti dal modello digitale del terreno dgm\_20m disponibile per l’Alto Adige. Questo modello è stato prodotto nel contesto della riedizione delle ortofoto digitali ed ha dimensione di cella pari a 20 x 20 m ed una precisione altimetrica di +/- 5m. Le principali caratteristiche di tale modello sono:

Projected Coordinate System: ETRF\_1989\_UTM\_Zone\_32N  
Projection: Transverse\_Mercator  
False\_Easting: 500000,00000000  
False\_Northing: 0,00000000  
Central\_Meridian: 9,00000000cale\_Factor: 0,99960000  
Latitude\_Of\_Origin: 0,00000000  
Linear Unit: Meter  
Geographic Coordinate System: GCS\_ETRF\_1989  
Datum: D\_ETRF\_1989  
Prime Meridian: 0  
Angular Unit: Degree  
data volo: 09.1997  
ditta: Imp. Luigi Rossi, Brescia  
fotocamera: RMK TOP 15/23  
scala media: 1:23.000  
sovrapposizione longitudinale: 60 %  
sovrapposizione laterale: 20 – 30 %

Per la interpretazione fotogrammetrica l'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano ha messo a disposizione le foto pancromatiche in bianco e nero commissionate alla ditta Luigi Rossi di Brescia. Tali fotografie sono state scattate nel settembre 1997 e consegnate al Politecnico di Monaco per la interpretazione geodetica.

Presso il Politecnico di Monaco, con il coordinamento di Hermann Rentsch, è stata prodotta l'analisi stereoscopica e gli *shapefiles* poi rinominati Gl\_finale\_UTM.shp. L'orientamento delle immagini è stato determinato creando strisciate di più foto tali da comporre immagini complete. Tali strisciate sono state collegate per mezzo di aerotriangolazione ed i parametri di orientazione sono stati ricavati per Bündelausgleich.

I punti fiduciali sono stati posizionati secondo le indicazioni del Politecnico di Monaco e rilevati a mezzo GPS dall'Ufficio Idrografico in collaborazione con l'Ufficio Geodetico della Provincia Autonoma di Bolzano. Lungo il confine settentrionale è stato possibile mutuare alcuni punti fiduciali dal materiale fotografico a base del catasto dei ghiacciai austriaci (Eder e Rentsch, 2002)..

L'analisi e l'interpretazione dei contorni glaciali è stata prodotta utilizzando lo stereoscopio analitico Plan comp P1. La definizione dei contorni glaciali è risultata particolarmente difficile in caso di parti di fotogramma in ombra, è stata tuttavia comunque possibile grazie alla grande esperienza del fotointerprete. Probabilmente tali difficoltà sono state la causa di alcuni errori di interpretazione, che riguardavano anzitutto il contorno dei ghiacciai ma in alcuni casi anche la loro posizione.

Nel 1997 i ghiacciai altoatesini risultavano completamente scoperti ed anche le superfici, normalmente di accumulo, erano interessate dall'ablazione. Tali condizioni si sono peraltro susseguite anche negli anni antecedenti il rilievo fotografico. Per questo ghiacciai piccoli e con limitata estensione altimetrica hanno perso ingenti volumi di ghiaccio e risultano praticamente essere prossimi al collasso in situ. In periodi climaticamente favorevoli tali apparati risultano completamente soggetti ad accumulo, al contrario in periodi sfavorevoli ad ablazione. Conseguenza di tali condizioni al contorno sono contorni glaciali spesso molto articolati che al limite inferiore comprendono accumuli valanghivi, ghiaccio morto e nevato, che tuttavia all'atto del rilievo fotografico risultavano uniti al ghiacciaio vero e proprio. Già sulle ortofoto del 2000 è evidente come tali strutture siano poi andate riducendosi, in alcuni casi fino a scomparire. Dopo numerosi tentativi di semplificare i contorni glaciali si è deciso di mantenere i risultati dell'analisi prodotta dalla TU München e di apportare correzioni solo nei casi in cui il limite superiore del ghiacciaio risultava intersecare le rocce sovrastanti.

A causa di tali problemi incontrati nell'analisi, i parametri rilevati risultano poco rappresentativi anzitutto nel caso di apparati di limitate estensioni e più o meno esposti a sud. Questo vale in particolare per la superficie e la quota inferiore di tali ghiacciai, che in alcuni casi risulta una variabile casuale. In virtù delle dimensioni piuttosto piccole dei ghiacciai

difficili da analizzare, il peso di tali indeterminazioni è assolutamente relativo.

Nel catasto dell'Alto Adige del 1997 sono stati censiti 259 ghiacciai, per una superficie complessiva di 109.65 km<sup>2</sup> e un volume stimato in 3326 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Il ghiacciaio con la superficie maggiore risulta essere quello di Malavalle con 7.93 km<sup>2</sup>, mentre la zona più glacializzata è quella del gruppo Ortles - Cevedale con un'estensione di 41.63 km<sup>2</sup>. L'apparato che si sviluppa alla quota altimetrica maggiore è la Vedretta Alta dell'Ortles (3893 m s.l.m.), mentre quello che scende più a valle è la Vedretta Bassa dell'Ortles (2158 m s.l.m.). in tutto il territorio provinciale vengono calcolati i bilanci di massa per quattro ghiacciai e precisamente per il Ghiacciaio di Fontana Bianca e per quello di Malavalle, per la Vedretta Lunga e per quella Pendente. Inoltre vengono misurate le variazioni frontali per circa 40 ghiacciai ad opera di operatori del Comitato Glaciologico Italiano e del Servizio Glaciologico Alto Adige.

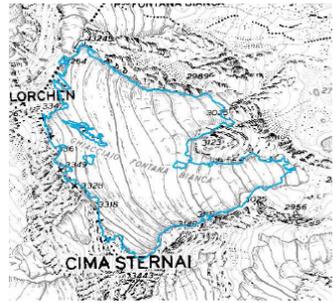
 Autonome Provinz Bozen - Südtirol Provincia Autonoma di Bolzano - Alto Adige		Hydrographisches Amt Ufficio idrografico 	
 Weissbrunnferner Ghiacciaio di Fontana Bianca		Gletscherinventar catasto dei ghiacciai AA 1997	
			
			
Gletschernummer numero ghiacciaio	I4L00110103	tiefster Punkt quota minima [m a.s.l.]	2867
Gebirgsgruppe gruppo montuoso	Ortler - Cevedale Gruppe / Gruppo dell'Ortles - Cevedale	mittlere Höhe quota media [m a.s.l.]	3163
geographische Koordinaten coordinate geografiche [°]	10,76777 / 46,48404	höchster Punkt quota massima [m a.s.l.]	3358
Gesamtfläche superficie totale [km <sup>2</sup> ]	0.64	Gleichgewichtslinie (AAR = 0.67) linea di equilibrio (AAR=0.67) [m a.s.l.]	3123
maximale Länge lunghezza massima [km]	1.27	Kommentar commento	

Fig. 6.2 – Scheda del catasto 1997 relativa al ghiacciaio di Fontana Bianca (Fonte: Prov. Aut. Bolzano).

## 6.5 Lo stato attuale

Il ghiacciaio di Fontana Bianca oggi è un piccolo ghiacciaio di circo esposto ad est, che ha una superficie di circa 0,49 km<sup>2</sup>, secondo il rilievo dell'agosto 2007, e si sviluppa dai 3370 ai 2890 m s.l.m.. L'intero bacino risulta essere scolpito in rocce metamorfiche di tipo filladico, con una modesta presenza di rocce di natura dioritica o quarzo dioritica in giacitura filoniana (Desio, 1967). È caratterizzato dalla presenza di due piccole lingue glaciali, che scendono dall'area più estesa e centrale del bacino, fino alle quote di 2850 e 3025 m s.l.m., rispettivamente in orografica destra e sinistra. La lingua glaciale che scende a quota altimetriche più basse è caratterizzata, a quota 3009 m s.l.m., da un brusco cambio di pendenza, evidenziato dalla presenza di crepacci. È proprio nella zona orografica destra che si è la presenza maggiore di tali profonde fenditure; zona altresì resa pericolosa dall'incombente parete est della Cima Sternai, che d'inverno è soggetta a valanghe di notevole importanza, e d'estate, con il progressivo assottigliamento della coltre ghiacciata, a caduta massi (fig. 6.3).

Nonostante le sue dimensioni il ghiacciaio di Fontana Bianca evidenzia alcune morfologie tipiche di un apparato glaciale soggetto a forte ablazione. Oltre ai già citati crepacci, circoscritti solo alla zona sotto cima Sternai, vi è anche la presenza di rocce montonate. Queste sono osservabili principalmente nelle zone circostanti le due stazioni idrometriche (fig. 6.4), che sono state collocate proprio in corrispondenza di un gradino glaciale.



Fig. 6.3 – Detriti e rocce cadono sul ghiacciaio dall'incombente parete nord-est di Cima Sternai (20/07/07).



Fig. 6.4 – Rocce montonate nei pressi della stazione idrometrica in orografica sinistra.

Possiamo presupporre che durante l'ultima glaciazione questo fosse percorso ed eroso da una massa glaciale che fluiva verso valle. Ne sono testimonianza anche le morene che si trovano tra il ghiacciaio ed il bacino del lago Verde. Queste vennero già osservate e accuratamente descritte durante le campagne di ricognizione del prof. Desio nel 1927.

Nel corso della stagione estiva in considerazione della forte ablazione che ha caratterizzato gli ultimi anni, si determina il ruscellamento delle acque di fusione sulla superficie. Data la modesta estensione dell'apparato, esse sono rare e si caratterizzano per uno sviluppo lineare

lungo la massima pendenza. Durante l'estate 2007 invece, le acque di fusione della lingua sinistra hanno sviluppato una *bedier* di una certa rilevanza in rapporto al ghiacciaio. Nell'estate 2006 tale morfologia era già presente e visibile anche sull'ortofoto dello stesso anno. Durante le uscite sul campo, si è accertato che tale solco ha raggiunto il detrito di fondo nella parte terminale della lingua glaciale sinistra, mentre nella zona superiore ha inciso la massa glaciale per alcuni metri sviluppandosi con un andamento meandriforme.



Fig. 6.5 - Canale di ruscellamento in orografica sinistra il 20/07/07 (sinistra) e successiva formazione di una *bedier* evidenziata da una nevicata estiva il 24/08/07 (destra).

La parte del ghiacciaio ad ovest, al di sopra dei 3300 m s.l.m. (nei pressi della palina 4), è ormai quasi separato dal corpo centrale, portando alla luce una fascia rocciosa di diversi metri, che solo 20 anni fa era sotto una coltre di ghiaccio. A causa della continua e progressiva perdita di massa glaciale e della posizione della linea di equilibrio al si sopra della parte più alta del ghiacciaio, l'apparato mostra ormai evidenti segni di disgregazione, con la progressiva emersione di nuove isole rocciose.



Nella parte a sud del bacino idrografico del lago Verde si sviluppa per più di un chilometro un *ice core rock glacier* (fig. 6.6, a lato), che ha un movimento di circa 50 cm l'anno. Tale morfologia è osservata costantemente dall'ufficio geologico con diversi metodi: tramite esplorazione a distanza, con l'interpretazione di foto aeree nonché del nuovo modello laserscan ad alta definizione possono essere rilevati fenomeni di permafrost come zone di neve perenne e rock

glacier. Tramite rilevamento radar da satellite, applicando l'interferometria differenziale, può essere misurata la "velocità di flusso".

Sui rock glacier oggetto di studio vengono poi effettuate le seguenti analisi di dettaglio:

- > Rilievo geologico e morfologico;
- > Analisi della velocità di movimento tramite sistemi di rilevamento GPS ad alta risoluzione ed/o uno scanner laser terrestre;
- > Analisi dello spessore e delle strutture interne tramite il georadar.
- > Studi idrologici: misurazioni continue di temperatura a diverse profondità; analisi delle caratteristiche idrochimiche (conducibilità elettrica) dell'acqua; misura della portata tramite stazioni idrometriche automatiche.

Con tali dati l'ufficio Geologico della Provincia Autonoma auspica di ottenere: informazioni sulla formazione ed il comportamento dei rock glacier (movimento, spessore, composizione, comportamento di deflusso); informazioni sul pericolo idrogeologico e informazioni utili per la

pianificazione territoriale, la gestione delle risorse e la progettazione delle misure di protezione.

Per le sue dimensioni contenute, per la facilità d'accesso e per la mancanza di zone particolarmente pericolose, questo ghiacciaio si è dimostrato un "ottimo bacino" d'osservazione per monitorare l'attività glaciale alpina, permettendo di trarre interessanti conclusioni sul processo di evoluzione continua in atto sulle Alpi.



Fig. 6.7 - Panoramica invernale del ghiacciaio di Fontana Bianca (10/05/07).



Fig. 6.8 - Panoramica estiva del ghiacciaio di Fontana Bianca (20/07/07).

## 6.5 Primi bilanci di massa

Il bilancio di massa è riferito all'anno idrologico che va dal primo ottobre al 30 settembre ed all'interno di esso sono calcolati separatamente il bilancio di massa invernale, basato sul periodo che inizia il primo ottobre e termina al momento di massimo accumulo, ed il bilancio di massa estivo, che copre il periodo restante. Il metodo utilizzato è quello glaciologico diretto, fondato sulla misura delle variazioni dello spessore della massa glaciale rispetto alla chiusura del bilancio precedente. In pratica si misura periodicamente la lunghezza della sporgenza di paline ablatimetriche infisse nel ghiacciaio in posizioni scelte in base a criteri di rappresentatività. Per ogni palina si calcola il saldo netto tra la quantità di neve che si accumula e quella di neve e ghiaccio che fonde. I valori di bilancio complessivi vengono calcolati estrapolando i valori relativi delle singole paline all'intera superficie glaciale.

Sul ghiacciaio di Fontana Bianca i primi bilanci di massa furono effettuati tra il 1983 ed il 1988 ad opera dell'ing. P. Valentini, allora direttore dell'Ufficio Idrografico della Provincia di Bolzano, e del dott. F. Secchieri. Al momento dell'indagine, come si desume dai loro scritti, il bacino aveva un'estensione di  $0.686 \text{ km}^2$  e nei cinque anni della ricerca, la linea d'equilibrio si è sempre venuta a trovare al di sopra dei 3075 m s.l.m., quota che doveva segnare la divisione del bacino collettore da quello ablatore in condizioni di equilibrio.

Anche in questo quinquennio, eccezion fatta per il primo anno di misure, emerge chiaramente la tendenza estremamente negativa che ha caratterizzato il periodo. La perdita totale è stata di  $1.284.700 \text{ m}^3$  di equivalente in acqua, pari ad una lama di 1873 mm di acqua equamente distribuita sul ghiacciaio. Una prima stima valuta la perdita in volume pari al 10% del totale (in soli cinque anni di indagine). La linea di equilibrio è stata calcolata ad una quota di 3258 m s.l.m. Con tali valori la zona di

ablazione è risultata corrispondente all'89% dell'intero ghiacciaio, relegando solo all'11% la zona di accumulo. In tali condizioni il ghiacciaio risultava nettamente in una fase di riduzione (Valentini e Secchieri 1992).

ANNATE	ACCUMULO		ABLAZIONE		BILANCIO	
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	mm	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	mm	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	mm
1983/84	0.9436	1375	0.6727	990	+0.2709	+395
1984/85	1.1251	1640	1.5366	2282	-0.4115	-600
1985/86	1.0122	1475	1.0851	1382	-0.0729	-106
1986/87	0.6338	924	0.9533	1390	-0.3196	-466
1987/88	0.7302	1064	1.4818	2160	-0.7516	-1096
			Totale			
1983/88	4.4449	6479	5.7295	8394	-1.2847	-873

Fig. 6.9 - Valori totali e specifici di accumulo, ablazione e bilancio per l'intero periodo (Fonte: Valentini, 1991).

Dopo un'interruzione di tre anni le misurazione furono riprese dall'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano in collaborazione con l'Istituto di Geografia dell'Università di Innsbruck con la supervisione del prof. Kaser. Dall'anno idrologico 2003/2004, le campagne di misura vengono effettuate autonomamente dall'Ufficio Idrografico e i risultati sono pubblicati nel Glacierreport e sono disponibili in rete all'indirizzo della Provincia Autonoma di Bolzano ([www.provincia.bz.it](http://www.provincia.bz.it)).

**Parte Terza**  
**RICERCHE SUL CAMPO**

## **7. ANNO IDROLOGICO 2006 - 2007**

L'anno idrologico 2006/07 rappresenta il XVI anno consecutivo in cui l'Ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano svolge l'attività glaciologica sul ghiacciaio di Fontana Bianca. Proprio questa fase di misurazioni e le conseguenze che ne scaturiscono, costituiscono l'oggetto principale della ricerca.

Sono stati eseguiti sette sopralluoghi, durante i quali sono state effettuate le analisi necessarie alla determinazione del bilancio di massa. Contemporaneamente sono state installate le stazioni idrometriche in corrispondenza dei rii che sgorgano rispettivamente, dalle lingue sinistra e destra, per ottenere un'analisi dei deflussi glaciali. È stata altresì effettuata una campagna con strumenti GPS realizzata in collaborazione con l'Ufficio

per il Rilevamento Geodetico della Provincia Autonoma di Bolzano per la misurazione dei contorni glaciali e della posizione delle paline ablatimetriche.

## **8. ATTIVITÀ INVERNALE**

Il bilancio invernale viene calcolato per stimare la quantità di neve accumulatasi sul ghiacciaio durante l'inverno e si esprime in mm we o volume d'acqua per unità areale ( $\text{kg/m}^2$ ). Per ottenere tali risultati è necessario conoscere l'altezza della neve e la sua densità.

I dati necessari al calcolo del bilancio invernale 2006/07 sono stati raccolti durante il sopralluogo primaverile avvenuto il 10 maggio 2007. In tale occasione l'altezza della neve è stata misurata per mezzo di sondaggi puntuali la cui posizione è stata registrata con un GPS Trimble palmare portatile. Si è utilizzato tale strumento perchè l'obiettivo era quello di ottenere un tracciato dei rilievi con una precisione metrica e non di definire la posizione esatta del sondaggio.

### **8.1 Sondaggio**

Il sondaggio è l'operazione di misura dello spessore del manto nevoso, che generalmente si svolge durante il sopralluogo primaverile, nel periodo di massimo accumulo. Si calcola mediante una apposita sonda graduata, che viene affondata verticalmente nella neve fino a toccare la superficie del ghiacciaio, avendo cura di non penetrare anche l'eventuale neve residua dell'anno precedente. Queste misure puntuali permettono di determinare la massa del manto nevoso depositato nel corso dell'inverno e l'eventuale variazione di massa glaciale. La scelta dei punti ove effettuare le

misurazioni è fondamentale per avere dei risultati che siano il più possibile più corrispondenti alla realtà. Però, a causa delle difficoltà logistiche e di movimento, determinate dall'estensione dell'area di accumulo e dalla morfologia dell'apparato glaciale, il numero dei siti di misura è limitato e l'esperienza sul campo dell'operatore è determinante per la loro scelta.

Nel caso specifico si è deciso di procedere con gli sci in discesa e di effettuare i sondaggi ogni 30 metri circa. L'elicottero è atterrato sulla larga cresta ovest, a quota 3360 m s.l.m. all'incirca, nei pressi della palina 4, dal quale sono scesi tre operatori. Una squadra composta da due ricercatori, tra cui il sottoscritto, si è diretta in direzione sud, sud-est effettuando i sondaggi, mentre il terzo componente dell'unità operativa glaciologica ha raggiunto la palina 1 per effettuare la prima trincea. La "prima" squadra ha proceduto a sondare sistematicamente tutto il ghiacciaio con un andamento nord – sud, effettuando la seconda trincea a quota 3050 m s.l.m. assieme al terzo operatore, scendendo in seguito sulla lingua orografica sinistra, risalendo poi nella zona centrale dello sperone e discendendo infine la lingua orografica destra.

Si sono effettuati 162 sondaggi, che si può dire senza alcun dubbio rappresentino un ottima rete di misura per questo piccolo ghiacciaio. L'unica zona che non è stata indagata è quella sotto Cima Sternai, a causa dell'elevata pericolosità. Si tratta infatti, di un versante ad elevata pendenza con attività valanghiva di notevole imponenza e che è anche soggetta a scariche di sassi provenienti dalla cresta (fig. 8.1).

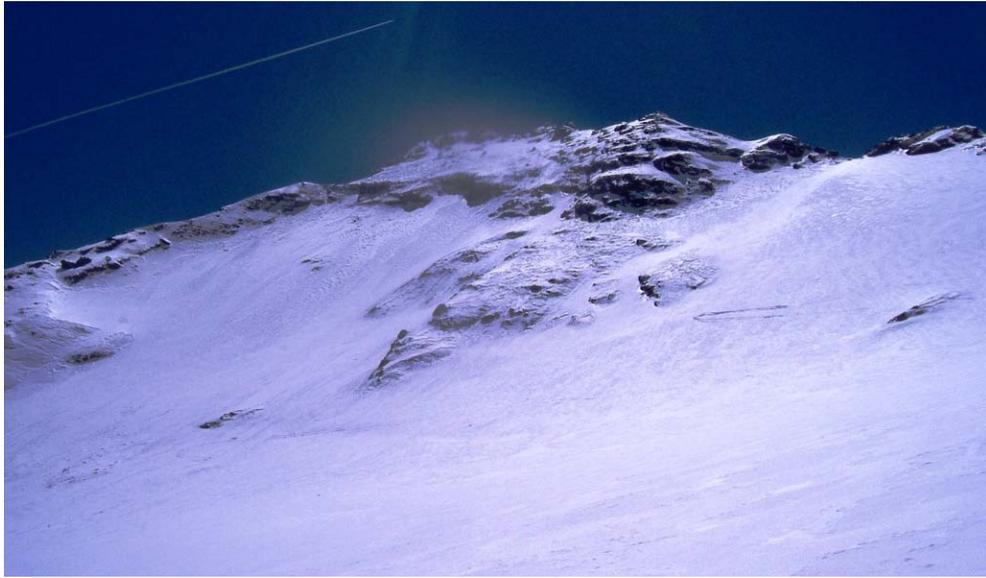


Fig. 8.1 – Cima Sternai ed il pendio valanghivo (10/05/07).

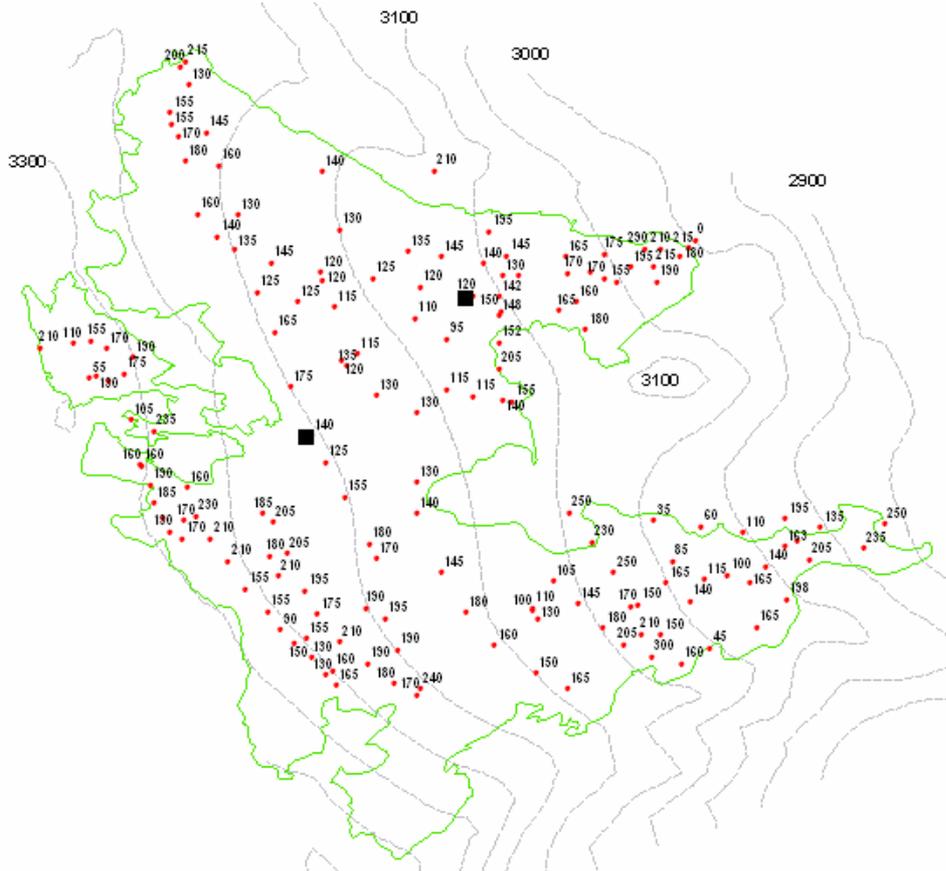


Fig. 8.2 – I punti rossi rappresentano i sondaggi con indicata l'altezza della neve (h), mentre i due quadrati neri le trincee.

L'altezza della neve è risultata compresa tra i 35 cm nelle zone laterali a ridosso delle rocce ed i 300 cm sotto la Cima Sternai nella zona di accumulo della valanga (fig. 8.2). Prendendo come riferimento le paline, il valore più basso si è registrato presso la palina 20 (105 cm), mentre quello più elevato presso la palina 3 (205 cm).

## 8.2 Trincea

Per poter determinare il profilo verticale di densità della neve viene scavata nel manto nevoso una “trincea”. A differenza della densità del ghiaccio, per la quale un'assunzione di  $900 \text{ kg/m}^3$  rappresenta un'approssimazione soddisfacente, la densità della neve è decisamente più variabile e cambia in maniera irregolare lungo tutto il profilo a seconda degli strati e della loro età. La neve fresca appena caduta pesa spesso meno di  $100 \text{ kg/m}^3$ , mentre la neve vecchia inumidita può arrivare a pesare fino ad oltre  $500 \text{ kg/m}^3$ . La conoscenza del profilo verticale della densità del manto nevoso consente la determinazione dell'equivalente in acqua corrispondente e quindi del bilancio di massa del ghiacciaio. In particolare l'equivalente in acqua (WE) si ottiene moltiplicando l'altezza della neve per la sua densità

$$\text{SWE} = \text{Snow Depth [m]} \times \text{Snow Density [kg/mc]}$$

Le altezze della neve accumulata, che possono raggiungere anche diversi metri, consentono di effettuare le analisi di densità del manto nevoso esclusivamente in alcuni punti rappresentativi del ghiacciaio. Le dimensioni delle trincee non sono importanti, piuttosto devono essere orientate in modo che l'irraggiamento solare non influenzi le misure, poiché in presenza di accumuli nevosi consistenti la loro realizzazione può durare diverse ore (fig. 8.3).

Informazioni aggiuntive rispetto a quelle di densità derivano, inoltre, dal profilo stratigrafico del manto nevoso, che consente di risalire all'andamento climatologico dell'inverno, ma non risulta fondamentale ai fini della definizione della densità della neve. Questa operazione è solitamente svolta da una persona molto preparata in grado di riconoscere i cristalli, individuare gli strati nevosi e le classi di durezza di ogni strato, determinate in campagna glaciologica con il test della mano (Colbeck e al., 1990). Il riconoscimento dei diversi strati di neve può rivelarsi utile in fase di elaborazione dei dati; le analisi delle diverse trincee, infatti, possono essere comparate anche se si trovano in zone distanti tra loro.



Fig. 8.3 – Trincea sul ghiacciaio di Fontana Bianca il 10/05/2007 (a sinistra) e il 13/05/2001 (a destra, Fonte: Prov. Aut. Bolzano).

Una volta scavata la trincea, con le pale da neve, fino a toccare la superficie del ghiacciaio, si misura la profondità della buca. Così, partendo dalla superficie, si prelevano campioni di neve utilizzando un cilindro cavo di 20 cm di lunghezza e del volume noto di 500 cm<sup>3</sup>. Successivamente,

facendo attenzione a non far fuoriuscire la neve, si svuota il campione prelevato “la carota” in un sacchetto di nylon e si pesa il contenuto con un dinamometro a molla della precisioni di 500 g. Si ripete così tale azione per il numero di volte necessarie sino a toccare il ghiaccio (fig. 8.4). Tutte le misurazioni vengono annotate in un quaderno di campagna operativa sul campo registrando i dati di lunghezza del campione prelevato, il suo peso e verificando alla fine che la somma delle singole misure sia uguale alla profondità della trincea misurata all’inizio del lavoro.

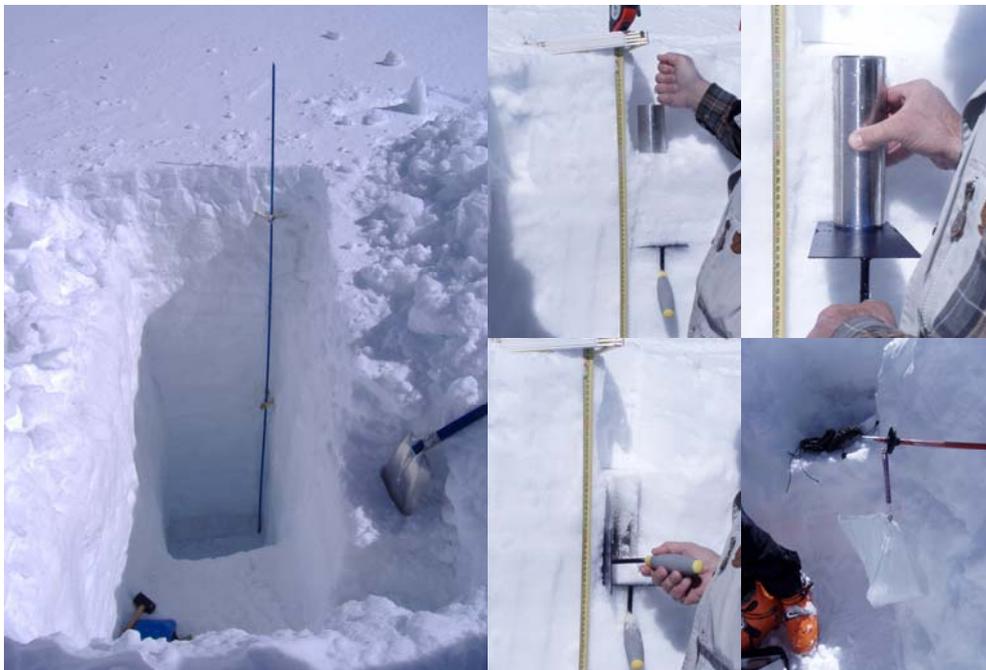


Fig 8.4 – La trincea e le operazioni di misura della densità della neve.

La profondità delle due trincee scavate sul ghiacciaio di Fontana Bianca il 10 maggio 2007 ha fatto registrare valori di poco superiori al metro di neve, nettamente sotto la media dei 16 anni di misure. Queste sono state realizzate alle quote di 3200 e 3050 m s.l.m. nei pressi delle paline 1 e 10 rispettivamente ed hanno concorso alla determinazione della densità del manto nevoso e all’analisi stratigrafica.

## **9. ATTIVITÀ ESTIVA**

Una volta terminate le operazioni per il calcolo dell'accumulo invernale, si procede all'osservazione dello scioglimento (ablazione) prima del manto nevoso e poi del ghiaccio. Generalmente a settembre o ad inizio ottobre, quando ha inizio l'accumulo successivo, si effettua l'ultima uscita sul campo con cui si chiude il bilancio di massa.

Per poter quantificare le variazioni volumetriche del ghiacciaio, siano esse pulsazioni positive o negative, si fa riferimento alle cosiddette paline ablatimetriche, aste trivellate nel ghiaccio, che con lo scioglimento vengono ad emergere sempre più dallo stesso.

La chiusura del bilancio, con l'ultima lettura dell'emersione delle paline e dello spessore dell'eventuale neve invernale residua, è avvenuta il 12 ottobre 2007.

Durante l'anno idrologico 2006/2007 sono state effettuate nove uscite sul ghiacciaio di Fontana Bianca, durante le quali sono state eseguite le seguenti operazioni:

- attivazione delle stazioni idrometriche
- lettura delle paline ablatimetriche
- trivellazione delle nuove paline
- misure di portata
- rilievo dei contorni glaciali con strumentazione GPS

### **9.1 Attivazione delle stazioni idrometriche**

Il primo appuntamento dell'attività estiva è l'attivazione delle stazioni idrometriche, che si trovano in corrispondenza dei rii che sgorgano rispettivamente dalle lingue sinistra e destra del ghiacciaio di Fontana

Bianca. Queste sono state costruite durante l'estate del 2000, sotto la direzione del prof. Kaser dell'Istituto di Geografia dell'Università di Innsbruck dai suoi studenti, e con la collaborazione del personale dell'ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano. Nonostante l'ubicazione di tali stazioni ne consenta l'attivazione solo nel periodo estivo, esse rappresentano tuttavia un importante termine di confronto per i risultati di bilancio derivanti dall'approccio glaciologico classico.

Nell'anno 2007 sono state messe in funzione il 7 giugno e rimosse il 12 ottobre durante la giornata di chiusura dell'anno idrologico. In questo modo è stato possibile il monitoraggio dei deflussi per un periodo consistente, consentendo quindi la verifica di alcuni risultati del bilancio.

Le due stazioni hanno la stessa struttura e si compongono di una intelaiatura in tubi innocenti rivestita da pannelli di legno in modo da creare una sezione uniforme dove il flusso dell'acqua sia regolare. Poiché il deflusso non garantisce una portata consistente, all'estremità verso valle è stato posto uno sbarramento di 10 cm (stramazzo in parete sottile con separazione della vena<sup>6</sup>) costituito da una paratia in ferro mobile. Questa riveste una duplice funzione, garantendo da lato un deflusso misurabile e dall'altro la possibilità farla scorrere verticalmente. Così facendo si riesce a pulire la sezione dai detriti che vi si accumulano, facendoli defluire a valle.

Al centro della sezione vi è un'asta idrometrica, che permette di misurare il livello grazie alla graduazione ogni 2 cm. Quando si attiva la

---

<sup>6</sup> Stramazzo è un termine proprio dell'ingegneria idraulica nell'ambito delle correnti a pelo libero. Si dice stramazzo una apertura in uno sbarramento di un flusso liquido, che permette il passaggio del liquido a pressione atmosferica. In altre parole uno stramazzo è il sormonto di un ostacolo da parte di una corrente liquida. Tra gli stramazzi si distinguono quelli in parete grossa e in parete sottile. I primi sono solitamente realizzati in muratura o calcestruzzo, la vena liquida sormonta la soglia e aderisce al paramento di valle. Gli stramazzi in parete sottile sono installati ove si voglia una misura più precisa della quantità di deflusso; usualmente sono realizzati con soglia verticale in metallo, la vena liquida si distacca dalla soglia ed il deflusso avviene a pressione atmosferica. Gli stramazzi in parete sottile devono essere realizzati in modo che vi sia comunicazione tra l'aria al di sotto della vena liquida e l'atmosfera circostante, infatti l'acqua può contenere gas disciolti, quindi assorbe aria dalla superficie inferiore e provoca una depressione che disturba il moto (Citrini e Nosedà, 2000).

stazione si installa una sonda idrometrica, uno strumento cioè in grado di rilevare la temperatura e il livello dell'acqua. Questa viene collegata ad un acquirente dati a basso consumo (*data logger*) che si alimenta a batterie ricaricabili mediante pannelli solari. Dotato di memoria interna permette la registrazione dei livelli ad intervalli temporali orari.

Il giorno del sopralluogo, le due stazioni si presentavano coperte di neve e ghiaccio e per attivarle è stato necessario rompere il ghiaccio all'interno della sezione di legno e scavare alcuni canali nella neve a monte delle stesse, in modo da intercettare l'acqua di fusione e convogliarla verso le stazioni stesse.



Fig. 9.1 – Le due stazioni idrometriche al momento della loro attivazione, il 7-05-2007.  
In alto la stazione idrometrica in orografica sinistra.

Una volta liberata la zona di deflusso dalla neve e dal ghiaccio, è stata posizionata la sonda, adiacente all'asta idrometrica, per verificare la corrispondenza dei valori misurati.

Conoscere il valore del livello dei due rii è molto importante se messo in relazione alla quantità d'acqua che transita dalle due stazioni. La relazione tra livello d'acqua e portata relativa è possibile ricavarla solamente effettuando delle misure dirette di portata. Quest'ultima viene calcolata attraverso il mulinello idrometrico (fig. 9.2), strumento di precisione che permette di misurare la velocità dell'acqua ed ottenere in base ad essa il calcolo della portata. Il fluire dell'acqua imprime una rotazione all'elica innestata sul mulinello e ad ogni rivoluzione dell'albero si genera un impulso che viene trasmesso ad un contatore con base temporale; permette cioè di convertire il numero di rivoluzioni dell'elica immersa in acqua in velocità lineare attraverso una relazione di taratura.



Fig. 9.2 – Mulinello idrometrico.

In questo caso il mulinello viene immerso nella corrente a mezzo di aste idrometriche verticali. Prima di cominciare si dovrà tendere da una sponda all'altra, al di sopra dell'acqua, una "cordella" metrica in modo da poter riferire le misure sulle verticali ad una precisa posizione trasversale relativa. Le velocità vengono misurate lungo verticali successive sulla sezione bagnata del profilo. In corrispondenza di ogni misura un secondo operatore annota la posizione trasversale progressiva, la posizione verticale

rispetto al fondo dell'asse del mulinello ed il numero di giri di volta in volta misurato.

Si è pensato di non addentrarsi, per quanto riguarda il presente studio, nell'analisi delle relazioni matematiche su cui si basa tale metodo di misura, le scelte di misura adottate e la parametrizzazione del metodo essendo argomentazioni troppo specifiche e non determinanti per la ricerca stessa.

## **9.2 Lettura delle paline ablatometriche**

La palina ablatometrica, a cui più volte si è fatto cenno, è un'asta infissa in un ghiacciaio in posizione nota (generalmente definita per mezzo di rilievo topografico GPS) e rappresentativa del comportamento della porzione di ghiacciaio per un raggio di circa 50 metri, all'interno del quali ci si aspetta che il bilancio di massa non vari in modo significativo (Kaser et al., 2003). Un'ideale e consistente rete di paline è fondamentale per il calcolo del bilancio di massa, anche se analisi statistiche di diverse ricerche concordano sull'affermare che 10-15 paline sono sufficienti per calcolare il bilancio di massa di un ghiacciaio, indipendentemente dalla sua estensione (Fountain e Vecchia 1999). Ricordando che il bilancio di massa è strettamente legato alla quota, primariamente perchè l'ablazione diminuisce con l'altitudine in quanto connessa alla temperatura che diminuisce anch'essa con la quota, è importante che la loro distribuzione segua il profilo longitudinale e che interessino tutta l'estensione altitudinale del ghiacciaio (Kaser et al., 1999).

La lettura della emersione relativa di tale asta rispetto alla superficie glaciale in momenti successivi consente di seguire le fasi di accumulo e anzitutto di ablazione di un apparato glaciale, rispettivamente quando la parte di asta che emerge dal ghiaccio si accorcia o si allunga. Il rilievo

periodico della posizione di una certa palina consente di definire il movimento del punto sul ghiacciaio ad essa solidale.

Le paline utilizzate sul ghiacciaio di Fontana Bianca sono di plastica bianca e sono composte da elementi di due metri collegati tra loro grazie ad un raccordo in PVC<sup>7</sup>. Se da un lato il colore bianco non facilita il loro ritrovamento, dall'altro questo riduce l'assorbimento dei raggi solari e il conseguente riscaldamento della palina, evitando che, come nel caso delle paline in metallo, sciolgano il ghiaccio del buco dove sono infisse e falsino la misura abbassandosi nel ghiacciaio. La flessibilità, intesa come la capacità di piegarsi sotto il manto nevoso senza spezzarsi, ed il peso contenuto, indispensabili per il trasporto sul ghiacciaio, completano le caratteristiche positive delle paline utilizzate (fig. 9.3).



Fig. 9.3 – Palina sepolta dalla neve (sinistra) e fase di trasporto paline.

---

<sup>7</sup> Il cloruro di polivinile, noto anche come polivinilcloruro o con la corrispondente sigla PVC, è il polimero del cloruro di vinile. È una delle materie plastiche di maggior consumo al mondo.

Solitamente dopo qualche anno si deve approfondire il buco nel quale è infilata la palina, poiché con lo scioglimento progressivo del ghiaccio questa rischia di fuoriuscire completamente e non svolgere più la sua funzione. Per tale operazione viene utilizzata la trivella a vapore Heucke, che prende il nome dal suo inventore Erich Heucke, capace di perforare il ghiaccio fino a 12 m di profondità (fig. 9.4). Si tratta di un sistema montato su uno zaino che sfrutta in parole semplici il “principio della pentola a pressione”, generando vapore caldo che risulta necessario a sciogliere il ghiaccio. Grazie alla facilità di trasporto e alla relativa semplicità di utilizzo è necessario un solo operatore per farla funzionare (fig. 9.5). Una volta ultimato il foro, i singoli spezzoni vengono montati prima di essere inseriti ed il primo ad essere infilato, cioè il più profondo, è marcato con una bomboletta spray di colore rosso, in modo da essere riconoscibile quale ultimo spezzone presente nel ghiaccio, una volta emerso.

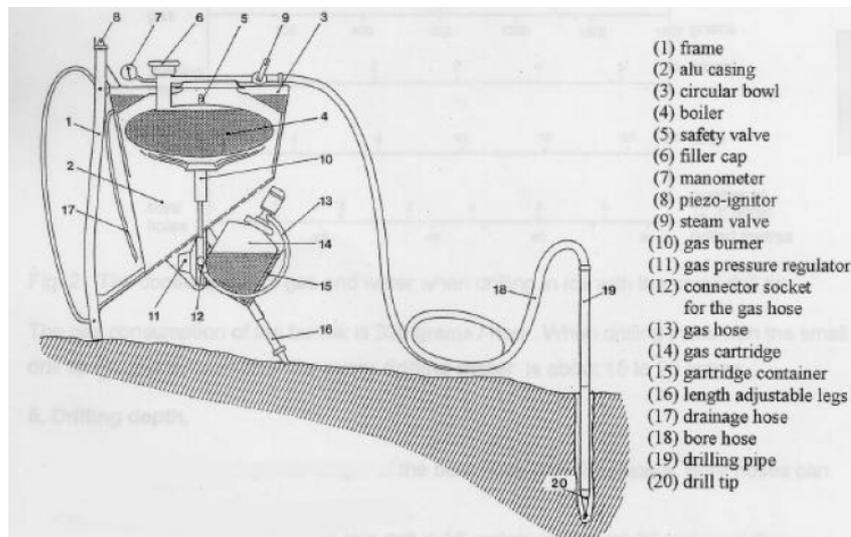


Fig. 9.4 – La trivella a vapore Heucke (Fonte: Kaser et al., 2003).

Sul ghiacciaio di Fontana Bianca sono presenti attualmente 19 paline ablatimetriche. Ogni asta è identificata da una combinazione di due numeri (per esempio 1/99), di cui il primo indica la numerazione progressiva di

posizionamento e il secondo l'anno in cui questa è stata infissa nel ghiaccio. In questo modo è possibile tenere un registro aggiornato e ricostruire la storia di ognuna di esse.

Solitamente non si ha una serie continua di letture delle paline durante tutti i sopralluoghi effettuati. Le cause possono essere molteplici:

- palina completamente sepolta dalla neve,
- palina sepolta da coltre detritica (tipicamente quelle sulle lingue glaciali),
- palina spazzata da una valanga o semplicemente caduta,
- ricognizione incompleta.

Durante l'estate 2007 sono state trivellate 6 paline (1/07; 2/07; 3/07; 11/07; 14/07; 16/07 e 20/07) che vanno a sostituire quelle vecchie, ed una nuova, la 21/07, per ampliare la rete di monitoraggio. Quest'ultima è stata sistemata nella zona sotto Cima Sternai, che rappresentava sempre un'incognita sull'andamento del bilancio di massa.



Fig. 9.5 – Fase di perforazione con la trivella a vapore Heucke.

Va segnalato che trivellando la palina 3/07, sita nella parte nord occidentale del ghiacciaio, ad una quota di 3250 m s.l.m. circa, si è toccato il letto roccioso con un foro di 10 m. Questo significa che lo spessore del ghiaccio in quel punto è di soli 10 metri, in realtà informazione questa che appare ancor più grave se si considera la quota altitudinale.

Per misurare l'ablazione si procede a letture successive delle paline (fig. 9.6), e conoscendo la lunghezza dell'asta che sporgeva all'osservazione precedente si rileva, tramite un normale metro, la riduzione glaciale in quel punto. L'emersione relativa delle paline moltiplicata per la densità della neve e/o del ghiaccio rappresenta la perdita di massa espressa in  $\text{kg}/\text{m}^2$  o in mm di colonna d'acqua.

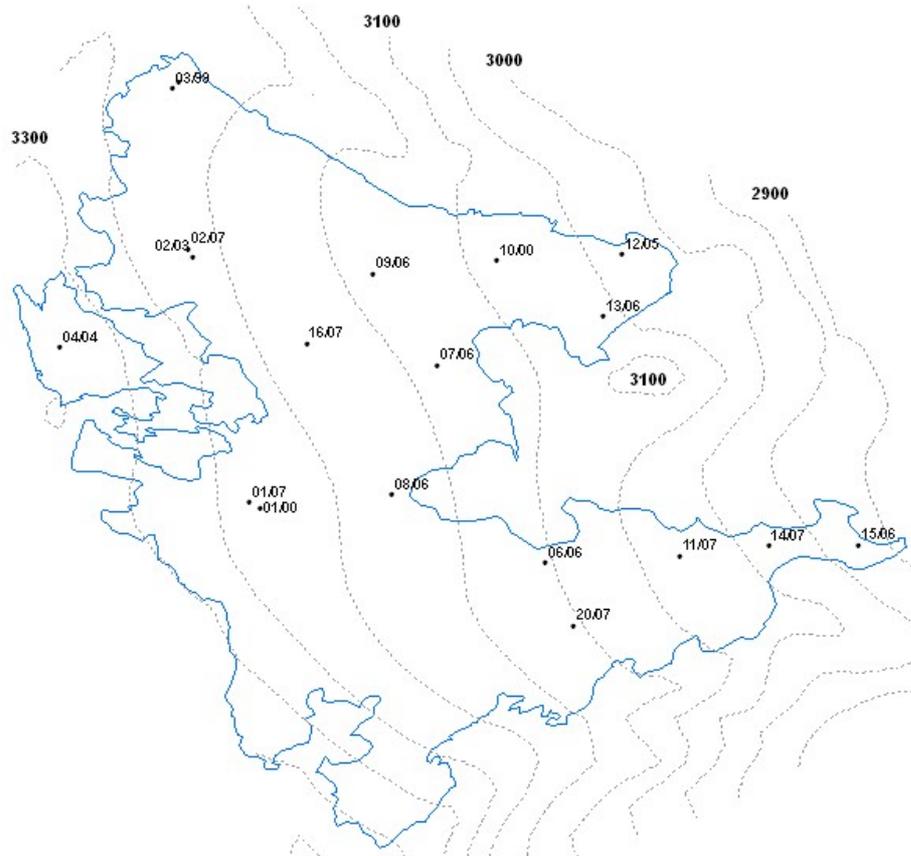


Fig. 9.6 – Distribuzione delle paline sul ghiacciaio di Fontana Bianca.

### 9.3 Rilievo del contorno glaciale

In una fase di forte riduzione dei ghiacciai, è molto importante aggiornare e confrontare le variazioni areali. Sul ghiacciaio di Fontana Bianca vengono rilevati periodicamente i contorni dell'apparato glaciale e la posizione delle paline. Poiché il ghiacciaio è un sistema dinamico, è necessario aggiornarne la localizzazione per verificare che le paline rientrino ancora nella precedente fascia altimetrica (Diolaiuti et al., 2001).

Tale operazione è realizzata in collaborazione con l'Ufficio per il Rilevamento Geodetico della Provincia Autonoma di Bolzano. La campagna topografica del 24 agosto 2007 è stata realizzata con l'utilizzo di strumenti GPS (Global Position System) in modalità *Real Kinematic Time* (RTK). Tale metodologia consente la determinazione in tempo reale delle coordinate dei punti battuti e non richiede il post processamento. Questo in termini operativi offre un'alta produttività, che significa velocità, infatti per ogni punto da rilevare è sufficiente posizionarsi per pochi secondi. La configurazione standard per questo tipo di rilievo consiste in un minimo di due strumenti GPS muniti di apposito radio modem. Uno strumento (*Reference*) viene stazionato su un punto di coordinate note (punto fiduciale), mentre il secondo (*Rover*) viene spostato sui punti da determinare (fig. 9.7). Le stazioni durante la misura devono avere un minimo di cinque satelliti in comune. La stazione di riferimento, dotata di un opportuno collegamento radio, ritrasmette i dati ricevuti dai satelliti al ricevitore *Rover*. Questo, utilizzando i dati che acquisisce direttamente dai satelliti attraverso la propria antenna GPS e quelli ricevuti contemporaneamente dalla stazione di riferimento, è in grado d'inizializzare, di risolvere le ambiguità e di determinare così con precisione centimetrica (circa 1-5 cm) i punti da rilevare (Di Sclafani, 2007).

A causa della morfologia del ghiacciaio e per ottimizzare i tempi di misura, il rilievo è stato eseguito utilizzando un totale di 5 strumenti GPS,

entrambi a doppia frequenza e muniti di radio modem Sateline 3AS. Per garantire una copertura radio e ricevere le correzioni RTK lungo tutto il perimetro del ghiacciaio, è stato necessario utilizzare contemporaneamente due stazioni di riferimento poste su punti di coordinate note.

Le restanti tre apparecchiature sono state impiegate per i rilievi di dettaglio.

Per la stazione base:

1 Trimble Serie 5700 con antenna TRM ZEPHYR GEOD

1 Leica Serie 1200 con antenna AX 1202 GG

Per i Rover:

2 Leica Serie 500 con antenna AT 502

1 Leica Serie 1200 con antenna AT 1202 GG

Sul ghiacciaio erano presenti due squadre dotate di GPS che hanno marcato 130 punti, tra cui tutte le paline ablatimetriche, l'emersione rocciosa al centro del ghiacciaio ed i contorni delle due lingue glaciali. I dati sono stati utilizzati per calcolare la superficie glaciale e la relativa variazione rispetto al rilievo precedente, godendo di una precisione centimetrica, decisamente esaustiva per tale scopo.



Fig. 9.7 – Il *reference* a sinistra e *rover* a destra.

#### 9.4 Misure di Portata

Durante le uscite estive sul ghiacciaio si cerca, compatibilmente con le necessità, di programmare almeno tre misure di portata. Questo per avere una buona correlazione tra i valori del livello dei deflussi alle stazioni e la portata relativa giornaliera.

Nell'estate 2007 sono state effettuate le seguenti misure di portata presso le due stazioni idrometriche:

- 7 giugno misura presso la stazione idrometrica sinistra;
- 13 giugno misura presso la stazione idrometrica destra;
- 20 luglio 2 misure presso la stazione idrometrica sinistra e destra.

Prima di procedere alla misura è stato necessario assicurarsi che la stazione sia funzionante e che il *data logger* operi correttamente. Si sono altresì rimossi i detriti accumulatosi nella sezione della stazione, in modo da

rendere il flusso idrico regolare. Una volta eseguita questa operazione si è proceduto alla misura di portata con il mulinello (fig. 9.8).



Fig. 9.8 – La stazione idrometrica in orografica sinistra e relativa misura di portata (in alto); rimozione dei detriti e misura di portata nella stazione idrografica in orografica destra (24 agosto 2007).

Le operazioni appena descritte sono state eseguite per entrambe le stazioni idrometriche e sono necessarie dal momento che le stazioni non sono perfettamente in “bolla”, e quindi non si possono utilizzare le formule di ingegneria idraulica per calcolarne la portata, conoscendo le dimensioni della sezione.

## **9.5 Chiusura del bilancio**

A causa di una nevicata di fine settembre che ha portato circa 80 cm di neve fresca in quota, la chiusura del bilancio è stata possibile, per motivi di sicurezza, solo il 12 ottobre 2007. In tale data sul ghiacciaio erano presenti circa 35 cm di neve uniformemente distribuita su tutta la superficie. Dato lo spessore non trascurabile, si è deciso di inserirla nel calcolo del bilancio di massa. Per fare questo sono state scavate tre trincee per misurare la densità della neve, rispettivamente presso le paline 1, 3 e 10. Contemporaneamente sono state misurate le sporgenze di tutte le paline ablatimetriche.

In tale data sono state rimosse anche le due sonde automatiche che misurano il livello dell’acqua nelle stazioni idrometriche, per poter scaricare tutti i dati registrati ed evitare che si rovinino durante l’inverno. La stazione sulla lingua sinistra si presentava ghiacciata (fig. 9.9) e la rimozione della sonda è stata difficoltosa ed ha richiesto notevole impegno da parte degli operatori; l’altra stazione si presentava completamente asciutta e priva di ghiaccio (fig. 9.10).

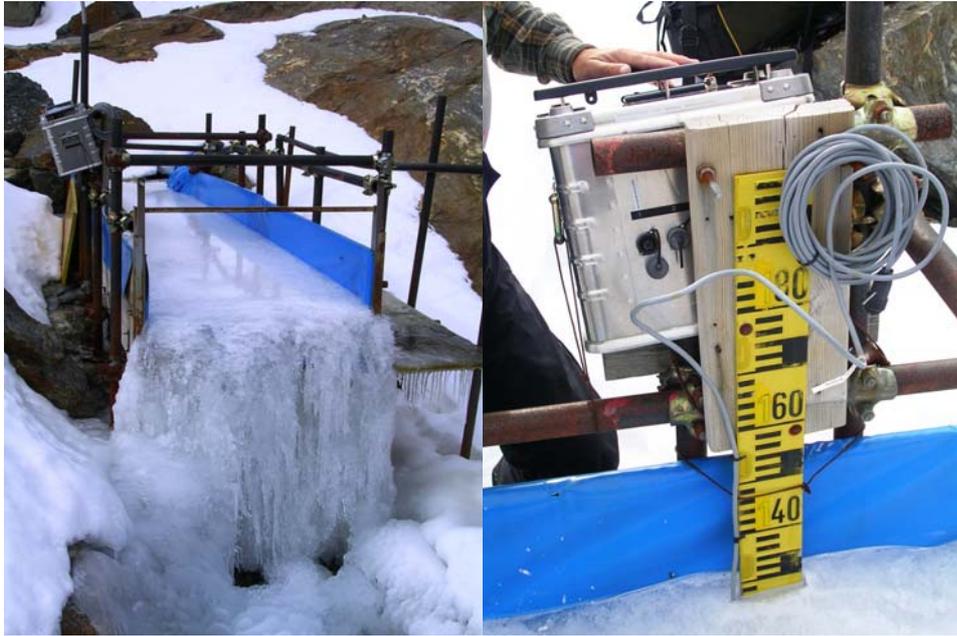


Fig. 9.9 – La stazione idrometrica sinistra il 12 ottobre 2007.

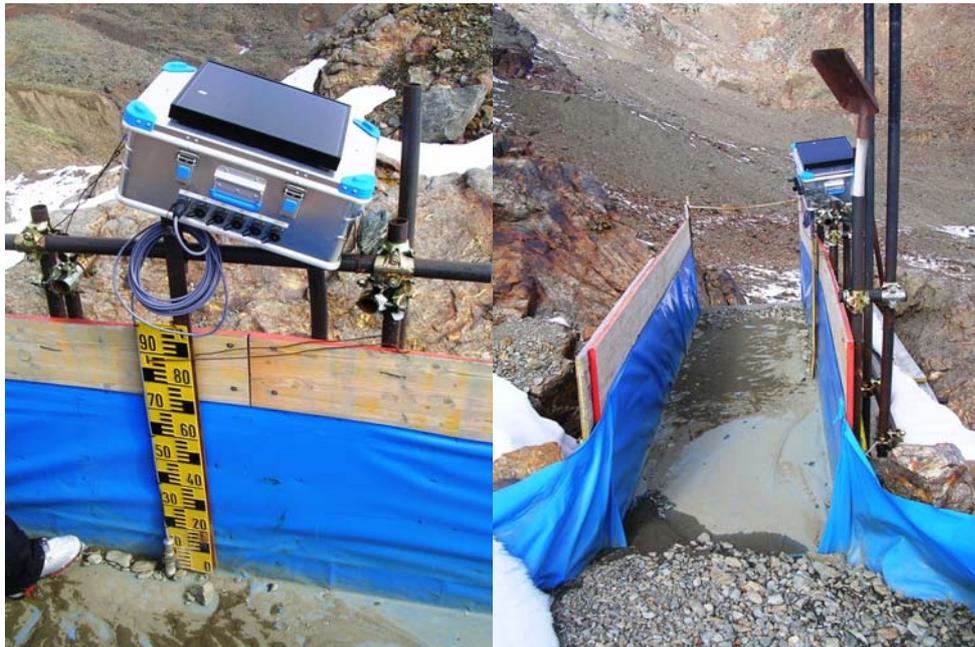


Fig. 9.10 – La stazione idrometrica destra il 12 ottobre 2007.

**Parte Quarta**  
**ELABORAZIONE DATI E**  
**ANALISI RISULTATI**

## **10. ELABORAZIONE DATI**

Una volta concluse tutte le attività sul campo, si è proceduto all'elaborazione dei dati, che è stata effettuata interamente presso l'ufficio Idrografico della Provincia Autonoma di Bolzano. Questa fase ha una rilevanza fondamentale per poter estrapolare dai dati raccolti in ambiente le informazioni necessarie per poter fare poi delle considerazioni a più ampio raggio sull'andamento climatico dei ghiacciai.

Il presente lavoro è stato effettuato con l'ausilio di strumenti e procedure GIS (Geographic Information System – Sistema Informativo Geografico), i quali possiedono due importanti innovazioni tecnologiche: la capacità di acquisire, manipolare ed analizzare simultaneamente cartografie di qualunque natura ed informazioni ad esse correlate e la possibilità di

creare delle mappe ad hoc in seguito alle interrogazioni di questi dati. In un GIS i dati sono memorizzati in formato digitale e pertanto risultano fisicamente più compatti rispetto alle cartografie originali, tabelle o altri supporti convenzionali (Ballestra et al., 1996).

In questo capitolo verrà descritte con precisione l'ordine delle operazioni effettuate per calcolare l'accumulo invernale prima e il bilancio di massa dopo. La prima operazione svolta è stata quella di aggiornare il perimetro e l'estensione del ghiacciaio usufruendo delle informazioni raccolte durante la campagna GPS. Su questa base è stato calcolato l'accumulo ed il bilancio netto annuale. Infine sono state sviluppate le misure di portata dai dati raccolti dalle stazioni automatiche e dalle misure effettuate con il mulinello idraulico.

### **10.1 Contorno glaciale**

La prima operazione, come già detto, è stata quella di realizzare il nuovo contorno del ghiacciaio. La prima fase di verifica dei dati registrati e della correzione della quota, sono stati eseguiti dal personale dell'Ufficio per il Rilevamento Geodetico con appositi software. Infatti, come noto, dalle misure GPS si ottengono solo le quote riferite all'ellissoide (WGS 84). Per la stima della quota ortometrica, cioè quelle misurate in relazione al livello medio del mare e quindi rispetto al geoide (Leica, 2003), è stata seguita un'interpolazione con il modello del geoide locale della Provincia di Bolzano, che consente di ottenere precisione nella stima delle quote ortometriche variabile da  $\pm 20$  cm.

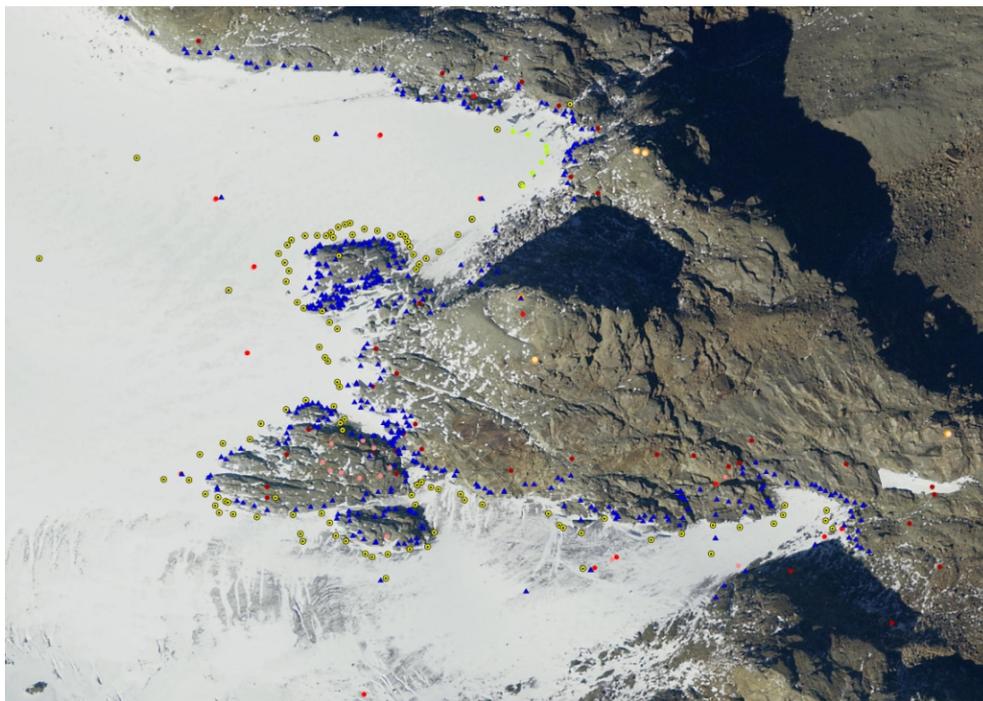


Fig. 10.1 – Punti marcati con i GPS durante il rilievo del 24 agosto 2007.

Ci è stato poi fornito un file in formato *excel* con le coordinate dei punti battuti. Questo è stato importato nel programma ArcView. Tali punti sono già inquadrati nel sistema di riferimento ETRS89, che rappresenta il sistema di riferimento cartografico ufficiale utilizzato in Provincia di Bolzano. Come sottofondo è stata poi visualizzata l'ortofoto (volo 2006) (fig. 10.1). Per aggiornare la parte delle due lingue glaciali e delle emersioni rocciose centrali si sono seguiti fedelmente i punti dell'ultimo rilievo, mentre per aggiornare la zona superiore del ghiacciaio si è fatto uso dell'ortofoto e laddove si presentassero manifeste variazioni di contorno si è proceduto a modificarle manualmente.

Un'altra indicazione molto importante per evidenziare la fase di ritiro che sta vivendo il ghiacciaio di Fontana Bianca è fornita dal catasto dei ghiacciai dell'Alto Adige, realizzato su commissione della Provincia Autonoma di Bolzano nel 1997. Si è così potuto visualizzare l'estensione

relativa al catasto del 1997 e confrontarla con il rilievo realizzato nell'estate 2005 e nell'anno 2007.

Rappresentando sovrapposti i 3 stadi temporali di estensione glaciale appare evidente come questa si sia ridotta soprattutto nella zona centrale e nella lingua destra che raggiunge quote altimetriche più basse (fig. 10.2).

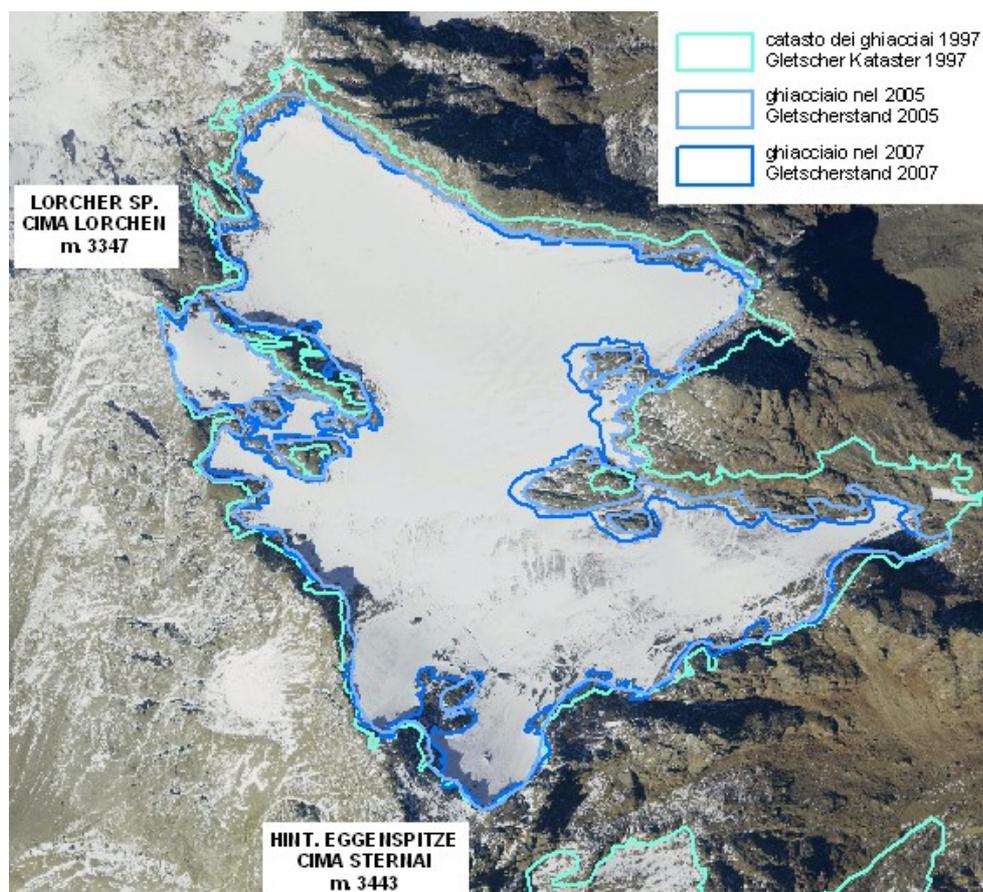


Fig. 10.2 – Variazioni areali del ghiacciaio nel 1997, 2005 e 2007.

Considerando un intervallo temporale di 10 anni, tra il 1997 ed il 2007, la riduzione della superficie glaciale è stata del 20% circa; si è passati infatti da 0.641 km<sup>2</sup> a 0.489 km<sup>2</sup>.

## 10.2 Calcolo dell'accumulo invernale

Il primo passo, per poter giungere alla misura finale dell'accumulo invernale, è stato quello di calcolare la densità della neve. Le misure di pesata dei singoli strati nevosi sono stati inseriti in un applicativo specifico in uso presso l'ufficio Idrografico, per il calcolo automatico della densità e per la realizzazione grafica del profilo stratigrafico (Allegato 1 e 2). La densità per la trincea posta a quota 3200 m s.l.m. è risultata mediamente pari a 387 kg/m<sup>3</sup>, mentre quella posta presso la palina 10 a 3050 metri di quota 407 kg/m<sup>3</sup>. Alla luce di tale differenza si è deciso di mantenere la prima misura valida per calcolare l'accumulo di tutti i sondaggi effettuati alla quota superiore i 3100 m s.l.m., mentre la seconda per quelli posti ad altimetrie inferiori.

Successivamente sono stati scaricati in “ambiente Excel” i punti dei sondaggi che riportavano le coordinate x,y,z e le informazioni relative all'altezza della neve inserita in campagna (h). Sono stati aggiunti due campi, uno per la densità e uno per l'equivalente in acqua. Ricordando che l'equivalente in acqua si ottiene moltiplicando la densità della neve per l'altezza del manto nevoso, sono stati automaticamente calcolati i mm WE per ogni punto. Assunte tali densità costanti su tutto il ghiacciaio gli equivalenti in acqua sono risultati compresi tra 400 e 1000 mm WE (fig. 10.3).

sondaggio	punto gps	h	x	y	quota	densita`	mm WE	note
1	223	210	635526	5149428	3291	387	813	atterraggio
2	224	110	635568	5149433	3288	387	426	palina 4 - sporgenza su neve 90 cm
3	225	155	635592	5149437	3280	387	600	
4	226	170	635612	5149426	3272	387	658	
5	227	190	635647	5149415	3260	387	735	
6	228	175	635636	5149393	3269	387	677	
7	229	180	635615	5149383	3285	387	697	
8	230	130	635598	5149391	3293	387	503	
9	231	55	635589	5149387	3299	387	213	sassi
10	232	105	635645	5149332	3274	387	406	
11	233	235	635674	5149317	3266	387	909	
12	234	160	635657	5149273	3276	387	619	
13	235	160	635658	5149271	3276	387	619	
14	236	190	635669	5149246	3268	387	735	
15	237	185	635674	5149222	3266	387	716	sotto rocce

Fig 10.3 – Tabella excel con i dati relativi ad alcuni sondaggi.

Il file contenente quanto appena descritto, è stato quindi importato nel programma ArcGis 8.3. In questo modo è possibile gestire file excel e informazioni di carattere cartografico, in formato *shape*. Caricati successivamente i *layers* del contorno glaciale, delle curve di livello e dei sondaggi con il relativo equivalente in acqua, non resta che identificare e tracciare le aree omogenee di accumulo. Per questa operazione viene sconsigliato l'uso automatico dei programmi GIS (Kaser et al., 2002), e viene suggerito di individuarle secondo interpretazione visiva e di disegnarle a mano. Attraverso una mappa che indica i punti di sondaggio e il loro WE si identificano le zone con comportamento omogeneo (fig. 10.4).

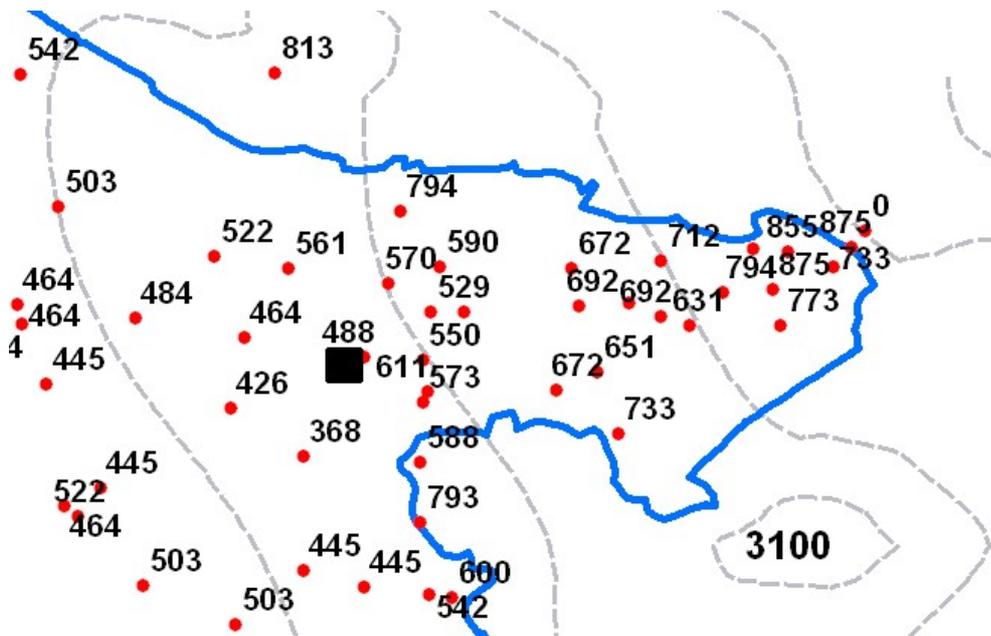


Fig. 10.4 – Particolare della lingua in orografica sinistra che mette in evidenza i punti di sondaggio con l'equivalente in acqua misurato. Il quadrato nero indica la posizione di una trincea.

In una fase dell'elaborazione particolare come questa, la conoscenza del ghiacciaio da parte dell'operatore, la sua capacità d'osservazione sul campo ed il confronto con i risultati relativi agli anni precedenti sono fondamentali per la realizzazione di una carta tematica quanto più

rispondente alla realtà. Una volta stampata tale carta si è proceduto all'individuazione delle diverse aree di accumulo, che sono state disegnate a mano. Successivamente si è acquisita tale rappresentazione grafica con lo scanner e, dopo averla importata in ArcGis, la si è georiferita sulla base dello *shape* del contorno glaciale. Utilizzando l'immagine georiferita come sfondo, e sovrapponendo un nuovo layer con i contorni del ghiacciaio, si è tagliato tale poligono seguendo le linee disegnate sul foglio e si è attribuito ad ogni area il suo valore di WE.

È stato così possibile ottenere una carta tematica della distribuzione dell'accumulo invernale per l'anno idrologico 2006-2007 (fig. 10.5).

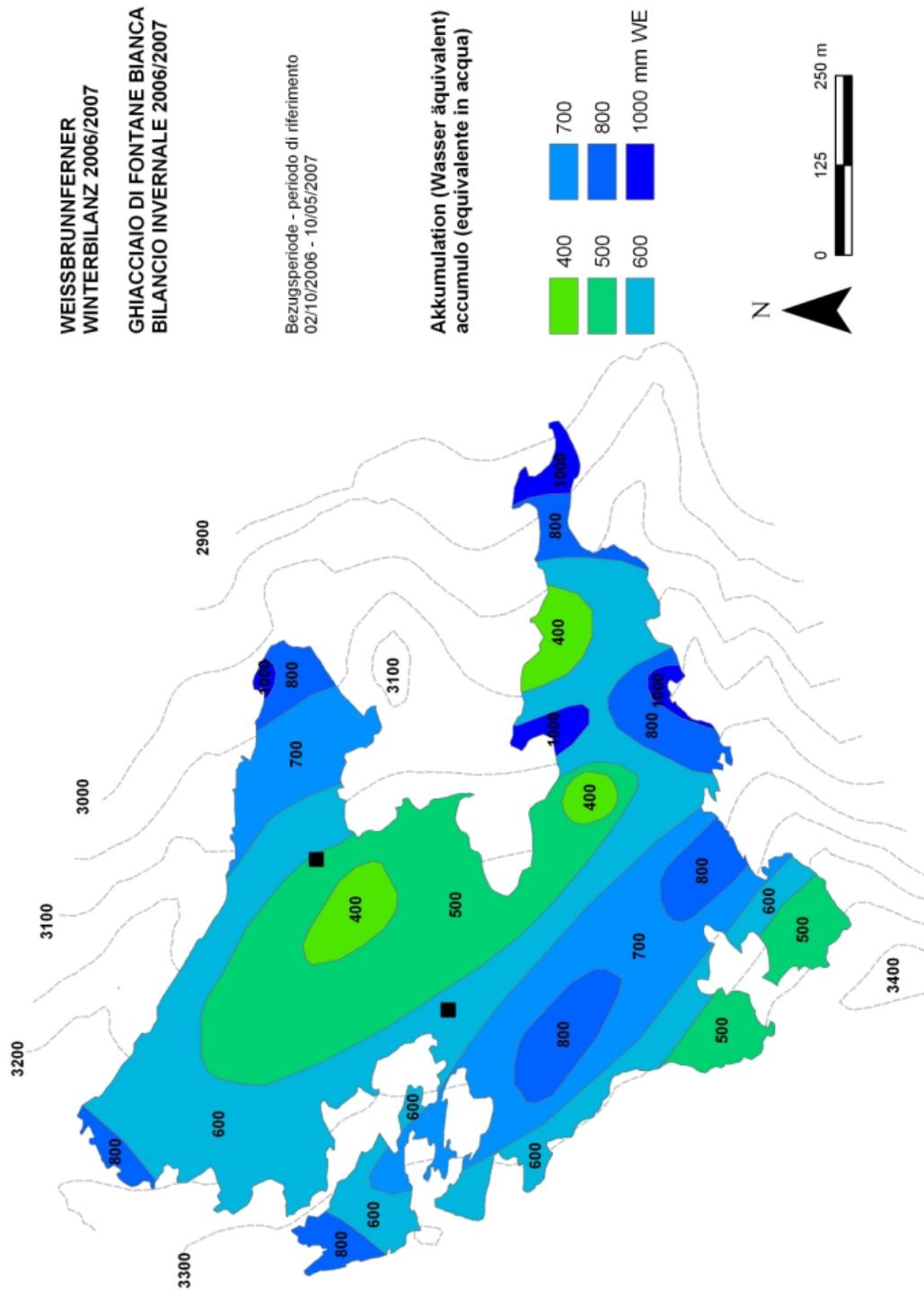


Fig. 10.5 – Distribuzione dell'accumulo invernale nell'anno idrologico 2006 - 2007.

Le zone di maggior accumulo risultano essere quelle alle estremità delle lingue glaciali ed ai piedi di Cima Sternai, dove sovente si stacca una valanga di importanti dimensioni. Le zone convesse al centro del ghiacciaio, laddove vi è il cambio di pendenza, risultano essere invece le regioni dove si riscontra minor presenza di neve, probabilmente perchè sono esposte maggiormente all'azione del vento.

A questo punto per poter disporre dei dati relativi all'equivalente in acqua in relazione alla quota e alla superficie occupata, si è effettuata un'analisi spaziale. Il layer dell'equivalente in acqua è stato, cioè, intersecato con un riportante le fasce altimetriche ogni 50 metri e la suddivisione del ghiacciaio in orografica destra e sinistra (fig. 10.6). Tale operazione consente di individuare tutti i poligoni generatisi dalla sovrapposizione dei due *layers*, conservando però le informazioni di tutti e due gli "strati informativi" di partenza. Si è così ottenuta una carta tematica che rappresenta ogni poligono determinato dall'intersezione dell'equivalente in acqua, della fascia altimetrica e dell'orografia, in modo da poter analizzare il comportamento del ghiacciaio secondo le fasce altimetriche (fig. 10.7).

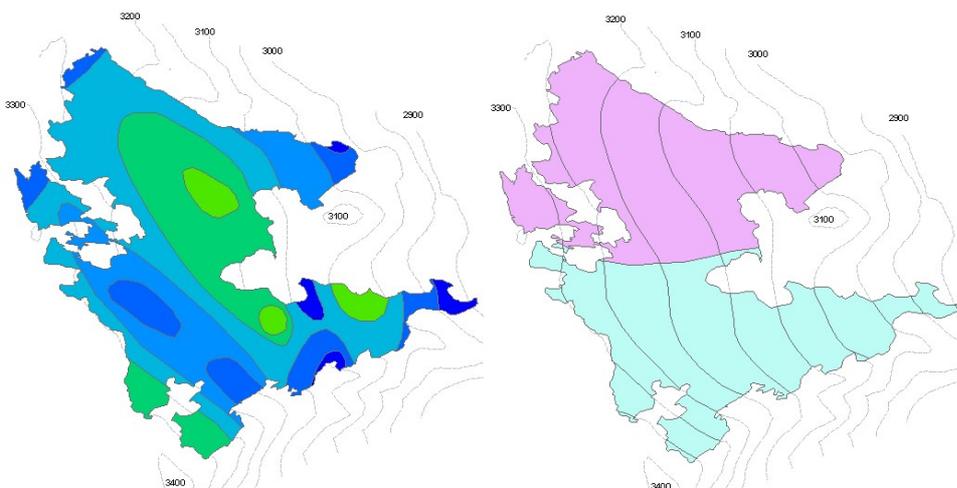


Fig. 10.6 – Il layer dell'equivalente in acqua (sinistra) e quello riportante la suddivisione altimetrica e orografica.

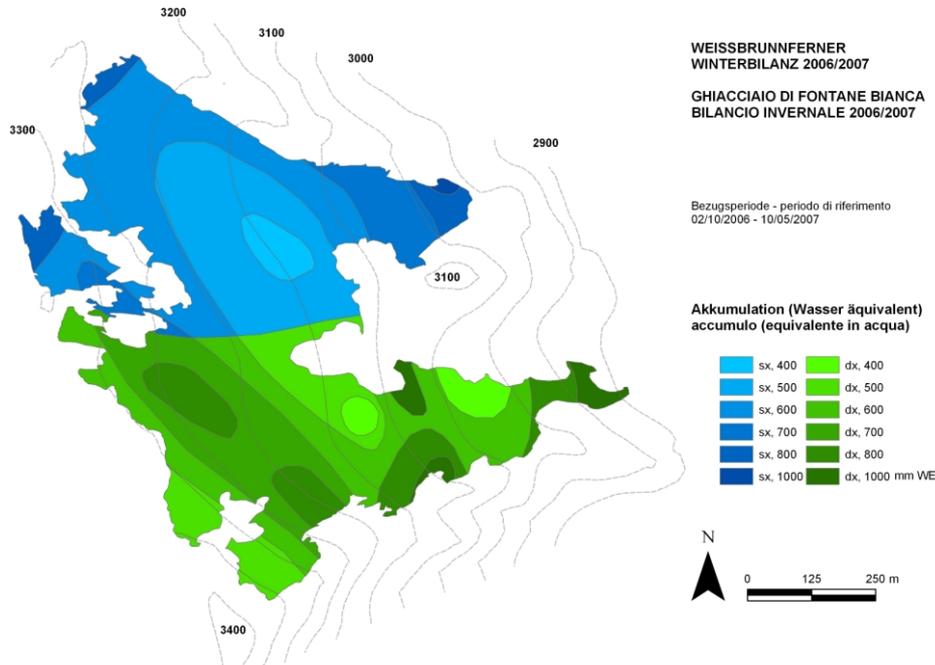


Fig. 10.7 – Il risultato dell’intersezione spaziale: la carta tematica del bilancio invernale diviso per orografia.

Alla rappresentazione grafica della figura 10.7 corrisponde una tabella di dati che sono necessari per poter calcolare l’equivalente in acqua espresso in mm e in metri cubi. Ogni *record* della tabella rappresenta un poligono generato dell’intersezione spaziale e contiene informazioni relative all’area, alla quota, all’orografia ed all’equivalente in acqua. Questi sono stati ordinati per quota e per orografia. Si è poi calcolato il volume relativo di ogni poligono ( $Ab$ ), moltiplicando l’area per l’equivalente in acqua. Per ogni fascia altimetrica è stata calcolato quindi la somma delle aree ( $SA$ ) e dei volumi ( $SAb$ ) che in queste sono comprese. Dividendo ora  $SAb$  con  $SA$  otteniamo l’equivalente medio ( $b$ ) espresso in mm WE per quella fascia altitudinale. Moltiplicando poi ( $b$ ) per ( $SA$ ) e dividendo per 1000, deriviamo il volume di neve che interessa tale fascia, espresso in  $m^3$  di equivalente in acqua. Tale procedura è stata poi automatizzata per ogni fascia altimetrica e per entrambe le zone orografiche del ghiacciaio (fig. 10.8).

Area	quota	orografica	mm WE	Ab	id	SAb	SA	B	b
1131,6	3025	sx	1000	1131587	3025sx				
6571,6	3025	sx	800	5257319	3025sx				
1226,1	3025	sx	700	858291,6	<b>3025sx</b>	7247197	8929	7247	812
21698,3	3075	sx	700	15188796	3075sx				
4741,4	3075	sx	600	2844867	<b>3075sx</b>	18033663	26440	18034	682
353,7	3125	sx	700	247558,6	3125sx				
7448,8	3125	sx	400	2979504	3125sx				
26875,1	3125	sx	500	13437562	3125sx				
15174,6	3125	sx	600	9104734	<b>3125sx</b>	25769359	49852	25769	517
3808,9	3175	sx	400	1523568	3175sx				
54270,8	3175	sx	500	27135421	3175sx				
13529,3	3175	sx	600	8117588	<b>3175sx</b>	36776578	71609	36777	514
4101,0	3225	sx	800	3280803	3225sx				
483,8	3225	sx	500	241921,1	3225sx				
205,9	3225	sx	600	123512	3225sx				
50099,7	3225	sx	600	30059812	3225sx				
1176,6	3225	sx	700	823642,9	<b>3225sx</b>	34529690	56067	34530	616
1120,0	3275	sx	600	672011	3275sx				
1461,8	3275	sx	600	877078,8	3275sx				
7459,1	3275	sx	600	4475466	3275sx				
3,6	3275	sx	600	2180,567	3275sx				
3854,2	3275	sx	700	2697954	<b>3275sx</b>	8724691	13899	8725	628
8111,2	3325	sx	600	4866698	3325sx				
5626,8	3325	sx	800	4501432	3325sx				
1696,2	3325	sx	700	1187341	3325sx				
284,3	3325	sx	700	198985,8	<b>3325sx</b>	10754457	15718	10754	684

Fig. 10.8 – Tabella con tutti i dati di tutti i poligoni in orografica sinistra.

I dati ottenuti sono poi stati inseriti in due tabelle (fig. 10.9), una per l'orografica sinistra e una per la destra. I valori per il ghiacciaio intero relativi all'area (SA) ed al volume (B) sono stati ricavati sommando i dati delle tabelle precedenti. Per calcolare (b), espresso in mm, relativo alle fasce altimetriche di tutto il ghiacciaio si è di diviso (B) con (SA) e moltiplicato tutto per 1000. Per avere un'ulteriore prova di congruenza dei dati, si è verificato che il valore (b) calcolato su tutto il ghiacciaio, sia uguale alla media dei due valori calcolati per l'orografica destra e quella sinistra.

sx	SA	B	b
3375			
3325	15718	10754	684
3275	13899	8725	628
3225	56067	34530	616
3175	71609	36777	514
3125	49852	25769	517
3075	26440	18034	682
3025	8929	7247	812
2975			
2925			
2875			
	242514	141836	585

dx	SA	B	b
3375	1516	758	500
3325	22917	12102	528
3275	37612	24241	644
3225	48261	35264	731
3175	50455	31570	626
3125	30115	17601	584
3075	23144	17318	748
3025	22296	11821	530
2975	5206	3855	740
2925	5479	5264	961
2875	286	286	1000
	247287	160079	647

Fig. 10.9 – Le tabelle con i dati relativi all'orografica sinistra e destra del ghiacciaio.

hight [m.a.s.l.]	surface [m <sup>2</sup> ]	B [m <sup>2</sup> we]	b [mm we]
3375	1516	758	800
3325	38635	22856	849
3275	51511	32965	978
3225	104328	69794	947
3175	122064	68347	912
3125	79967	43371	922
3075	49584	35351	977
3025	31225	19068	1004
2975	5206	3855	985
2925	5479	5264	1054
2875	286	286	1400
	489802	301915	616

Complessivamente l'accumulo registrato sul ghiacciaio di Fontana Bianca nell'inverno 2006/07 (30/09/2006 - 10/05/2007) è stato pari ad un volume di 301.915 m<sup>3</sup> di equivalente in acqua, ossia pari ad una colonna d'acqua di 616 mm uniformemente distribuita sulla superficie glaciale di 489.802 m<sup>2</sup>

(fig. 10.10 sopra).

### 10.3. Il bilancio di massa

Come per il calcolo del bilancio invernale, anche nel caso del bilancio di massa, a partire dai valori puntuali sono stati estrapolati quelli areali. In questo caso le informazioni di partenza sono state fornite non dai sondaggi, bensì dalle letture successive delle paline ablatimetriche.

Tutte le variazioni di spessore, la rimozione di spezzoni, l'aggiunta di nuove paline, sono state registrate in un file *excel*, ma come già detto in precedenza, non sempre si hanno dati completi. Il caso più complesso si verifica quando mancano le letture di inizio e/o fine campagna estiva. In tale situazione ci si avvale dei valori di una palina che si trova in prossimità e/o alla stessa quota altimetrica e si confrontano le relative perdite di spessore glaciale (fig. 10.11). Una volta completate tutte le informazioni delle paline, si è conteggiato in modo automatico la perdita totale di neve invernale e di ghiaccio per ogni palina (fig. 10.12).

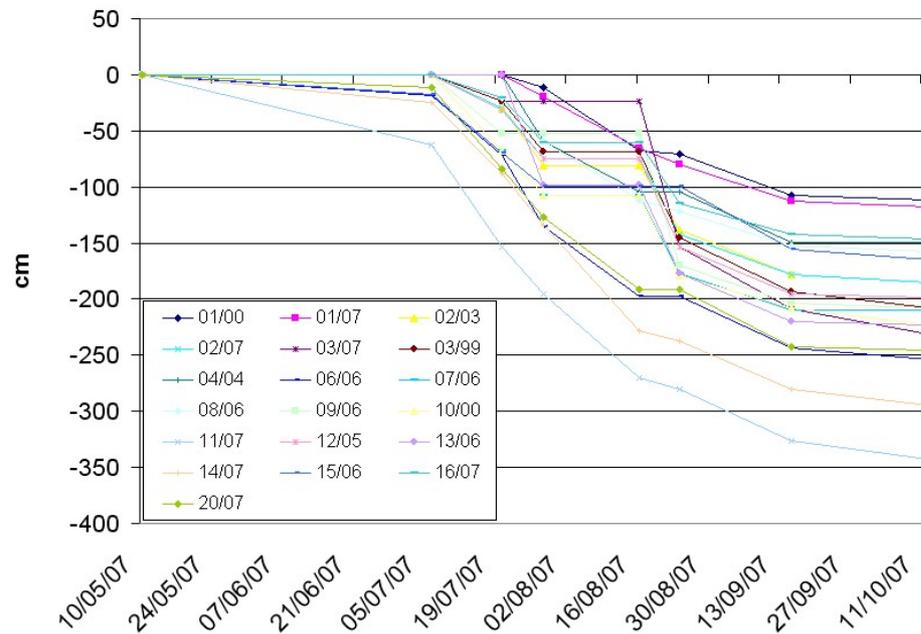


Fig. 10.11 - Ablazione delle paline nell'estate 2007.

Mediamente, la perdita di massa glaciale rispetto al 30 settembre 2006, data della chiusura del bilancio 2005-2006, si è attestata su un valore di circa due metri su tutto il ghiacciaio, compresa tra 112 cm persi alla palina 1 e i 343 cm della palina 11.

Posta la densità del ghiaccio pari a  $900 \text{ kg/m}^3$ , è stato possibile calcolare la perdita di massa in corrispondenza delle paline, espressa sempre in mm di equivalente in acqua, moltiplicando questo valore per i millimetri di ghiaccio sciolti.

Ricordando che al momento della chiusura dell'anno idrologico era presente una copertura nevosa importante, circa 35 cm uniformemente distribuiti su tutto il ghiacciaio, è stato calcolato tale accumulo. I dati raccolti nelle tre trincee, sono stati elaborati e la densità della neve nelle tre trincee, è risultata mediamente pari a  $340 \text{ kg/m}^3$ . Come per calcolare l'equivalente in acqua dell'accumulo invernale, tale valore è stato moltiplicato per lo spessore nevoso misurato presso le paline. Il risultato ottenuto ha modificato i valori precedentemente misurati, infatti la

consistente nevicata, che ha rappresentato un accumulo estivo non trascurabile, è stata poi aggiunta al bilancio di massa misurato, mitigandone in parte il risultato negativo.

Pegel Nr	FEF (cm)	Inisura bilancio 30/09/2000 [mm we L pegel]	06/07/2007		20/07/2007		28/07/2007		16/08/2007		24/08/2007		15/09/2007		12/10/2007			
			FEF (cm) prima	HS dopo														
1/00	215	-1530					226	226	283	283	286	87	27	123	123	128	43	
1/07	147		12	147	103		167	167	213	213	227	227	37	260	58	63	63	43
2/03	223	-1494		253	48		99	99			156	156	29	196	196	203	39	
2/07	223		12	253	115		160	160			227	227	29	263	60	67	67	39
3/99	247	-1584		271	67		112	112			188	188	30	236	236	251	251	23
3/07	247		10	271	-82						48	48	36	103	103	125	125	21
4/04	195	-1458					254	254	299	299				344	344			40
6/00																		
6/06	73	-2448		145	145		208	208	271	66				112	112	122	122	25
7/00																		
7/06	257	-2187		325	120		160	160			229	229	29	262	58	58	58	37
8/03																		
8/06	226	-1539		247	47		85	85	136	136	148	148	32	179	179	184	184	34
8/03	374	-4947																
9/06	125	-2142		177	177		177	177			295	91	39	125	125	129	129	39
10/00	262	-2160		330	122		161	161			233	46	25	75	75	90	90	39
11/05	185	-3078		247	247	2	178	178			133	133		179	179	196	196	28
11/07	185		12	247	247		48	48	123	123	214	214	17	255	255	259	259	30
12/05	262	-1953		294	92		135	135										
13/00																		
13/06	136	-1620					234	234			313	104	10	147	147	150	150	48
14/02																		
14/03*	65	-3015		153	153	25	199	199	283	283								
14/07	65		10	90	90		199	199	293	28	37	37		80	80	95	95	25
16/03	462	-2145		469	469													
15/06	243	-2034		260	260		139	139						196	196	205	205	25
16/08	484	-4485																
16/07	226		12	247	-20		19	19			74	74	34	101	101	105	105	39
20/03**	34	-1935		45	45	3	116	116								157	157	36
20/07	34		12	45	29	3	145	145	209	5				56	56	80	80	36
21/07			12							-25								

Fig. 10.12 – Tabella delle misure delle paline nei rilievi 2006 – 2007.

A questo punto dell'elaborazione si era in possesso di tutte le informazioni necessarie per costruire la carta tematica del bilancio di massa. Il primo passo è stato quello di importare il file *excel* con posizione e quota di tutte le paline ablatimetriche, alle quali sono stati anche associati i valori di perdita di spessore di ghiaccio e di equivalente in acqua fuso (fig. 10.13).

nome	EST	NORD	QUOTA	DATA	cm	[mm we]	NOTA
01/00	635831	5149208	3219	24-ago-07	-112	-862	
01/07	635817	5149217	3222	24-ago-07	-118	-916	
02/03	635741	5149548	3198	24-ago-07	-185	-1532	
02/07	635735	5149558	3199	24-ago-07	-185	-1532	
03/07	635722	5149783	3212	24-ago-07	-231	-1997	
03/99	635715	5149775	3211	24-ago-07	-208	-1782	
04/04	635564	5149426	3316	2004	-149	-1205	
06/06	636211	5149135	3084	24-ago-07	-254	-2201	
07/06	636067	5149402	3120	24-ago-07	-210	-1764	
08/06	636007	5149227	3161	24-ago-07	-158	-1306	
09/06	635982	5149525	3116	24-ago-07	-208	-1739	
10/00	636147	5149543	3068	24-ago-07	-223	-1874	
11/07	636392	5149144	3009	24-ago-07	-343	-2992	
12/05	636314	5149551	3009	24-ago-07	-199	-1689	
13/06	636290	5149468	3037	24-ago-07	-223	-1844	
14/07	636510	5149158	2950	24-ago-07	-295	-2570	
15/06	636630	5149159		2006	-165	-1400	
16/07	635893	5149431	3162	24-ago-07	-146	-1181	
20/07	636250	5149050		2006	-246	-2092	posizione palina 20/03

Fig. 10.13 – Elenco delle paline ablatimetriche con i relativi valori di mm WE.

Con i valori puntuali espressi in WE è stato possibile costruire la carta tematica del bilancio di massa, seguendo la procedura utilizzata per l'accumulo invernale. Si è infatti stampata la mappa con i contorni glaciali aggiornati, con la posizione delle paline con evidenziati i valori di WE. Estrapolando tali quantità all'intera superficie glaciale si sono disegnate le aree omogenee, avvalendosi anche del materiale fotografico scattato nella campagna operativa sul campo. Questa operazione viene eseguita a mano dall'operatore che ha eseguito i sopralluoghi sul ghiacciaio e che conosce bene la sua morfologia (fig. 10.14).



Fig. 10.14.- Elaborazione manuale delle zone di ablazione.

La rappresentazione grafica ottenuta viene quindi acquisita tramite scansione in ambiente Gis e georiferita, sulla base dello *shape* con i contorni del ghiacciaio. L'operazione consente così di ottenere dei dati sovrapponibili e confrontabili. In questo modo si costruisce un nuovo layer con il contorno glaciale, che con la funzione *Cut Polygon Features*, viene suddiviso in poligoni, seguendo esattamente l'andamento delle linee disegnate a mano. Nella tabella degli attributi relativa, si è associato ad ogni poligono il valore di equivalente in acqua espresso in millimetri, che indica la fusione durante l'anno idrologico in corso.

Il procedimento sopra elencato ha per risultato finale la carta tematica della distribuzione spaziale del bilancio di massa durante l'anno idrologico 2006-2007 per il ghiacciaio di Fontana Bianca (fig. 10.15). Come si può osservare dalla carta, la perdita di massa glaciale ha interessato generalmente tutto il ghiacciaio, aumentando in modo inversamente proporzionale alla quota. L'area dove è stata riscontrata la maggior ablazione è risultata la zona convessa in orografica destra, dove c'è il cambio di pendenza maggiore del ghiacciaio. Un segno di costante

assottigliamento del ghiaccio nella zona citata, è dato dalla progressiva espansione dei crepacci, che coinvolgono quasi totalmente la larghezza della lingua.

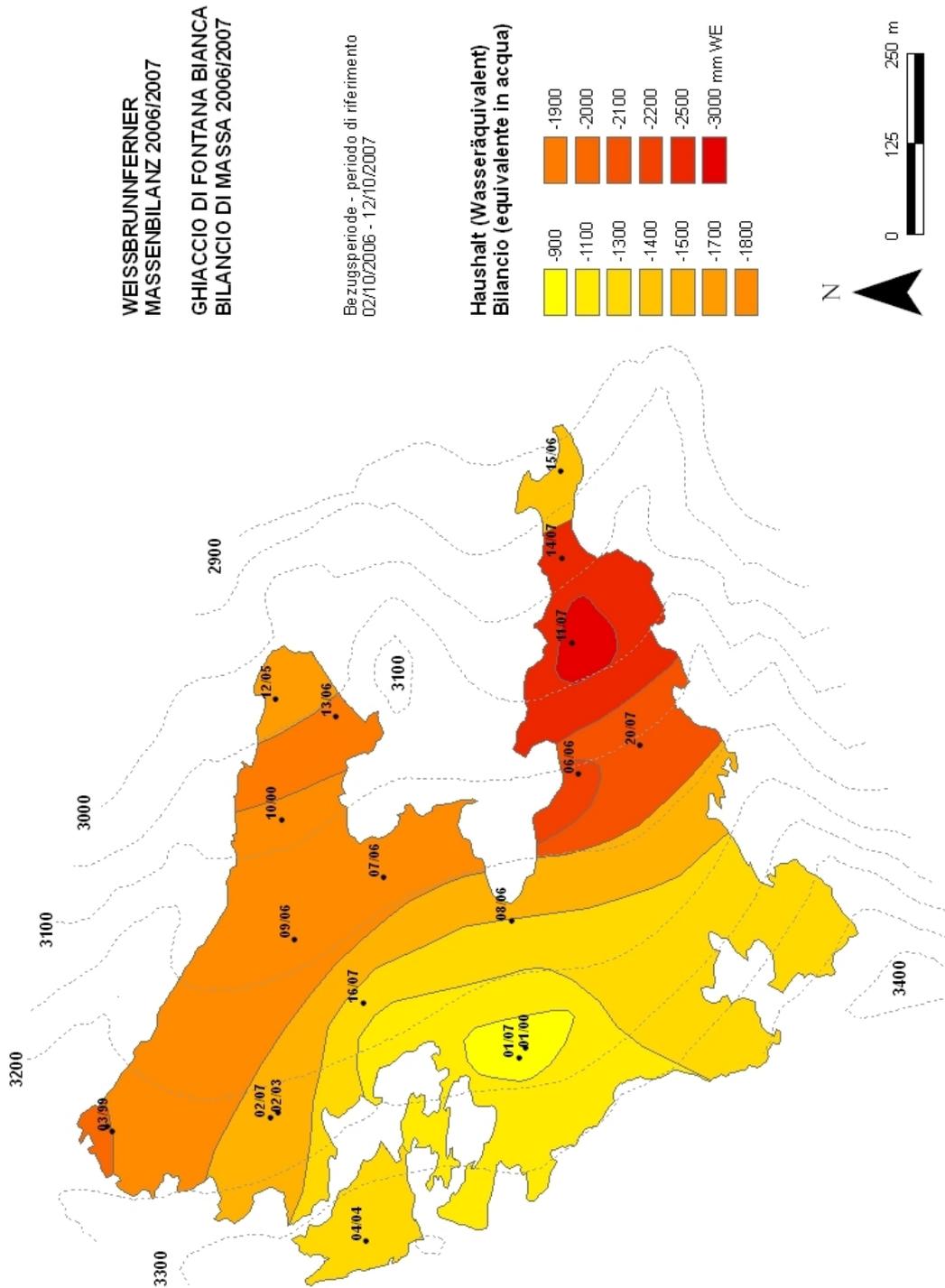


Fig. 10.15 – Distribuzione del bilancio di massa.

Come si è avuto già modo di evidenziare nel calcolo dell'accumulo invernale, alla carta tematica in figura 10.15 corrisponde una *database* con tutte le informazioni necessarie per poter calcolare l'equivalente in acqua per ogni fascia altimetrica. Ogni *record* della tabella rappresenta un poligono generato dell'intersezione spaziale e contiene informazioni relative all'area, alla quota, all'orografia ed all'equivalente in acqua. Questi campi sono stati ordinati per quota e per orografia. Sono state eseguite poi le medesime operazioni matematiche indicate precedentemente, per poter ottenere i valori dell'equivalente medio (b) espresso in mm WE, e il volume di neve espresso in m<sup>3</sup> di equivalente in acqua "B", riferiti sempre a determinate fasce altitudinali. Automatizzando tale procedura si sono calcolati tali valori per ogni fascia altimetrica e per entrambe le zone orografiche del ghiacciaio (fig. 10.16).

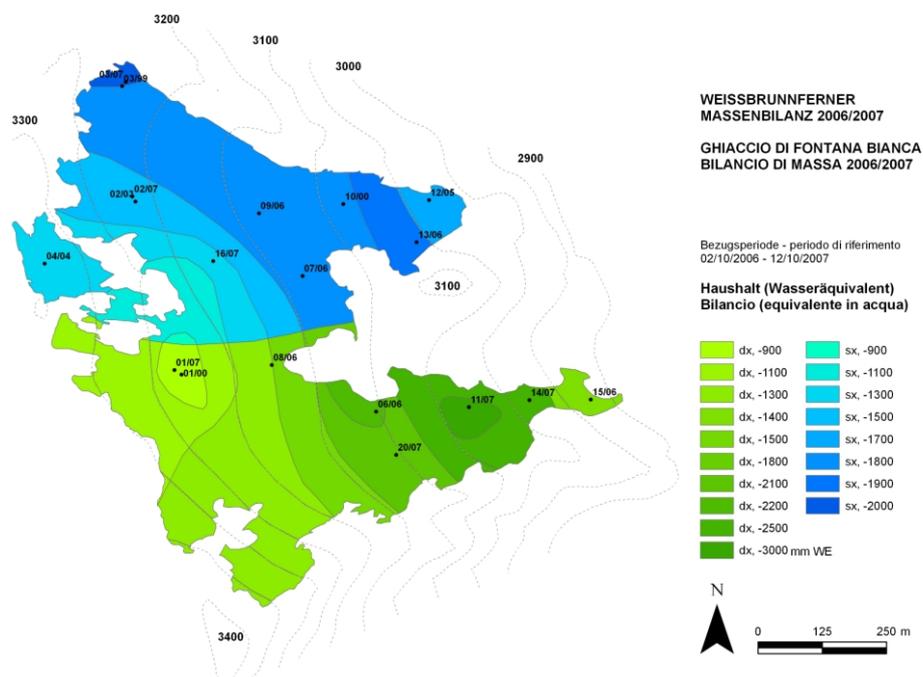


Fig. 10.16 – Bilancio di massa diviso per orografia.

Nell'anno idrologico 2006/07, il ghiacciaio di Fontana Bianca ha perso 787.077 m<sup>3</sup> (787 milioni di litri) di acqua, equivalenti ad una colonna d'acqua di 1.607 mm uniformemente distribuita sul ghiacciaio.

Il bilancio estivo, che risulta dalla differenza tra bilancio invernale ed annuale, ha fatto registrare una perdita di volume di 1.088.992 m<sup>3</sup> di acqua, ossia di una colonna d'acqua di 2.223 mm uniformemente distribuita sul ghiacciaio.

Nelle tabelle in figura 10.17 sono riportati distinti per fasce altimetriche per la sinistra orografica (a sinistra), per la destra orografica (a destra) e per l'intero ghiacciaio (al centro) i valori di b e B persi nell'anno idrologico 2006-2007. Le superfici glaciali, i bilanci di massa volumetrico e specifico, sono espressi rispettivamente in m<sup>2</sup>, in m<sup>3</sup> e mm di equivalente in acqua (mm WE).

hight [m.a.s.l.]	surface [m <sup>2</sup> ]	B [m <sup>3</sup> we]	b [mm we]
3375			
3325	15718	-20377	-1296
3275	13899	-18180	-1308
3225	56067	-86008	-1534
3175	71609	-111406	-1556
3125	49852	-89734	-1800
3075	26440	-49161	-1859
3025	8929	-15184	-1700
2975			
2925			
2875			
	242514	-390049	-1608

hight [m.a.s.l.]	surface [m <sup>2</sup> ]	B [m <sup>3</sup> we]	b [mm we]
3375	1516	-1971	-1300
3325	22917	-28575	-1247
3275	37612	-44647	-1187
3225	48261	-55931	-1159
3175	50455	-70930	-1406
3125	30115	-61490	-2042
3075	23144	-54129	-2339
3025	22296	-59286	-2659
2975	5206	-11997	-2304
2925	5479	-7671	-1400
2875	286	-401	-1400
	247287	-397028	-1606

hight [m.a.s.l.]	surface [m <sup>2</sup> ]	B [m <sup>3</sup> we]	b [mm we]
3375	1516	-1971	-1300
3325	38635	-48952	-1267
3275	51511	-62827	-1220
3225	104328	-141939	-1361
3175	122064	-182336	-1494
3125	79967	-151224	-1891
3075	49584	-103290	-2083
3025	31225	-74470	-2385
2975	5206	-11997	-2304
2925	5479	-7671	-1400
2875	286	-401	-1400
	489802	-787077	-1607

Fig. 10.17–Distribuzione dell'ablazione per fasce altitudinali sull'orografica sinistra, destra e sul ghiacciaio intero (in basso).

Nella figura 10.18 seguente viene proposta, invece, l'analisi della distribuzione altimetrica dell'accumulo invernale (blu), del bilancio estivo (rosso) e del bilancio annuale (verde). Anche per l'anno preso in considerazione, i profili verticali hanno evidenziato un comportamento del ghiacciaio molto simile all'anno precedente.

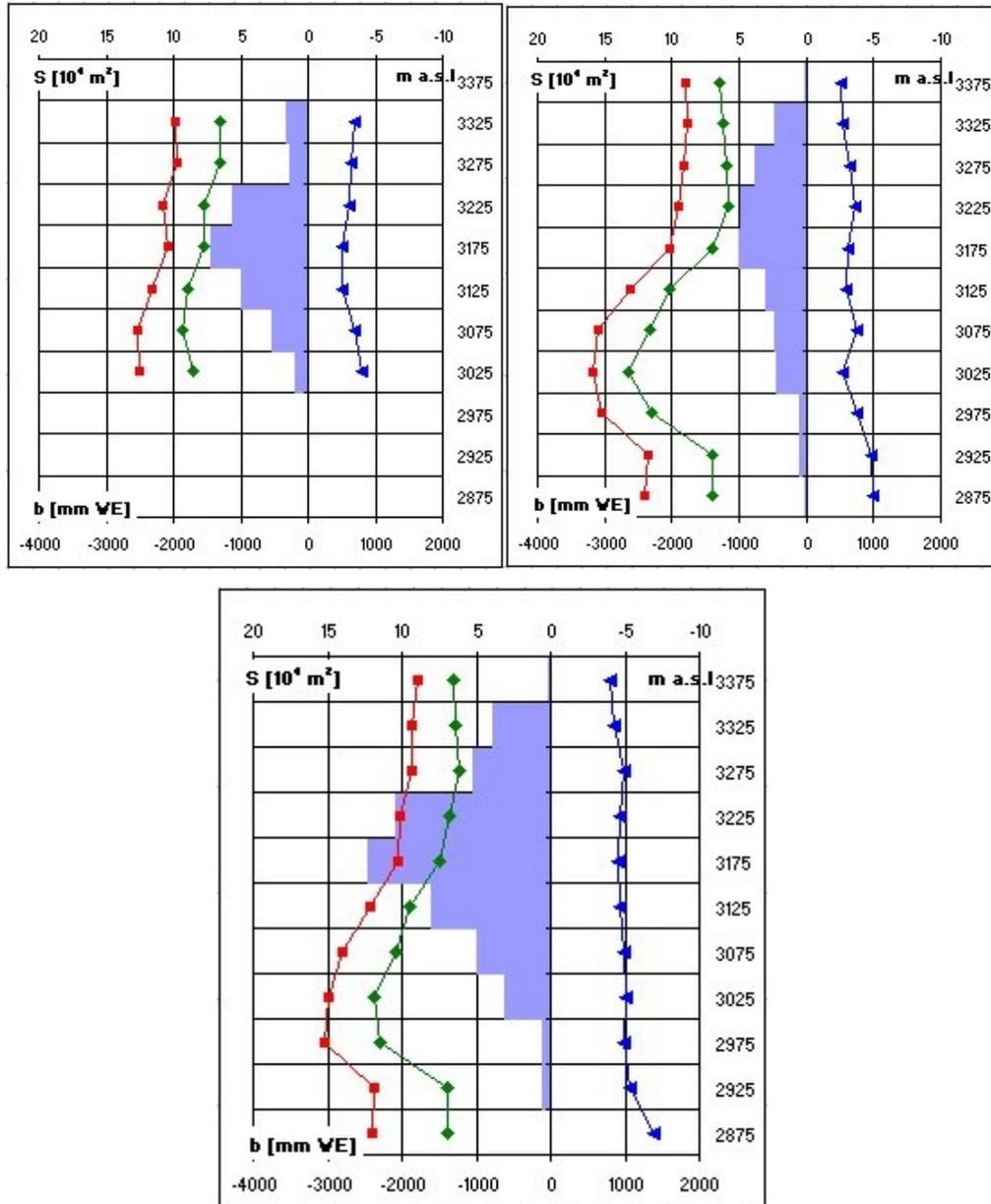


Fig. 10.18 - Analisi della distribuzione altimetrica dell'accumulo invernale (blu), del bilancio estivo (rosso) e del bilancio annuale (verde), in orografica sinistra, destra e sul ghiacciaio intero (in basso).

La Linea di Equilibrio ELA (*Equilibrium Line Altitude*) si è collocata ancora una volta oltre il limite superiore del ghiacciaio. Ne consegue un valore del rapporto AAR (*Accumulation Area Ratio*) tra superfici di accumulo e superficie dell'intero apparato pari a 0.

L'andamento della curva del bilancio di massa rispetto alla quota rispecchia il comportamento del ghiacciaio e rimane simile negli anni e ne costituisce, dunque, una sorta di "impronta digitale". Da tali dati si può evincere come l'accumulo sia uniformemente distribuito sull'intero ghiacciaio, mentre l'ablazione risulti particolarmente marcata alle quote al di sotto dei 3.100 m. Significativo per il bilancio finale risulta il comportamento delle fasce altimetriche che sono comprese tra i 3.100 e 3.250 m s.l.m., sviluppando una notevole superficie.

Analizzando le variabili di bilancio del ghiacciaio di Fontana Bianca in funzione della morfologia e dell'altimetria dello stesso, è stato così possibile rappresentare la loro variabilità rispetto alla quota, distinguendo i contributi relativi delle parti destra e sinistra dell'apparato glaciale.

Risulta importante sottolineare come, in virtù della nevicata di fine settembre, il bilancio naturale si discosti da quello idrologico. In particolare il bilancio naturale risulta più negativo rispetto a quello idrologico di 119 mm di equivalente in acqua, per una perdita complessiva di 1.726 mm WE uniformemente distribuita sul ghiacciaio.

#### 10.4 Analisi idrologica

I ghiacciai rappresentano preziosi serbatoi idrici naturali che esercitano un forte controllo sul drenaggio caratteristico dei bacini alpini. Ne deriva che l'accumulo ed il rilascio idrico dei ghiacciai sono importanti in svariati campi pratici e scientifici, tra cui l'energia idroelettrica, la previsione degli straripamenti, l'oscillazione del livello marino, le dinamiche glaciologiche, il trasporto dei sedimenti ed il modellamento terrestre. Il più delle volte i ghiacciai sono immaginati come un ritardo di deflusso delle precipitazioni, che avrebbero un rilascio idrico diretto sull'ambiente. Questo "magazzino" si fonda su basi sub - stagionali e sub - giornaliere ed include i fattori associati con l'accumulo e lo scioglimento nevoso sul ghiacciaio, la capacità di riserva idrica e le caratteristiche del ghiacciaio stesso (Jansson et al., 2003).

I dati raccolti alle 2 stazioni idrometriche, installate in corrispondenza dei rii che sgorgano dalle lingue sinistra e destra del ghiacciaio di Fontana Bianca, hanno reso possibile l'analisi dei deflussi glaciali. L'attivazione delle due sezioni è avvenuta il giorno 7 giugno 2007, mentre la loro rimozione il 12 ottobre 2007, giorno di chiusura del bilancio. Hanno funzionato regolarmente garantendo 4 mesi di dati dei deflussi.

Come prima operazione si sono "scaricati" i dati registrati nel *datalogger* con il software Biber V 5.0.11 della Kisters AG., che permette di gestire tramite un database relazionale tutte le stazioni di misura dell'Alto Adige ed effettuare delle elaborazioni relative alle misure dei flussi idrici.

In questo caso sono stati visualizzati i valori dei livelli delle due stazioni idrometriche nel periodo del loro funzionamento. Sono visibili in figura 10.19 le oscillazioni giornaliere, i periodi di maggior deflusso e quelli con dei "buchi" in cui le stazioni potrebbero aver ghiacciato, oppure si sono verificati dei problemi alla strumentazione. In rosso sono visualizzati i dati

della stazione sinistra, in blu quelli della destra. I valori sono stati compresi tra i 45 cm e lo zero.

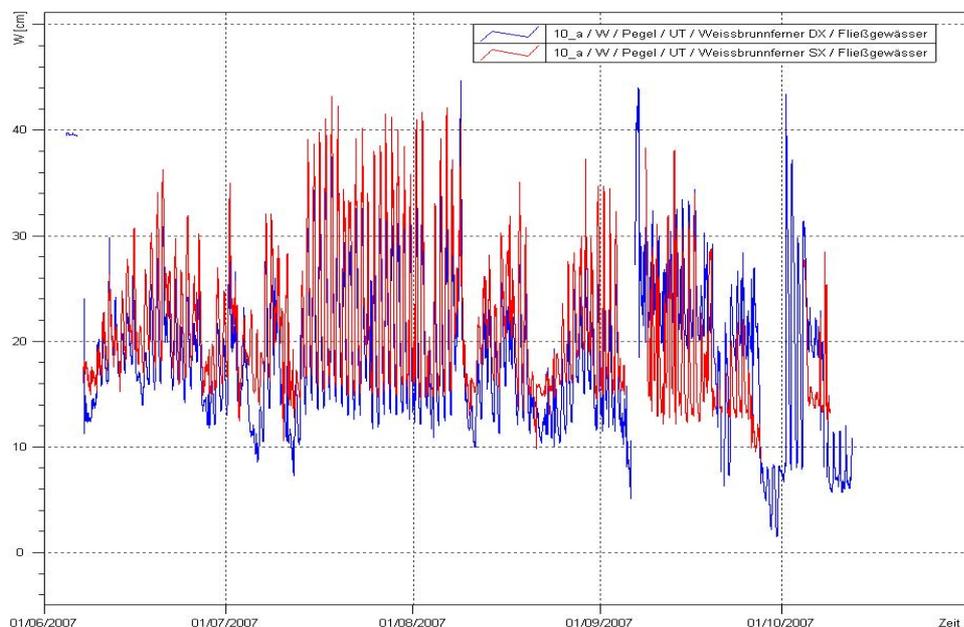


Fig. 10.19 – Livelli dei deflussi misurati nelle due stazioni idrometriche sul ghiacciaio di Fontana Bianca dal 7 giugno al 12 ottobre 2007.

A questo punto mettendo in relazione le misure di portata eseguite con i livelli relativi, si è costruita la curva di portata. Questa esprime una relazione univoca per cui ad ogni livello corrisponde una ed una sola portata. Il software ha cioè interpolato i valori forniti dalle misure effettuate ed ha generato la curva che meglio approssima tali punti. Un parametro fondamentale è fornito dall'altezza dello stramazzo, che in entrambe le sezioni è uguale a 10 cm; a tale livello la portata viene impostata uguale a 0. L'importante è riuscire ad avere valori misurati per un ampio intervallo di livelli, in modo da "coprire" tutto lo spettro in modo più preciso possibile. Nella *costruzione* della portata si limita il campo dei livelli a 100 cm, valore che non sarà mai raggiunto, poiché in tali condizioni, l'acqua fuoriuscirebbe dalla sezione. Tale operazione è stata realizzata per entrambe le stazioni idrometriche, che avendo

caratteristiche morfometriche diverse, hanno anche curve di portata dissimili. Un esempio è rappresentato dal canale di accesso con pendenze e sezioni difformi, che può generare portate diverse.

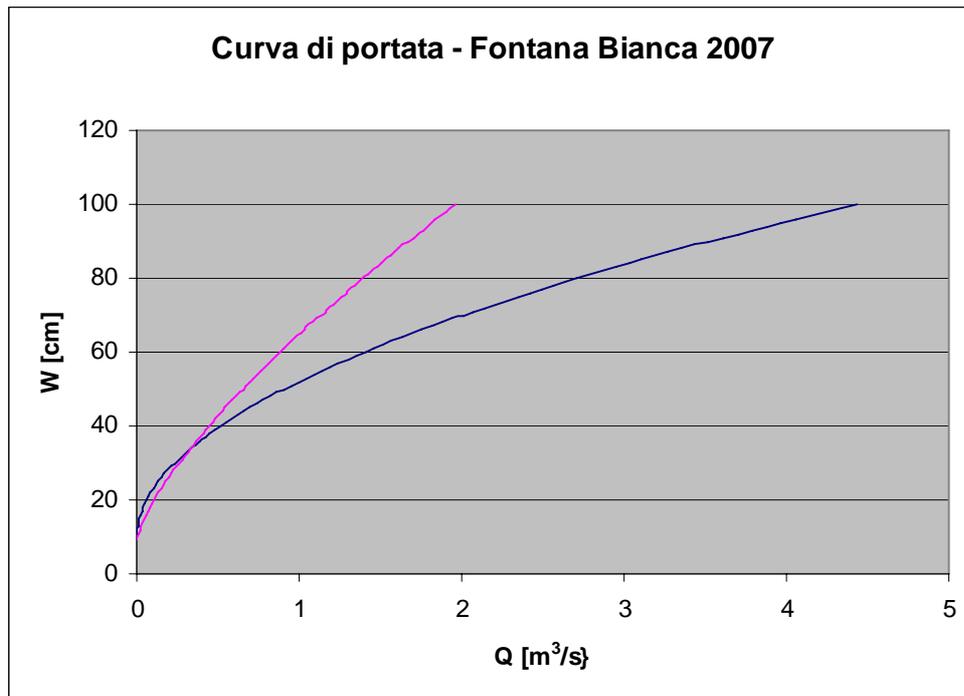


Fig. 10.20 – In grigio la curva di portata della stazione idrometrica destra e in nero quella sinistra.

Grazie alla curva di portata (fig. 10.20) si sono convertiti, in modo automatico, tutti i livelli in portate relative. Si dispongono così dei valori di portata ad intervallo orario per i quattro mesi di attivazione. Si è potuto così fare una stima qualitativa dei tassi di scioglimento del ghiaccio che altrimenti sarebbero stati impossibili, senza recarsi giornalmente sul ghiacciaio per leggere le paline ablatimetriche. Per ogni giornata si hanno così a disposizione dati inerenti la portata, il volume d'acqua transitata nelle sezioni in un giorno e, quindi, il ghiaccio sciolto. La superficie del bacino idrografico drenato dalle stazioni idrometriche è pari a 0.91 km<sup>2</sup> complessivi, di cui circa il 54% coperto da superficie glaciale.

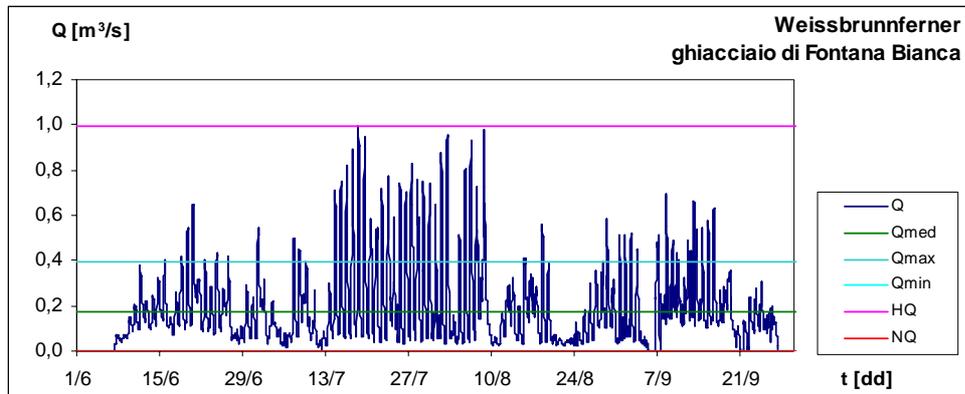


Fig. 10.21 - Deflussi complessivi misurati alle stazioni idrometriche nell'estate 2007. I dati riportati risultano dalla somma delle portate misurate alle stazioni idrometriche in orografica sinistra e destra.

In riferimento alla figura 10.20 sono stati calcolati questi termini:

- Q portata
- $Q_{med}$  portata media del periodo
- $Q_{max}$  portata massima della media giornaliera
- $Q_{min}$  portata minima della media giornaliera
- HQ portata massima della media oraria
- NQ portata minima della media oraria

parametri caratteristici			
	[m <sup>3</sup> /s]	[cm WE/dd]	[cm ice/dd]
valori giornalieri			
$Q_{med}$	0,17	3,04	3,38
$Q_{max}$	0,40	7,03	7,81
$Q_{min}$	0,00	0,00	0,00
valori orari			
HQ	0,99	17,56	19,51
NQ	0,00	0,00	0,00

La portata media del periodo è uguale a 0.17 m<sup>3</sup>/s che equivalgono a circa 3.4 cm di ghiaccio sciolto al giorno.

Un dato estrapolabile direttamente dall'analisi del regime dei deflussi è quello relativo al massimo scioglimento di ghiaccio. Il giorno in cui si è fuso più ghiaccio, con una media giornaliera di 0.398 m<sup>3</sup>/s e 7.8 cm

di ghiaccio, risulta l' 8 agosto. In realtà verificando tale valore con i dati registrati dalla stazione meteo si è constatato che quel giorno aveva piovuto. Il maggiore scioglimento di ghiaccio in un giorno non piovoso è stato il 18 luglio con 382 l/s d'acqua defluita, corrispondenti a circa 7,5 cm di ghiacciaio perso in 24 ore. Un altro parametro che si usa calcolare è dato dal massimo scioglimento orario, corrispondente a circa un m<sup>3</sup>/s defluito dalle due stazioni tra le ore 11 e le 12, nella giornata del 18/07/07. Se tale tasso di scioglimento fosse rimasto costante per le 24 ore si sarebbero fusi quasi 20 cm di ghiaccio. Confrontando con i dati della temperatura registrati alla stazione di Fontana Bianca si è osservato che tale giorno è risultato anche il più caldo.

Pur disponendo dei dati relativi ai deflussi, la verifica è possibile solo in parte, in quanto, anche considerando il bilancio per i soli mesi estivi, nell'equazione (X) (vedi cap. 3) relativa rimangono comunque incogniti i termini di evapotraspirazione, di accumulo nivale sulla superficie del bacino non interessata dal ghiacciaio e quelli relativi ai deflussi registrati nel periodo non monitorato.

Anche considerando isolato il sistema ed impermeabile il bacino roccioso su cui si trova il ghiacciaio, si devono comunque stimare una serie di variabili che rendono approssimato il risultato finale.

L'andamento delle precipitazioni non presenta una variazione regolare se messa in relazione con l'altitudine. Questa difformità rientra nella problematica delle registrazioni nivopluviometriche ad alta quota, dove prevalgono le precipitazioni nevose e dove la morfologia dei rilievi gioca un ruolo fondamentale nel determinare variazioni di afflussi meteorici anche in ambiti territoriali molto ristretti (Giada & Zanon, 1985). Ad esempio si deve stimare il gradiente pluviometrico; non si è in grado di interpolare i dati raccolti dalla stazione meteorologica presso il lago Fontana Bianca con precisione. Tutte le incertezze appena descritte consentono solo di fare una valutazione comparativa con i risultati della campagna

glaciologica e per questo motivo non sono inserite nella presente ricerca. Si può comunque osservare che gli ordini di grandezza delle elaborazioni davano risultati confortanti.

### **10.5 Analisi meteorologica**

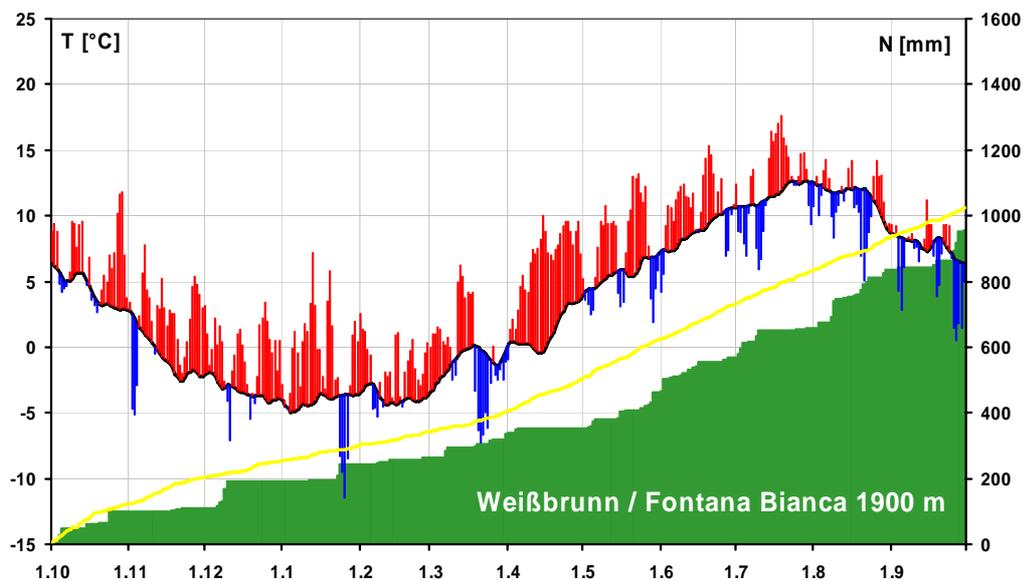
Come è stato evidenziato, la stazione climatologica di riferimento per il ghiacciaio in esame è quella di Fontana Bianca, posta nei pressi della casa di guardia alla diga presso il lago omonimo, ad una quota di 1875 m s.l.m.. In tale sito sono disponibili dati che desumono precipitazioni e temperature rispettivamente dal 1961 e dal 1983. A partire dal 1987 è in funzione poi anche una stazione meteorologica automatica.

Nel 2001 è stata inoltre installata la stazione denominata Sperone di Fontana Bianca (fig. 10.21), collocata appunto sullo sperone roccioso tra le due lingue glaciali, a 3124 m s.l.m. (636330 E 5149396 N UTM) ed utilizzata in sede di analisi delle campagne glaciologiche recenti. I sensori di cui è dotata consentono di misurare temperatura dell'aria, velocità del vento, velocità della raffica, direzione del vento ed umidità atmosferica. Causa l'esposizione del sito ove questa è stata posta e per l'impossibilità di un approvvigionamento energetico sufficiente, essa non è stata, invece, dotata di pluviometro.

Grazie alla presenza di queste informazioni puntuali e precise riguardo le precipitazioni e le temperature, garantite da serie di dati storici consistenti per la stazione sul lago, è possibile effettuare correlazioni particolarmente importanti tra l'evoluzione del ghiacciaio e quelle climatiche.



Fig. 10.22 – La stazione meteorologica sullo sperone al centro del ghiacciaio di Fontana Bianca.



**legenda /Legende**

- kumulativer Niederschlag  
precipitazione cumulata 2006/07
- kumulativer Niederschlag  
precipitazione cumulata 1971/72-2000/01
- Temperatur Tagesmittel  
temperatura media giornaliera 2006/07
- Temperatur Tagesmittel  
temperatura media giornaliera 1983/84-2003/04

Fig. 10.23 - Temperatura e precipitazione cumulata misurate nell'anno idrologico 2006/07 alla stazione di Fontana Bianca confrontate con le medie del periodo.

L'anno idrologico 2006/2007 è stato in Alto Adige uno dei più caldi dall'inizio delle misurazioni. Complessivamente la temperatura media di 5,0° è risultata nettamente superiore rispetto ad una norma pari a 3.2°. Nella maggior parte dei giorni dell'anno si sono registrate deviazioni positive rispetto alle temperature medie climatologiche. Solo occasionali irruzioni di aria fredda hanno portato per brevi periodi temperature al di sotto delle medie del periodo. La precipitazione totale cumulata pari a 954,4 mm è stata leggermente inferiore alla media di 1023,1 mm , registrata in trenta anni. Significative sono state anzitutto le abbondanti piogge misurate in giugno, mentre ad aprile le precipitazioni sono state pressoché assenti.

## 11. LE VARIAZIONI VOLUMETRICHE DEL GHIACCIAIO

Il 6 settembre 1996 lo spessore del ghiacciaio di Fontana Bianca è stato misurato con l'ausilio di un apparecchiatura radar, ad opera dell'Istituto di Geografia dell'Università di Innsbruck. Il georadar<sup>8</sup> a 4 antenne, è stato trasportato a mano dagli operatori sul ghiacciaio. Lo spessore è stato ricavato misurando il tempo che l'onda radar impiega nel raggiungere il fondo roccioso e tornare allo strumento, avendo come base fissa la conoscenza del tempo di propagazione nel ghiacciaio. La misurazione incontra grosse difficoltà in presenza di crepacci e in caso di fondo molto scabro, che danno luogo ad una riflessione diffusa delle onde elettromagnetiche. Per questi motivi sono stati eseguiti due profili longitudinali ed uno trasversale, i primi lungo le direttrici delle due lingue ed il terzo ortogonale ai primi nella zona piana, per un totale di 15 punti (fig. 11.1).

Lo spessore medio è stato calcolato in 28 m, mentre la profondità massima di 61 m è stata individuata nella parte centro meridionale.

---

<sup>8</sup> Il georadar, nell'applicazione alla introspezione del suolo, è, in generale, una tecnica che consente di rivelare in modo non distruttivo e non invasivo la presenza e la posizione di oggetti sepolti utilizzando il fenomeno della riflessione delle onde elettromagnetiche. Il funzionamento del georadar si basa sulla capacità dello strumento di emettere segnali a radiofrequenza (compresi tipicamente nel range 100 MHz – 1 Ghz) e di registrare quindi le eco reirradiate dagli oggetti presenti nel sottosuolo, caratterizzati da dimensioni sufficienti e da proprietà elettromagnetiche diverse rispetto a quelle di ciò che li circonda. La generazione e la ricezione degli segnali a radiofrequenza è operata da una o più antenne che vengono fatte scorrere sul materiale che si desidera indagare

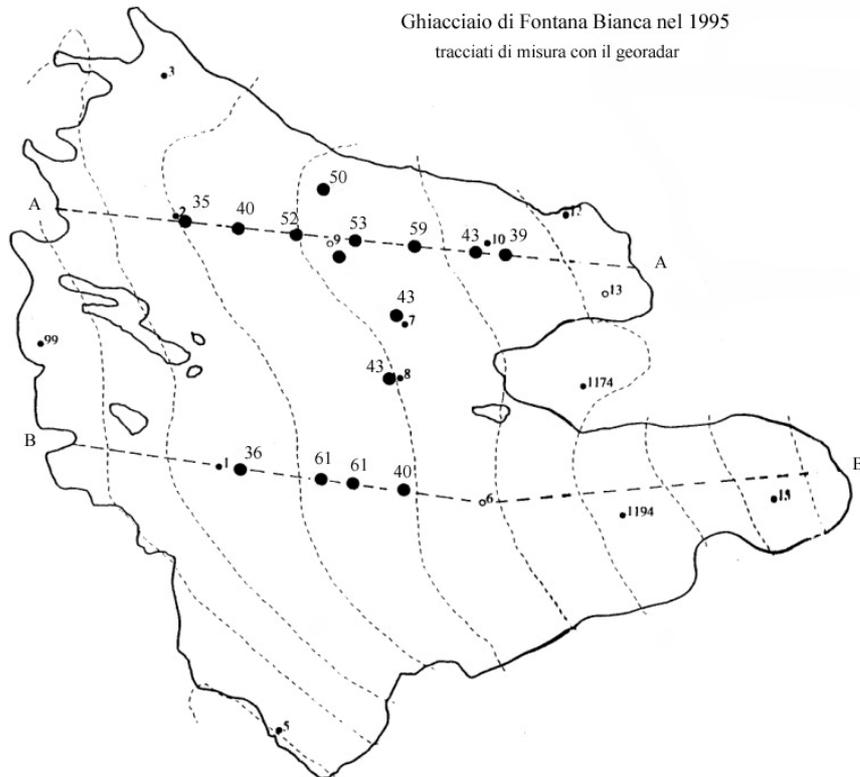


Fig. 11.1 – I punti di misura effettuati con il georadar e le relative profondità determinate espresse in metri (Fonte: Kaser, 1995, ridisegnato).

Il modellamento dinamico ha portato ad una stima del volume complessivo del ghiaccio corrispondente a circa 16.5 milioni di m<sup>3</sup> di equivalente in acqua, pari a 18.3 milioni di m<sup>3</sup> di ghiaccio. Le variazioni del volume sono state calcolate attraverso un modello digitale del terreno, che è stato costruito grazie alle informazioni ricavate da due carte topografiche, rispettivamente del 1962 e del 1997. Grazie a questo procedimento si è potuto constatare che in questo intervallo di tempo il ghiacciaio ha perso 8.5 milioni di metri cubi d'acqua.

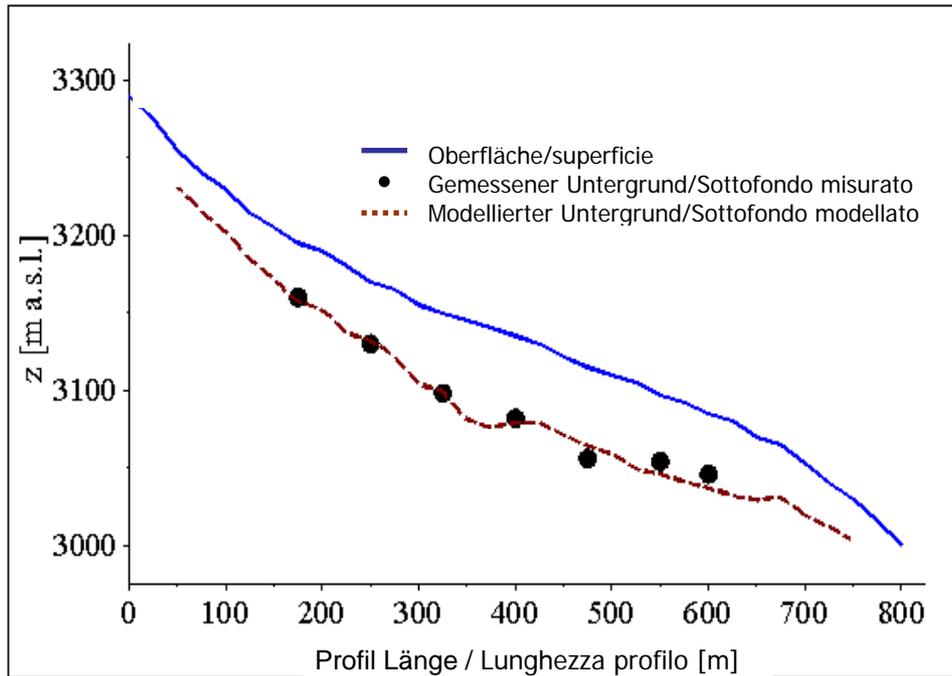


Fig. 11.2 – Profilo longitudinale A sulla lingua glaciale sinistra (Fonte: Kaser, 2001; ridisegnato).

È stato così possibile completare la serie dei volumi fino al 2007, aggiungendo il bilancio di massa di ogni singolo anno di misure, espresso in  $m^3$  di equivalente in acqua (fig. 11.3). Risulta così che la perdita totale dal 1996 ad oggi è stata di  $7.029.194 m^3$  WE, pari a  $7.810.215,5 m^3$  di ghiaccio.

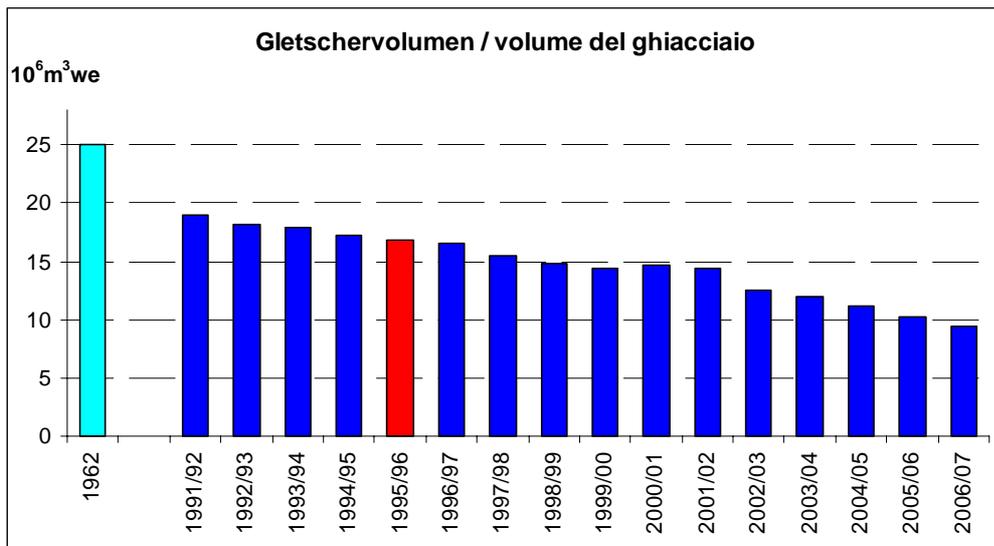


Fig. 11.3 – Variazioni volumetriche sul ghiacciaio di Fontana Bianca.

Il volume del ghiacciaio oggi risulta così pari a 9.470.806 m<sup>3</sup> WE, cioè con un volume di ghiaccio di 10.523.118 metri cubi. Ne consegue che in soli dieci estati l'apparato glaciale di Fontana Bianca ha fuso il 43 % della sua massa. Applicando tale *trend* anche al primo anno (1991/1992) per cui sono disponibili dati riguardanti il bilancio di massa, si è ricavato che la perdita complessiva di volume è stata esattamente del 50 %, passando cioè da 18.952.470 a 9.470.806 m<sup>3</sup> WE, come si evidenzia dai 16 anni di misurazioni.

## 12. CONFRONTO TRA I DATI DEL CATASTO 1983 E 1997

Un dato di partenza molto utile per analizzare la tendenza evolutiva del ghiacciaio di Fontana Bianca è rappresentato dal confronto delle informazioni contenute nel catasto del 1983 e del 1997 (fig. 12.1).

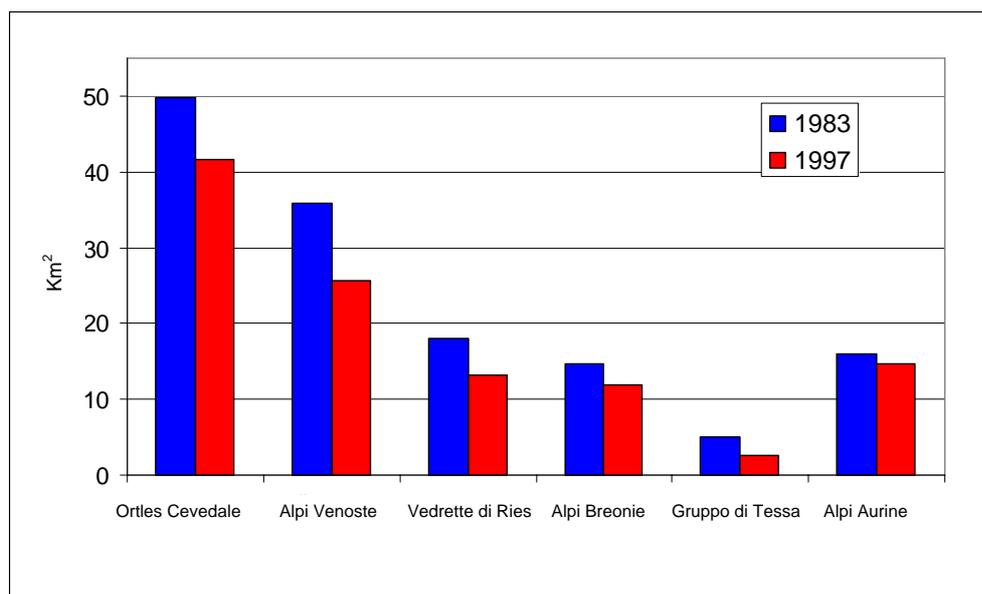
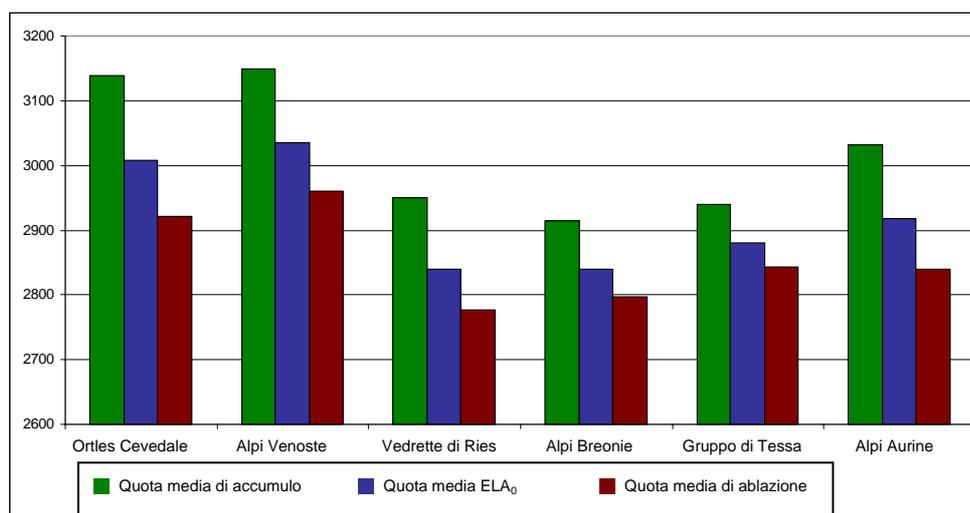


Fig. 12.1 – Variazione di superficie glaciale nei principali gruppi montuosi dell'Alto Adige (Fonte AA 1997, ridisegnato).

gruppo montuoso	A - 1983 [km <sup>2</sup> ]	A - 1997 [km <sup>2</sup> ]	perdita %
Ortles - Cevedale	49.85	41.63	-16.5
Alpi Venoste	35.82	25.65	-28.4
Vedrette di Ries	18.05	13.27	-26.5
Alpi Breonie	14.78	11.95	-19.1
Gruppo di Tessa	4.94	2.55	-48.4
Alpi Aurine	15.96	14.61	-8.5
totale	139.38	109.65	-21.3

Prendendo in esame il ghiacciaio oggetto di studio, si può osservare come questo si inserisca pienamente nella tendenza evidenziata per il gruppo montuoso di appartenenza, quello dell'Ortles Cevedale. Infatti, la perdita di superficie per l'intero complesso si attesta su valori del 16.5 % di differenza nei 14 anni considerati; quello specifico del Fontana Bianca passa da una superficie di 0.75 Km<sup>2</sup> ad una di 0.64 Km<sup>2</sup> subendo una perdita del 14.7 %.

Osservando invece i dati ottenuti dal rilievo topografico dell'agosto 2007, si può constatare la drammaticità della riduzione della superficie glaciale. Si è passati, infatti, da 0.75 Km<sup>2</sup> a 0.49 Km<sup>2</sup>, con una diminuzione, in soli 24 anni, del 34.6 %.



gruppo montuoso	quota media ELA <sub>0</sub> [m s.l.m.]	$\Delta$ (ELA <sub>0</sub> – acc.) [m s.l.m.]
Ortles - Cevedale	3008	130
Alpi Venoste	3035	113
Vedrette di Ries	2839	111
Alpi Breonie	2839	75
Gruppo di Tessa	2880	60
Alpi Aurine	2918	113
<b>totale</b>	<b>2938</b>	<b>108</b>

Fig. 12.2 – Posizione della ELA<sub>0</sub> per gruppo montuoso in Alto Adige e tabella correlata (Fonte: AA 1997, rielaborato).

Le informazioni riportate in figura 12.2 sono molto significative per analizzare il comportamento degli apparati glaciali. Infatti la posizione della  $ELA_0$  è stata calcolata sulla base della distribuzione altimetrica della superficie dei ghiacciai e rappresenta solo la quota alla quale la linea di equilibrio si troverebbe se i singoli ghiacciai fossero in equilibrio. Questa è stata determinata utilizzando il metodo della suddivisione areale ( $AAR=0,67$ ), come illustrato al paragrafo 3.5. L'applicazione al caso specifico è avvenuta avvalendosi di linee di quota con equidistanza di 100 m. La linea di equilibrio si trova in una fascia altimetrica delimitata inferiormente dalla quota  $h_1$  e superiormente dalla quota  $h_2$ . La superficie di tale fascia altimetrica sia  $S_{1,2}$ , la superficie totale della zona di ablazione  $S_a$ , pari ad un terzo della superficie totale  $S$  del ghiacciaio. Al di sotto della quota  $h_1$  vi sia una superficie di ghiacciaio pari ad  $S_1$ . La quota della linea di equilibrio del ghiacciaio risulta:

$$h_{LE} = (h_2 - h_1) / S_{1,2} * (S_a - S_1) + h_1 \quad (Y)$$

La quota della  $ELA_0$  nel 1997 era stata calcolata a 3120 m s.l.m.; dal confronto con il valore del gruppo Ortles – Cevedale si nota che questa è più alta della media, pesa cioè negativamente sul gruppo, che comunque ha la linea di equilibrio stimata a 3008 m. Ma soprattutto è il valore determinato dalla differenza tra la  $ELA_0$  e la quota media di accumulo ad esprimere la sensibilità del ghiacciaio alle variazioni climatiche. Più tale differenza è bassa e minore è la variazione necessaria per far cambiare le condizioni di equilibrio. I ghiacciai che si estendono alle quote altimetriche maggiori sono meno sensibili alle variazioni climatiche, come nel caso dell'Ortles – Cevedale.

### 13. VARIAZIONE DELLA CURVA IPSOGRAFICA

Avvalendosi dei dati riguardanti la distribuzione con la quota della superficie glaciale, si sono costruite le curve ipsografiche relative all'estensione del ghiacciaio nel 1997 e nel 2007. Come si nota in figura 13.1 la linea blu relativa all'ultimo rilievo effettuato si sviluppa interamente al di sotto di quella del 1997. Questo evidenzia la riduzione della superficie glaciale in tutte le fasce altimetriche che interessano il sistema, con una percentuale maggiore di diminuzione alle quote inferiori. A questo punto sembra corretto ribadire nuovamente che la superficie è passata da  $0.641 \text{ km}^2$  a  $0.489 \text{ km}^2$ , con una perdita di  $15,2 \text{ ha}$  (che equivalgono circa a 18 campi da calcio).

Per la stima della  $ELA_0$  si è utilizzata la formula (Y), che presupponendo una distribuzione lineare della superficie all'interno di una fascia altimetrica, individuata con la relazione  $AAR = 0.67$ , interpola i valori per approssimare la quota della linea di equilibrio all'interno della fascia stessa. In altre parole, considerando la curva del 2007, si è calcolata la superficie di ablazione teorica  $S_a = S/3$  (uguale a  $16,33 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ ) e si è verificato nella distribuzione altimetrica delle superfici, in che intervallo di isoipse si collocava la relativa superficie di accumulo ( $S - S_a = 32,82 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ ). Si sono così individuati  $h_2 = 3175$  e  $h_1 = 3125$  e la  $S_{1,2} = 7,80 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ . Si è così stimata la quota esatta della  $ELA_0$  che è risultata pari a  $3170 \text{ m s.l.m.}$ .

Confrontando tale valore con quello riportato nel catasto del 1997 si è osservato come tale linea teorica si sia alzata di  $50 \text{ m}$ , passando dai  $3120 \text{ m s.l.m.}$  ai  $3170 \text{ m}$ . Questi risultati rappresentano solo alcune valutazioni teoriche perchè, di fatto, negli'ultimi anni, la linea di equilibrio si è venuta sempre a trovare sopra al limite superiore del ghiacciaio, condannandolo ad una inesorabile fase di *decrescita*, che ha interessato in percentuale maggiore le quote altimetriche inferiori.

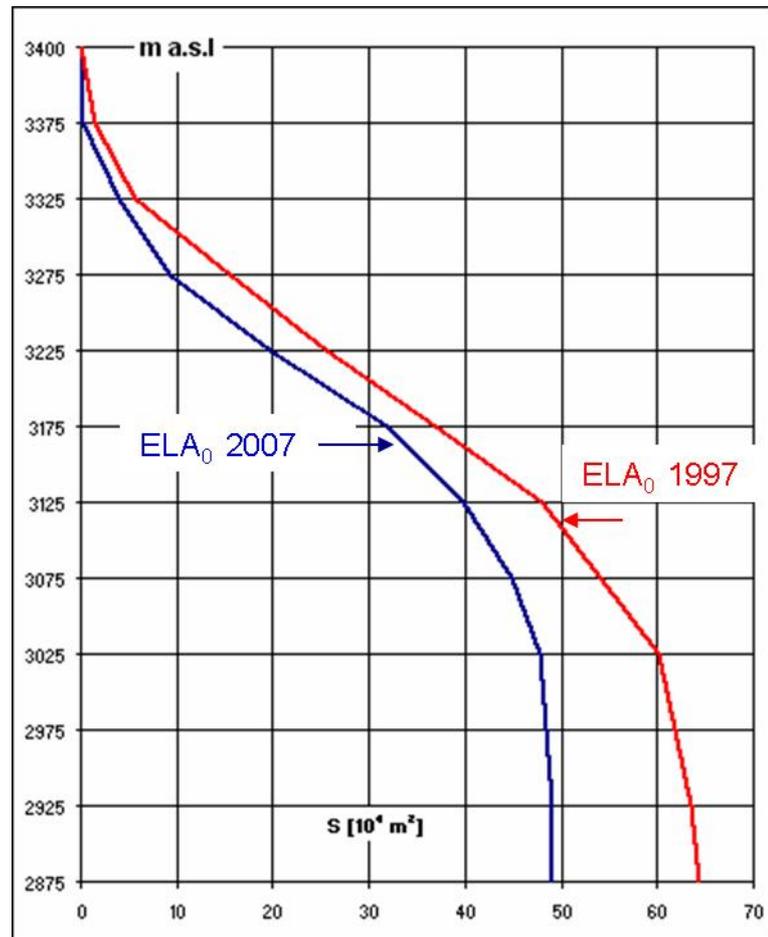


Fig. 13.1 – Distribuzione altimetrica della superficie del ghiacciaio e relativa posizione della ELA<sub>0</sub> nel 1997 (grigio) e 2007 (nero).

## 14. CONSIDERAZIONI CLIMATICHE

I ghiacciai sono oggi un ulteriore motivo di interesse, in quanto possono essere considerati termometri dell'evoluzione climatica. La serie dei bilanci di massa di un ghiacciaio rappresenta il collegamento tra clima ed apparato glaciale. Tali serie unite a studi analoghi prodotti in altre parti del globo risultano di estrema utilità al fine di valutare l'evoluzione spaziale e temporale del clima.

I risultati ottenuti nell'anno idrologico preso in esame, vanno ad inserirsi perfettamente nella tendenza del periodo, che, eccezion fatta per l'anno idrologico 2000/01, vede susseguirsi una serie di bilanci di massa decisamente negativi.

Il bilancio di massa nell'anno idrologico 2006/07 del ghiacciaio di Fontana Bianca, con i suoi 787.077 m<sup>3</sup> (787 milioni di litri) di acqua (1.607 mm WE) persi, si colloca al terzo posto come valore più negativo nei sedici anni di osservazione. Le cause sono da attribuirsi anzitutto ad un accumulo invernale, pari a 616 mm WE, nettamente deficitario rispetto ad una norma di 950 mm di equivalente in acqua. Secondariamente le temperature estive costantemente sopra alla media registrata dal 1983 al 2003, con un incremento di 1.8°C rispetto alla norma di 3.2°C, hanno contribuito ad un ablazione continua su tutta la superficie glaciale.

L'anno idrologico 2000/01, dove un forte accumulo invernale ha contribuito ad un bilancio netto positivo, dimostra come, non solo l'ablazione estiva, ma anche accumuli invernali deficitari, siano all'origine del generale trend negativo sopra descritto. È necessario ricordare che durante l'estate e in settembre vi sono stati due eventi meteorologici che hanno deposto sul ghiacciaio una cospicua quantità di neve. Tali neviccate

sono molto importanti in quanto aumentano l'albedo<sup>9</sup> e conseguentemente riducono l'ablazione. In questi casi il processo di fusione subisce un notevole rallentamento, che invece aumenta vertiginosamente quando, sciolta la neve, il ghiaccio diventa nero e si copre di detriti, diminuendo drasticamente l'albedo. Tale evoluzione è oltretutto imputabile ad un generale aumento delle temperature a livello globale e, quindi, anche ad una ablazione estiva molto forte.

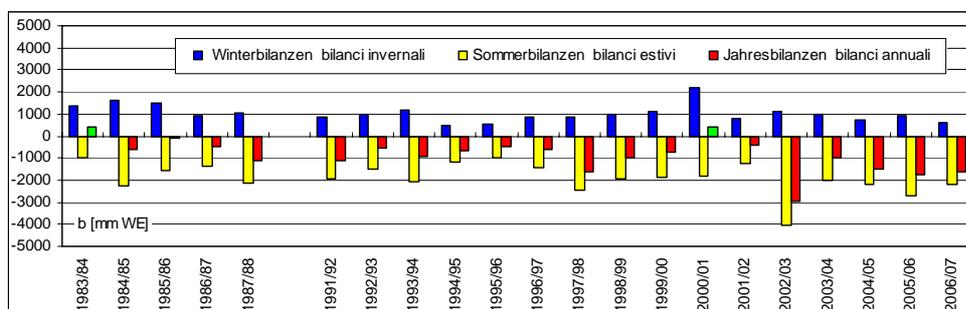


Fig. 14.1 - Evoluzione temporale di bilancio invernale, estivo e di massa (mm WE) dal 1983/84 al 2006/07.

Durante i dieci anni di studi e bilanci di massa tra il 1991 ed il 2001, due di questi possono essere considerati particolarmente degni di nota. Nel 1997/98 il bilancio di massa è stato straordinariamente negativo, incidendo pesantemente nella drammatica perdita di massa della parte superiore del ghiacciaio. Questo fenomeno non può essere spiegato né dalle registrazioni delle temperature nella stazione vicina, né da un mancato accumulo. Il motivo sta nel fatto che lo scioglimento completo delle masse di neve invernale non si è limitato, come da anni succedeva, alle zone delle lingue, ma ha interessato anche le fasce altimetriche più elevate. Quasi tutto lo strato di *firn* della naturale zona di accumulo era sparito. Le impurità, da anni accumulate, si concentrarono sulla superficie del ghiaccio riducendo

<sup>9</sup> L'albedo di una superficie è la frazione di radiazione incidente che viene riflessa indietro. L'albedo massima è 1, quando tutta la luce incidente viene riflessa; è zero in caso contrario, per esempio con un oggetto perfettamente nero. L'albedo della neve fresca arriva fino a 0,9 (IPCC, 2007).

improvvisamente l'albedo e aumentando di conseguenza l'ablazione sulla parte alta del ghiacciaio (Kaser, 2002). Nel caso in cui il detrito però formasse uno strato notevole di spessore, questo funge da isolante, rallentando quindi il processo di fusione (Smiraglia, 1992).

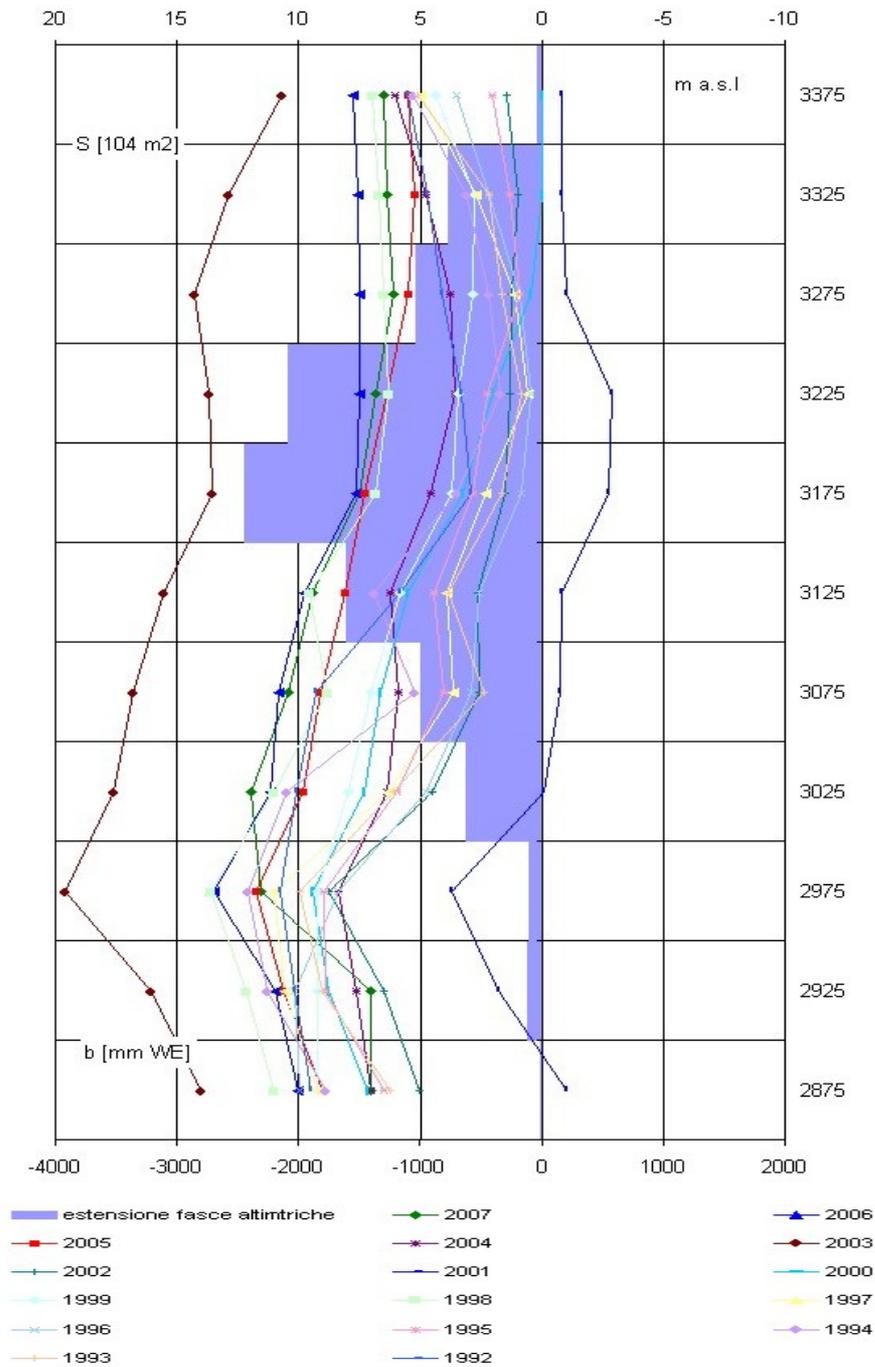


Fig. 14.2 – Serie di bilanci di massa dall'anno 1991/92 al 2006/07.

Un'altra rappresentazione utilizzata dal *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) che è stata pubblicata sul *Glacier Mass Balance Bulletin*, è quella dello sviluppo del bilancio specifico cumulato sull'intero periodo di osservazioni (fig. 14.3). Si può notare come questo sia stato sempre negativo per tutti gli anni di misure, ad eccezion fatta dell'anno idrologico 2000/2001.

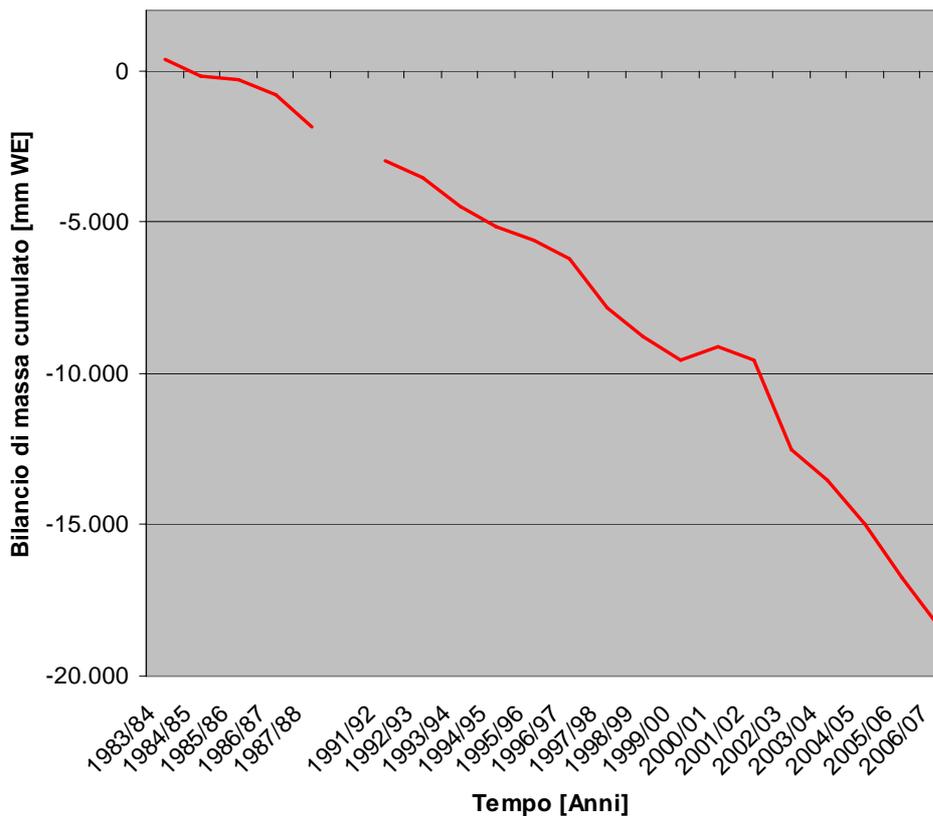


Fig. 14.3 – Serie cumulata di bilanci di massa dal 1983/84 al 2006/07.

Il continuo scioglimento del ghiaccio sta condannando, se le condizioni climatiche non dovessero mutare, l'apparato di Fontana Bianca alla progressiva estinzione. Gli ultimi cinque anni di misure hanno evidenziato il continuo posizionamento della ELA al di sopra del limite superiore del ghiacciaio, determinando un'ablazione diffusa su tutta la sua superficie. Ne consegue che il parametro AAR è uguale a 0. Analizzando però tutti i sedici anni di misure, in cui sono stati calcolati sia i valori della

percentuale di superficie di accumulo che la posizione della linea di equilibrio, ed utilizzandone gli anni con valori non nulli di AAR, è possibile esprimere la posizione della ELA in funzione del bilancio (fig. 14.4).

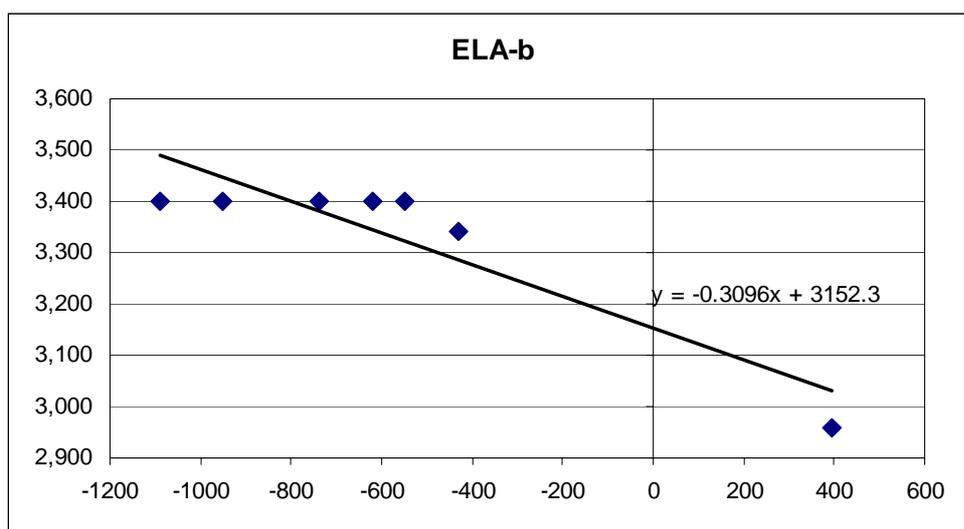


Fig. 14.4 – Relazione tra la linea di equilibrio ed il bilancio specifico.

Tale relazione, estrapolata dai valori degli anni 1991-1994, 1996-1997 e 1999-2002 ha permesso di costruire la linea di tendenza. Secondo tale relazione il ghiacciaio sarebbe in una condizione di equilibrio con la ELA posizionata a 3152 m s.l.m.. Confrontando tale risultato con quello ottenuto dall'analisi della curva ipsografica (vedi capitolo 13), si è osservato che dai dati raccolti sul campo, deriverebbe una posizione della linea di equilibrio più bassa rispetto a quella calcolata teoricamente ( $ELA_0 = 3170$  m s.l.m.).

Un ragionamento analogo è stato fatto per creare il grafico in figura 14.5. In questo caso si è analizzato il comportamento della superficie di accumulo in rapporto al bilancio di massa. Anche in tale situazione, pur con pochi dati si è riuscito a determinare, grazie alla linea di tendenza, la superficie di accumulo necessaria per garantire una condizione di equilibrio al ghiacciaio. Ne è risultato che, con questi dati, una superficie del 54% di

accumulo sarebbe sufficiente per conservare lo stato di equilibrio dell'apparato.

Tali osservazioni, seppur limitate ad un numero ristretto di anni, hanno permesso di esprimere, anche se in modo un po' azzardato, una tendenza per il ghiacciaio di Fontana Bianca.

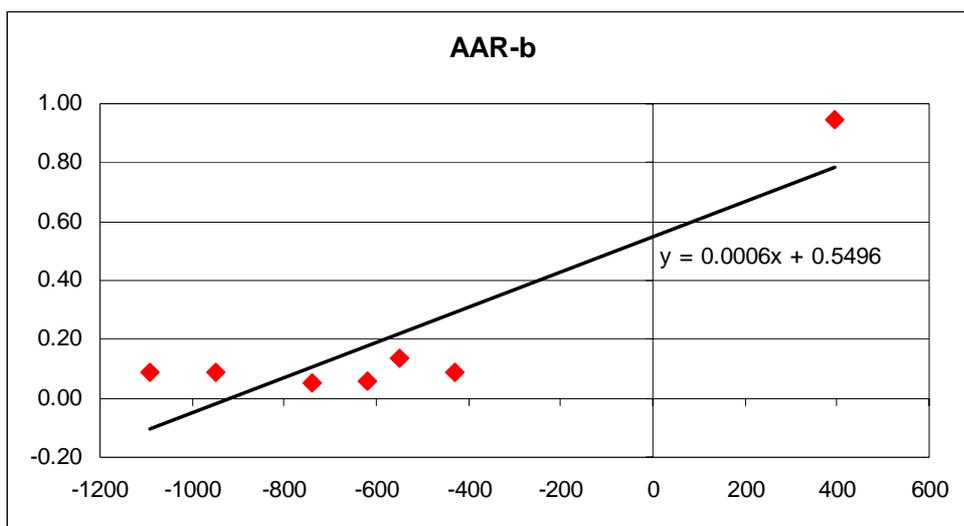


Fig. 14.5 – Relazione tra il rapporto di accumulo sull'area totale del ghiacciaio ed il bilancio specifico.

## 15. CONCLUSIONI

Il capitolo che porta a trattare delle conclusioni che possono essere evidenziate si articola in tre parti; nella prima vengono analizzati i dati pubblicati sull'ultimo bollettino dei bilanci di massa dei ghiacciai pubblicato dal Servizio Mondiale per il Monitoraggio dei Ghiacciai di Zurigo. Tali informazioni sono state confrontate con i valori misurati in ventuno anni di campagne glaciologiche sul ghiacciaio di Fontana Bianca. Nel secondo paragrafo si estende l'area di pertinenza a livello mondiale e si analizza in sintesi il IV Rapporto di Valutazione emesso dal Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC), andando ad estrapolare gli aspetti che più direttamente sono collegati ed influenzati, in relazione biunivoca, dagli apparati glaciali. Infine, nell'ultima parte, si raccolgono le realtà emerse dall'analisi effettuando le considerazioni finali.

### 15.1 *World Glacier Monitoring Service*

Il Servizio Mondiale per il Monitoraggio dei Ghiacciai (WGMS – *World Glacier Monitoring Service*) è l'organo internazionale deputato a raccogliere e pubblicare dati omogenei sui ghiacciai di tutto il mondo. I primi monitoraggi sui ghiacciai del pianeta sono iniziati più di un secolo fa e sono ora inseriti nelle osservazioni del cambiamento climatico globale.

L'IPCC ha chiaramente riconosciuto le variazioni degli apparati glaciali come indicatori del clima ad “elevata sicurezza” (*high confidence*<sup>10</sup>) e come elementi preziosi nella definizione delle strategie di investigazione. I

---

<sup>10</sup> Nella Sintesi per i Decisori Politici del Quarto Rapporto di Valutazione dell'IPCC, per esprimere il giudizio degli esperti (“*expert judgment*”) sulla correttezza di un'affermazione, sono stati usati i seguenti livelli di *confidenza*: *confidenza molto elevata* (“*very high confidence*”) almeno 9 su 10 possibilità di essere corretto; *elevata confidenza* (“*high confidence*”) circa 8 su 10 possibilità di essere corretto (IPCC, 2007).

dati raccolti dal *World Glacier Monitoring Service*, attraverso una rete mondiale di 60 ghiacciai, vengono pubblicati ogni due anni nel *Glacier Mass Balance Bulletin*. Il ghiacciaio di Fontana Bianca, a testimonianza di come anche i piccoli ghiacciai siano importanti per l'analisi del trend mondiale, rientra nella rete dei sistemi glaciali dei quali sono pubblicati i dati. L'ultimo bollettino disponibile è quello relativo al 2001/2002 ed al 2002/2003, mentre sono disponibili on-line i dati preliminari per i bilanci di massa del 2003/2004, 2004/2005 e 2005/2006. Risulta molto importante poter confrontare i dati registrati a livello mondiale con quelli misurati sul modesto ghiacciaio dell'Alto Adige.

	1980–1999	2000–2003
mean specific (annual) net balance:	- 286 mm	- 570 mm
standard deviation of means:	± 256 mm	± 518 mm
minimum mean value:	- 712 mm (1998)	- 1238 mm (2003)
maximum mean value:	+ 112 mm (1983)	- 49 mm (2000)
range:	825 mm	1189 mm
positive mean balances:	15%	0%

	2001/2002	2002/2003
mean specific (annual) net balance:	- 691 mm	- 1238 mm
standard deviation:	± 651 mm	± 1194 mm
minimum value:	- 2320 mm	- 3316 mm
maximum value:	+ 550 mm	+ 2060 mm
range:	2870 mm	5376 mm
positive balances:	13%	10%

Fig. 15.1 – Valori riassuntivi del bilancio di massa; la media del bilancio specifico annuale di 30 ghiacciai nel periodo 2000-2003 confrontati con la media delle medie annuali degli ultimi 20 anni ed i valori specifici per il 2002 ed il 2003 (WGMS, 2005).

Dai dati riportati in figura 15.1 si osserva che la media del bilancio di massa del periodo 2000-2003 risulti circa il doppio di quella registrata nella serie ventennale, che il minimo valore registrato sia riscontrabile nel 2003 e che il massimo valore registrato sia negativo nel 2000 e positivo nel 1983.

<b>Fontana Bianca</b>	<b>1983-1988/1991-1999</b>	<b>2000/03</b>
<b>Mean specific (annual) net balance (mm w.e.)</b>	-620	-931
<b>Standard deviation (mm w.e.)</b>	752	1429
<b>Minimum value (mm w.e.)</b>	-1610 (1998)	-2950 (2003)
<b>Maximum value (mm w.e.)</b>	385 (1983)	395 (2001)
<b>Positive balances (%)</b>	8	25

Fig. 15.2 – Valori riassuntivi del bilancio di massa per il ghiacciaio di Fontana Bianca.

Anche se le tabelle riportate nelle figure 15.1 e 15.2 non sono direttamente confrontabili, si può comunque osservare che il bilancio di massa annuale specifico del ghiacciaio di Fontana Bianca risulta più negativo del trend mondiale in entrambi gli intervalli considerati. Il bilancio di massa più negativo risulta essere quello calcolato per il 1998 prima del 2000, anche se decisamente peggiore è il valore misurato nell'estate 2003, che ha fatto registrare un picco mai raggiunto prima, di circa il doppio di quello registrato nel 1998 e di circa 5 volte superiore alla media del XX secolo.

L'unico bilancio di massa positivo si è verificato invece, nell'anno idrologico 2000/2001, grazie alle precipitazioni invernali particolarmente copiose, che hanno fatto registrare un accumulo invernale pari a 2210 mm di equivalente in acqua, praticamente il doppio rispetto alla media di 1123 mm WE riscontabile nei 21 anni di misure.

	2001/2002	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06
<b>Mean (annual) specific net balance (mm w.e.)</b>	-691	-1238	-743	-563	-1301
<b>Standard deviation (mm w.e.)</b>	651	1194	950	1042	859
<b>Minimum value (mm w.e.)</b>	-2320	-3316	-2820	-3280	-3190
<b>Maximum value (mm w.e.)</b>	550	2060	817	1098	560
<b>Positive balances (%)</b>	13	10	20	28	4

Fig. 15.3 – Valori riassuntivi del bilancio di massa; la media del bilancio specifico annuale di 30 ghiacciai nel periodo 2001-2006 (Fonte: www.wgms.ch).

	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2001-06
<b>Mean (annual) specific net balance (mm w.e.)</b>	-691	-1238	-743	-563	-1301	-907
	-430	-2950	-994	-1471	-1753	-1520

Fig. 15.4 – Valori medi di bilancio specifico di massa annuale per i ghiacciai monitorati dal WGMS (sopra) con quelli registrati per il ghiacciaio di Fontana Bianca (sotto).

Come si può notare la media del periodo 2001-2006 con -907 mm WE, riportato in figura 15.4, è nettamente superiore (circa 3 volte) a quella misurata nel ciclo 1980-1999; parallelamente anche per il ghiacciaio di Fontana Bianca i -1520 mm WE risultano essere più del doppio della media misurata, con -620 mm WE, nei 14 anni di misure prima del 2000. Considerando tutti i 21 anni di campagne glaciologiche la media risulta essere pari a -702 mm WE. Appare però chiaro che dopo l'anno 2000 vi sia stato, a livello globale, un aumento dello scioglimento glaciale, accentuato anche dalla particolare ondata di calore registrata in Europa nell'estate del 2003 (par. 15.1.1).

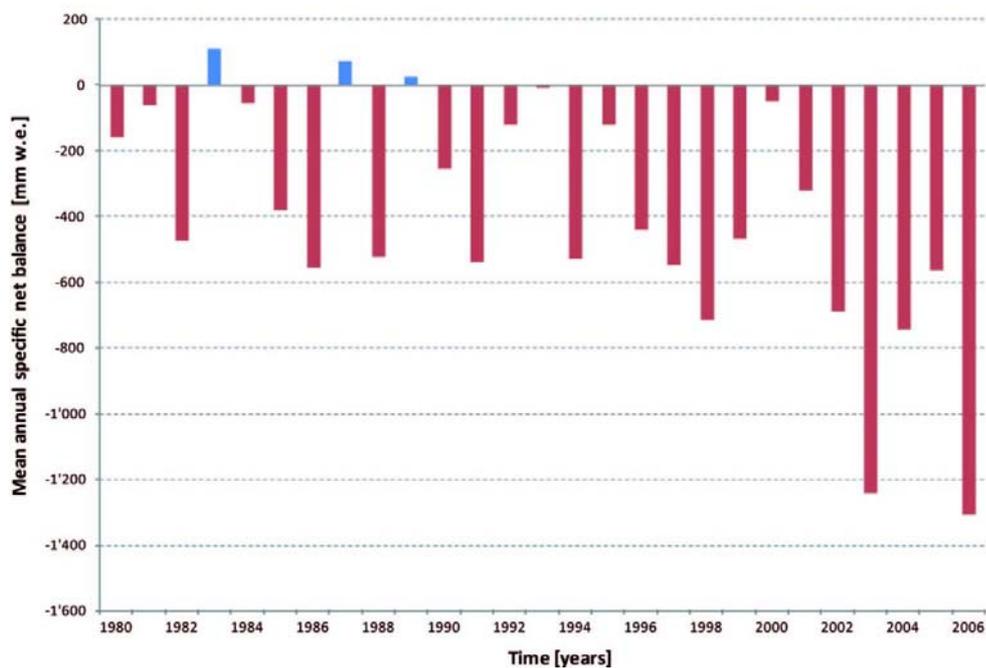


Fig. 15.5 – La media dei bilanci specifici annuali dal 1980 al 2006 (Fonte: www.wgms.ch).

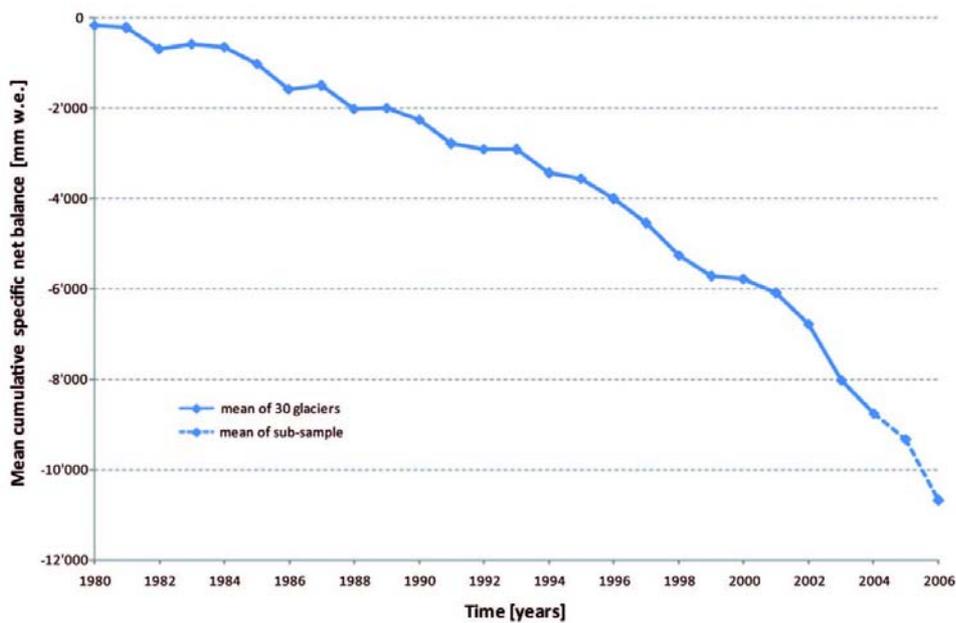


Fig. 15.6 – La media cumulata dei bilanci specifici annuali dal 1980 al 2006 (Fonte: www.wgms.ch).

I dati per i bilanci di massa sono ora disponibili per più di 80 ghiacciai del pianeta. Quelli utilizzati per statistica sono quelli di cui è disponibile una serie di misure dal 1980. Essi sono indicati in figura 15.7.

### **Mountain range Glaciers**

Cascade Mtns.	Place, South Cascade
Svalbard	Austre Broeggerbreen, Midtre Lovénbreen
Andes	Echaurren Norte
Alaska	Gulkana, Wolverine
Scandinavia	Engabreen, Alftobreen, Nigardsbreen, Grasubreen, Storbreen, Hellstugubreen, Hardangerjoekulen, Storglaciaeren
Alps	Saint Sorlin, Sarennes, Silvretta, Gries, Sonnblickkees, Vernagtferner, Kesselwandferner, Hintereisferner, Careser
Altai	No. 125 (Vodopadniy), Maliy Aktru, Leviy Aktru
Caucasus	Djankuat
Tien Shan	Ts. Tuyuksuyskiy, Urumqihe S.No.1

Fig. 15.7 – I 30 ghiacciai suddivisi in 9 regioni montane con una serie di dati dal 1980 (Fonte: [www.wgms.ch](http://www.wgms.ch)).

Nella figura 15.5 appare evidente come la media dei bilanci di massa con serie temporali lunghe, continua a diminuire. Il *trend* è in continua accelerazione e lo dimostra il fatto che la perdita di ghiaccio in 26 anni sia stata pari a più di 10.5 m WE. Considerando i dati disponibili nello stesso arco temporale per il ghiacciaio di Fontana Bianca, la quantità di ghiaccio fuso è stato di circa 18 m WE, nettamente superiore alla media mondiale.

<b>Italy</b>					
	2003/04	2004/05	2005/06	Media 2003-2006	Media ghiacciai italiani
Calderone	252	-194	1090	383	
Careser	-1562	-2005	-2169	-1912	
Ciardoney	-991	-2149	-2100	-1747	
Fontana Bianca	-994	-1471	-1753	-1406	-1130
Malavalle	-208	-787	-1327	-774	
Pendente	-427	-936	-1780	-1048	
Vedretta Lunga	-1524	-1233	-1460	-1406	

Fig. 15.8 – Bilanci di massa dei ghiacciai italiani che vengono pubblicati sul GMBB (Fonte: [www.wgms.ch](http://www.wgms.ch)).

Nella figura 15.8 vengono indicati i bilanci di massa per i ghiacciai italiani che sono inseriti nel *Glacier Mass Balance Bulletin*. Con i 1406 mm WE di media persi nel triennio dal 2003 al 2006 il ghiacciaio di Fontana Bianca si colloca al terzo posto più negativo in virtù di una media per questi apparati glaciali di -1139 mm WE. Analizzando il comportamento dei ghiacciai che vengono utilizzati per delineare il *trend* della regione alpina (Francia, Svizzera Austria e Italia) (vedi fig. 15.7) nello stesso intervallo di tempo, la media risulta di -1387 mm WE, superiore a quella registrata per i sistemi glaciali che si sviluppano sul territorio italiano. Alla luce di tali valori, il piccolo ghiacciaio oggetto di tale studio rientra pienamente nella tendenza generale dei ghiacciai alpini, soprattutto per quanto riguarda gli ultimi tre anni di misure.

### 15.1.1 L'estate dell'anno 2003

L'ondata di caldo che ha investito molte parti d'Europa nel corso dell'estate 2003 ha fatto registrare valori record di temperatura nel giugno e nell'agosto. Le temperature rilevate hanno evidenziato che è stata l'estate più calda dai primi rilevamenti confrontabili del 1780: 3.8°C sopra la media tra il 1961 ed il 1990 e 1.4°C più calda di qualsiasi altra estate nello stesso periodo (la seconda più calda fu nel 1807). L'ondata di caldo del 2003 fu associata ad un sistema isolato di alta pressione persistente; un fattore aggravante per gli estremi di temperatura fu la mancanza di precipitazioni in molte località dell'Europa centrale ed occidentale,

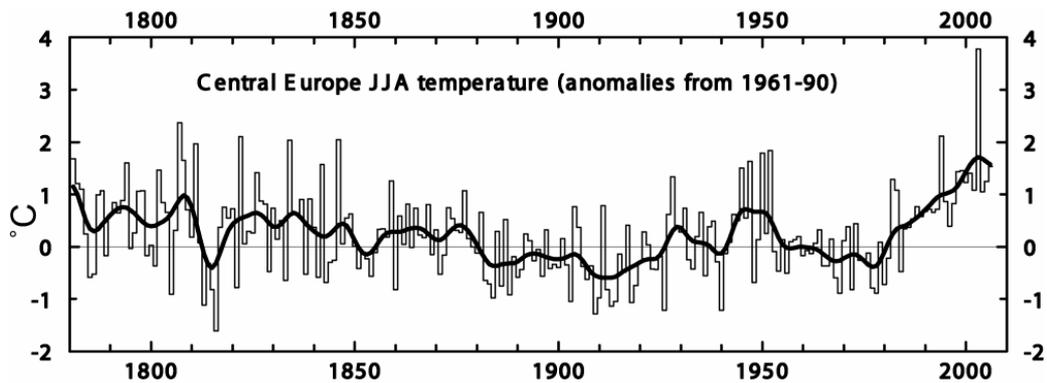


Fig. xx – Variazioni di temperatura dal 1780 ai primi anni del 2000  
(Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

## 15.2 Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC)

Il Comitato Norvegese per il Premio Nobel ha riconosciuto al Comitato Intergovernativo per i Cambiamenti Climatici (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*) e ad Al Gore, in parti uguali, il Premio Nobel per la Pace 2007, per l'impegno profuso nella costruzione e nella divulgazione di una maggiore conoscenza sui cambiamenti climatici antropogenici, e nel porre le basi per le misure che sono necessarie per contrastarli. Questo è un importante riconoscimento al lavoro di quasi venti anni dell'IPCC ed al lavoro della gran parte della comunità scientifica climatica mondiale, che ha partecipato attivamente alla stesura dei Rapporti di Valutazione IPCC.

L'IPCC è stato istituito nel 1988 dalla Organizzazione Mondiale della Meteorologia dell'ONU (WMO) e dal Programma Ambientale dell'ONU (UNEP) con lo scopo di fornire ai politici ed a tutta la comunità scientifica mondiale una valutazione obiettiva della letteratura scientifica disponibile sui vari aspetti dei cambiamenti climatici, impatti, adattamento e mitigazione; ciò al fine di comprendere meglio il rischio dei cambiamenti climatici causati dalle attività umane.

È un organo intergovernativo (e non di ricerca diretta) aperto a tutti i Paesi membri della WMO e dell'UNEP. Ogni governo ha un *Focal Point IPCC* che coordina le attività relative al proprio paese. Partecipano al lavoro anche le rilevanti Organizzazioni internazionali, intergovernative e non-governative. L'IPCC, tra le varie pubblicazioni, produce ogni sei anni dei Rapporti di Valutazione divisi in tre volumi sulle basi fisiche dei cambiamenti climatici, impatti, vulnerabilità dei diversi sistemi umani e naturali, adattamento e mitigazione dei cambiamenti climatici.

L'organizzazione ha tre gruppi di lavoro (*Working Group* - WG) e una *Task Force*:

il Gruppo di lavoro I (WG I) sul sistema clima e sui cambiamenti climatici;

il Gruppo di lavoro II (WG II) sulla vulnerabilità dei sistemi naturali e socio-economici, gli impatti dei cambiamenti climatici e le opzioni di adattamento;

il Gruppo di lavoro III (WG III) sulla mitigazione dei cambiamenti climatici (vale a dire la riduzione delle emissioni dei gas effetto serra (*Green House Gas* - GHG));

la *Task Force* sugli Inventari Nazionali dei gas effetto serra, responsabile del programma IPCC sugli Inventari Nazionali dei gas effetto serra.

Gli esperti scientifici (tra cui vi sono alcuni scienziati italiani), che lavorano in maniera volontaria e non retribuita dall'IPCC, sono scelti dall'IPCC Bureau, che è composto da scienziati qualificati a livello internazionale. Questi esperti internazionali rappresentano il più alto livello di *expertise* nei vari settori e aspetti dei cambiamenti climatici (tra questi figurano presenti molti climatologi statunitensi).

I rapporti di valutazione riflettono un'analisi del consenso scientifico dei risultati riguardo i cambiamenti climatici, estratto dalla letteratura "*peer-reviewed*" scientifica mondiale, insieme ad indicazioni del grado di confidenza scientifica sulle conclusioni estratte dalla letteratura. L'approccio dell'IPCC è obiettivo e trasparente.

In conclusione, il Rapporto AR4-IPCC del 2007 ha implicato sei anni di lavoro coinvolgendo:

- 800 autori (che hanno contribuito ai contenuti dei vari capitoli);

- 450 autori responsabili di capitoli (che hanno coordinato il lavoro di finalizzazione dei vari capitoli);
- 2500 revisori (che hanno commentato e revisionato i vari capitoli).

Nel paragrafo seguente si è cercato di individuare e riassumere gli aspetti più che più risultano inerenti e collegati alla progressiva perdita di massa glaciale del pianeta. Questa azione si è rivelata molto laboriosa e complicata dal momento che il quarto rapporto di valutazione analizza tutti i risvolti dei cambiamenti climatici ed evidenzia la loro interconnessione e dipendenza, sviluppando ben sei scenari futuri. In questa ricerca si è voluto comparare solo gli aspetti macroscopici che influenzano direttamente l'ambiente glaciale. (fonte: <https://www.cmcc.it/web/public/IPCC-Italia>)

### **15.2.1 Breve sintesi del IV Rapporto di Valutazione**

Le concentrazioni globali in atmosfera di anidride carbonica, metano e protossido di azoto sono notevolmente aumentate come risultato dell'attività umana dal 1750 e attualmente superano i valori pre-industriali, come dimostrato dall'analisi delle carote di ghiaccio, che rappresentano molte migliaia di anni. L'incremento globale della concentrazione di anidride carbonica è principalmente dovuto all'uso di combustibili fossili ed a cambiamenti di uso del suolo, mentre gli incrementi di metano e protossido di azoto sono principalmente dovuti all'agricoltura.

Il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile, come risulta evidente dalle osservazioni dell'aumento delle temperature medie globali dell'aria e delle temperature degli oceani, dello scioglimento diffuso di neve e ghiaccio, e dell'innalzamento del livello del mare medio globale.

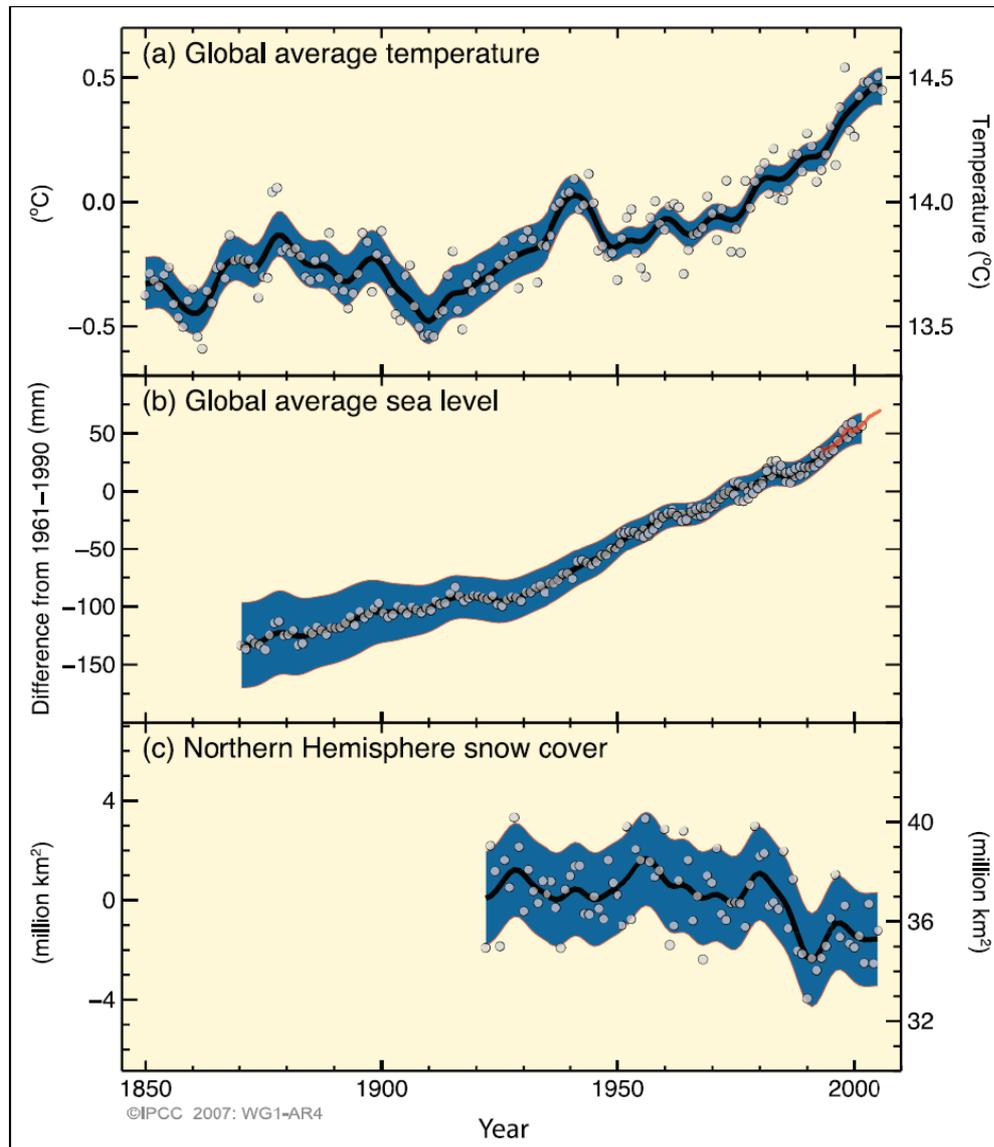


Fig. 15.9 - Cambiamenti osservati di a) temperatura media globale alla superficie, (b) livello del mare medio globale da mareografi (blu) e da dati da satellite (rosso) e (c) copertura nevosa dell'emisfero Nord fra Marzo e Aprile. Tutti i cambiamenti sono relativi alle corrispondenti medie per il periodo 1961-1990. Le curve smussate rappresentano i valori medi decennali mentre i cerchi mostrano i valori annuali. Le aree ombreggiate sono gli intervalli di incertezza stimati attraverso un'analisi dettagliata delle incertezze conosciute (a e b) e in base alle serie temporali (c) (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

Undici degli ultimi dodici anni (1995-2006) si classificano fra i più caldi mai registrati da quando si hanno misure globali di temperatura alla superficie dall'anno 1850. Il *trend* lineare per gli ultimi 100 anni (1906-2005) aggiornato di 0.74 [da 0.56 a 0.92] °C è quindi maggiore del

corrispondente trend per gli anni 1901-2000 riportato nel Terzo Rapporto di Valutazione (*Third Assessment Report - TAR*) di 0.60 [da 0.40 a 0.80] °C. Il trend di riscaldamento lineare per gli ultimi 50 anni (0.13 [da 0.10 a 0.16]°C per decennio) è quasi il doppio di quello per gli ultimi 100 anni. L'aumento totale della temperatura dal 1850-1899 al 2001-2005 è di 0.76 [da 0.57 a 0.95] °C (fig. 15.9).

Le osservazioni fatte dal 1961 mostrano che la temperatura media degli oceani globali è aumentata fino ad una profondità di almeno 3000 m, e che l'oceano ha assorbito più dell'80% del calore aggiunto al sistema climatico. Un tale riscaldamento provoca l'espansione dell'acqua marina contribuendo al sollevamento del livello del mare (fig. 15.10)

Tasso di innalzamento del livello del mare (mm all'anno)		
Cause di innalzamento del livello del mare	1961–2003	1993–2003
Espansione termica	0.42 ± 0.12	1.6 ± 0.5
Ghiaccio e calotte di ghiaccio	0.50 ± 0.18	0.77 ± 0.22
Calotte di ghiaccio in Groenlandia	0.05 ± 0.12	0.21 ± 0.07
Calotte di ghiaccio in Antartide	0.14 ± 0.41	0.21 ± 0.35
Somma dei contributi climatici individuali all'innalzamento del livello del mare	1.1 ± 0.5	2.8 ± 0.7
Innalzamento totale del livello del mare osservato	1.8 ± 0.5 <sup>a</sup>	3.1 ± 0.7 <sup>a</sup>
Differenza (osservato meno la somma dei contributi climatici stimati)	0.7 ± 0.7	0.3 ± 1.0

Fig. 15.10 - Tassi di innalzamento del livello del mare osservati e stime dei contributi di diverse cause (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

I ghiacciai montani e la copertura nevosa sono mediamente diminuiti in entrambi gli emisferi. La vasta diminuzione dei ghiacciai e delle calotte di ghiaccio ha contribuito all'innalzamento del livello del mare (le calotte di ghiaccio non includono i contributi delle calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide).

I nuovi dati mostrano ora che la perdita di quantità di ghiaccio dalle calotte glaciali in Groenlandia e in Antartide ha molto probabilmente contribuito all'innalzamento del livello marino fra il 1993 e il 2003

(fig. 15.10). In Groenlandia ed Antartide è aumentata la velocità di flusso di alcune lingue glaciali che trasportano ghiaccio dall'interno delle calotte glaciali. Il corrispondente aumento di perdita di massa della calotta glaciale ha spesso avuto come conseguenza l'assottigliamento, la riduzione o la perdita di banchisa di ghiaccio o il distacco di lingue glaciali galleggianti. Questa riduzione dinamica del ghiaccio è sufficiente a spiegare la maggior parte delle perdite nette di massa in Antartide e approssimativamente la metà della perdita netta di massa in Groenlandia. La rimanente quantità di ghiaccio perso dalla Groenlandia può essere spiegata con la perdita dovuta allo scioglimento delle nevi che ha superato l'accumulo dovuto alle neviccate.

Il livello del mare medio globale è cresciuto ad un tasso medio di 1.8 [da 1.3 a 2.3] mm all'anno dal 1961 al 2003 (fig. 15.9). Il tasso di crescita è stato maggiore durante il periodo 1993-2003: circa 3.1 [da 2.4 a 3.8] mm all'anno. Non è chiaro se il più veloce tasso di crescita nel periodo 1993-2003 rifletta la variabilità decennale o un incremento del trend nel lungo termine. Esiste "un'alta confidenza" che il tasso osservato di innalzamento del livello del mare sia aumentato dal XIX al XX secolo. La stima dell'innalzamento totale per il XX secolo è pari a 0.17 [da 0.12 a 0.22] m.

Il contributo totale dei ghiacciai e delle calotte glaciali all'aumento del livello del mare è stimato in  $1.2 \pm 0.4$  mm all'anno, per il periodo dal 1993 al 2003. Il diffuso riscaldamento dell'atmosfera e degli oceani osservato, insieme alla perdita di masse di ghiaccio, supporta la conclusione che è estremamente improbabile che i cambiamenti climatici globali degli ultimi 50 anni possano essere spiegati senza "forzanti esterni", ed è molto probabile che non siano stati causati solo dalle cause naturali conosciute.

Sono stati osservati numerosi cambiamenti del clima di lungo termine alle scale continentali, regionali e di bacino oceanico. Questi cambiamenti includono variazioni delle temperature e dei ghiacci

nell'Artico, estese variazioni delle quantità delle precipitazioni, della salinità dell'oceano, delle strutture dei venti e delle tipologie di eventi estremi come siccità, forti precipitazioni, ondate di calore e intensità dei cicloni tropicali (compresi uragani e cicloni).

Sono state osservate siccità più lunghe e più intense in aree sempre più estese a partire dagli anni settanta, particolarmente nelle zone tropicali e sub-tropicali. L'aumento di periodi secchi, collegati alle alte temperature e alla diminuzione delle precipitazioni, ha fortemente contribuito ai mutamenti nelle siccità. I cambiamenti della temperatura alla superficie del mare, delle strutture dei venti e la diminuzione del manto nevoso e della copertura nevosa sono anch'essi collegati alle siccità.

La frequenza degli eventi di forte precipitazione è aumentata nella maggior parte delle terre emerse, in linea con il riscaldamento e con gli aumenti osservati di vapore acqueo in atmosfera.

Negli ultimi 50 anni sono stati monitorati ampi cambiamenti delle temperature estreme. Giorni freddi, notti fredde e gelate sono diventati meno frequenti, mentre i giorni caldi, le notti calde e le ondate di calore sono diventate più frequenti.

La maggior parte dell'aumento osservato delle temperature medie globali dalla metà del XX secolo, è molto probabilmente dovuto all'aumento delle concentrazioni di gas serra di origine antropica. Questo è un risultato nuovo rispetto alle conclusioni del TAR, per il quale "la maggior parte del riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni è probabilmente dovuto all'aumento osservato delle concentrazioni di gas serra". Ora evidenti influenze dell'attività umana si estendono anche ad altri aspetti del clima, inclusi il riscaldamento degli oceani, l'aumento delle temperature medie sui continenti, le temperature estreme e le strutture dei venti.

### **15.2.2 Proiezioni dei futuri cambiamenti del clima**

Le proiezioni per i prossimi due decenni indicano un riscaldamento di circa 0.2 °C per decennio per un *range* di scenari di emissione SRES<sup>11</sup>. Anche se le concentrazioni di tutti i gas serra e di tutti gli aerosol fossero mantenute costanti ai livelli dell'anno 2000, ci si aspetterebbe un ulteriore riscaldamento di circa 0.1° C per decennio.

In questa valutazione sono date le miglior stime e gli intervalli di probabilità del riscaldamento medio globale dell'aria alla superficie per i sei scenari di riferimento SRES. Per esempio, la miglior stima per lo scenario basso (B1) è di 1.8 °C (l'intervallo di probabilità va da 1.1° C a 2.9 °C), e la miglior stima per lo scenario alto (A1FI) è di 4.0 °C (l'intervallo di probabilità va da 2.4 °C a 6.4 °C). Sebbene queste proiezioni siano largamente corrispondenti con quanto riportato nel TAR (da 1.4 °C a 5.8 °C), esse non sono direttamente confrontabili (fig. 15.11). Il Rapporto AR4 è più avanzato poiché fornisce le miglior stime e un intervallo di probabilità valutato per ogni scenario di riferimento. La nuova valutazione degli intervalli di probabilità si basa ora su un maggior numero di modelli climatici di crescente complessità e realismo, ed anche su nuove informazioni relative ai *feedback* del ciclo del carbonio ed ai vincoli sulla risposta del clima provenienti dalle osservazioni.

---

<sup>11</sup> SRES si riferisce allo Special Report on Emission Scenarios dell'IPCC (2000). Le concentrazioni di CO<sub>2</sub> equivalenti per gli scenari illustrativi di riferimento SRES B1, A1T, B2, A1B, A2 e A1FI sono circa 600, 700, 800, 850, 1250 e 1550 ppm rispettivamente (ppm (parti per milione) o ppb (parti per miliardo) è il rapporto fra il numero di molecole di gas serra e il numero totale di molecole di aria secca. Per esempio: 300 ppm significa 300 molecole di gas serra per milione di molecole di aria secca).

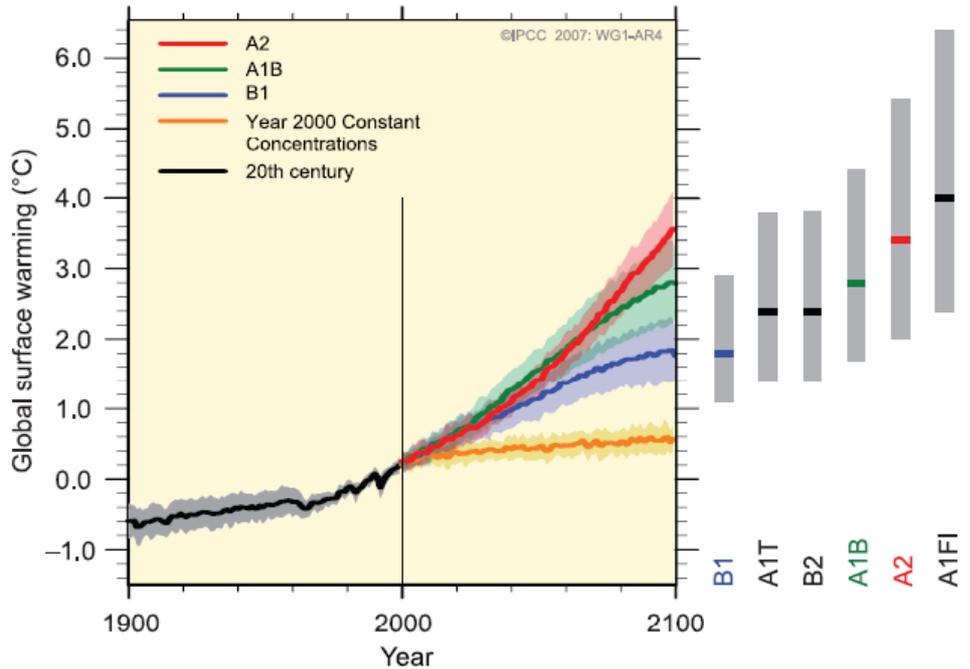


Fig. 15.11 - Le linee spesse sono le medie globali di più modelli del riscaldamento della superficie (rispetto al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1, mostrati come la continuazione delle simulazioni per il XX secolo. Le aree ombreggiate indicano l'intervallo di più o meno una deviazione standard delle medie annuali di ogni singolo modello. La linea arancione si riferisce all'esperimento in cui le concentrazioni sono mantenute costanti ai valori dell'anno 2000. Le barre grigie a destra indicano la miglior stima (linea solida all'interno di ciascuna barra) e l'intervallo di probabilità valutato per i sei scenari di riferimento SRES. La valutazione della miglior stima e dell'intervallo di probabilità nelle barre grigie include sia gli AOGCM (modelli di Circolazione Generale Oceano-Atmosfera) della parte sinistra della figura, sia i risultati provenienti da una gerarchia di modelli indipendenti e da vincoli osservativi (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

Le proiezioni indicano una diminuzione della copertura nevosa e diffusi aumenti della profondità di disgelo nella maggior parte delle zone di permafrost. Secondo le proiezioni, il ghiaccio marino tenderà a ridursi sia nelle zone artiche che antartiche per tutti gli scenari SRES. In alcune proiezioni, il ghiaccio marino artico durante la tarda estate sparirà quasi completamente verso la fine del XXI secolo.

È molto probabile che eventi di estremo caldo, ondate di calore e forti precipitazioni continueranno a diventare più frequenti.

Le proiezioni indicano inoltre che la riduzione delle calotte glaciali della Groenlandia continuerà a contribuire al sollevamento del livello dal

mare dopo il 2100. I modelli attuali suggeriscono che le perdite di massa di ghiaccio aumenteranno con la temperatura più rapidamente degli incrementi della massa di ghiaccio per via delle precipitazioni, e che il bilancio di massa alla superficie diventerà negativo nel caso di un riscaldamento medio globale superiore a 1.9 - 4.6 °C (rispetto ai valori pre-industriali). Se un bilancio di massa negativo alla superficie fosse mantenuto per millenni, questo porterebbe virtualmente alla completa eliminazione delle calotte di ghiaccio della Groenlandia, e come risultato si avrebbe un aumento del livello del mare di circa sette m. Le corrispondenti temperature future in Groenlandia sono confrontabili con quelle ipotizzate per l'ultimo periodo interglaciale, 125.000 anni fa, quando, secondo le informazioni paleoclimatiche, ci fu una riduzione dell'estensione dei ghiacci polari terrestri ed un innalzamento del livello del mare da 4 a 6 m.

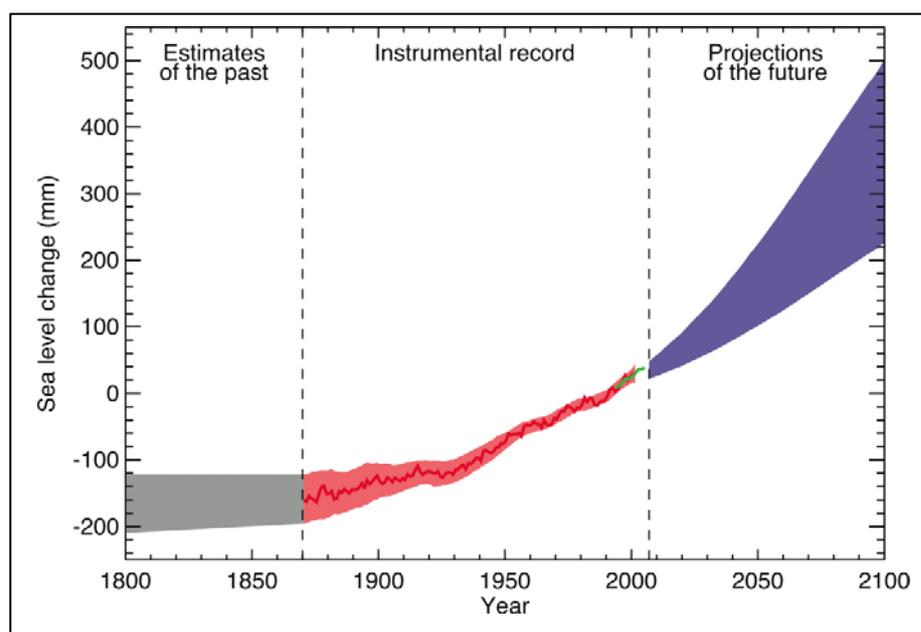


Fig. 15.12 – Serie temporali del livello medio globale del mare (deviazione dalla media dal 1980 al 1999) nel passato e come proiezione futura. Prima del 1970 non ci sono dati disponibili. La banda grigia mostra l'incertezza nella stima delle variazioni del livello del mare a lungo termine. La linea rossa è una ricostruzione del livello medio globale del mare dalle oscillazioni delle maree, e la banda rossa indica il campo di variazione. La linea verde rappresenta il livello medio globale del mare ripreso dal satellite. La banda blu rappresenta l'intervallo di valori previsti dal modello di proiezione (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

I processi dinamici relativi ai flussi di ghiaccio non sono stati ancora inseriti nei modelli attuali, ma potrebbero elevare la vulnerabilità delle calotte di ghiaccio a causa del riscaldamento, come suggerito da alcune recenti osservazioni, facendo così aumentare il futuro innalzamento del livello del mare. La comprensione di questi processi è limitata, per le consistenti variabilità che la interessano, e non c'è accordo sulla loro entità.

Le proiezioni derivanti da studi fatti dai modelli globali attuali indicano che la calotta glaciale Antartica rimarrà troppo fredda per permettere un ampio scioglimento superficiale e aumenterà la propria massa per via di un aumento delle precipitazioni nevose. Comunque, potrebbe verificarsi una perdita netta di massa di ghiaccio se i meccanismi di scarico dinamico del ghiaccio dovessero dominare il bilancio di massa della calotta glaciale.

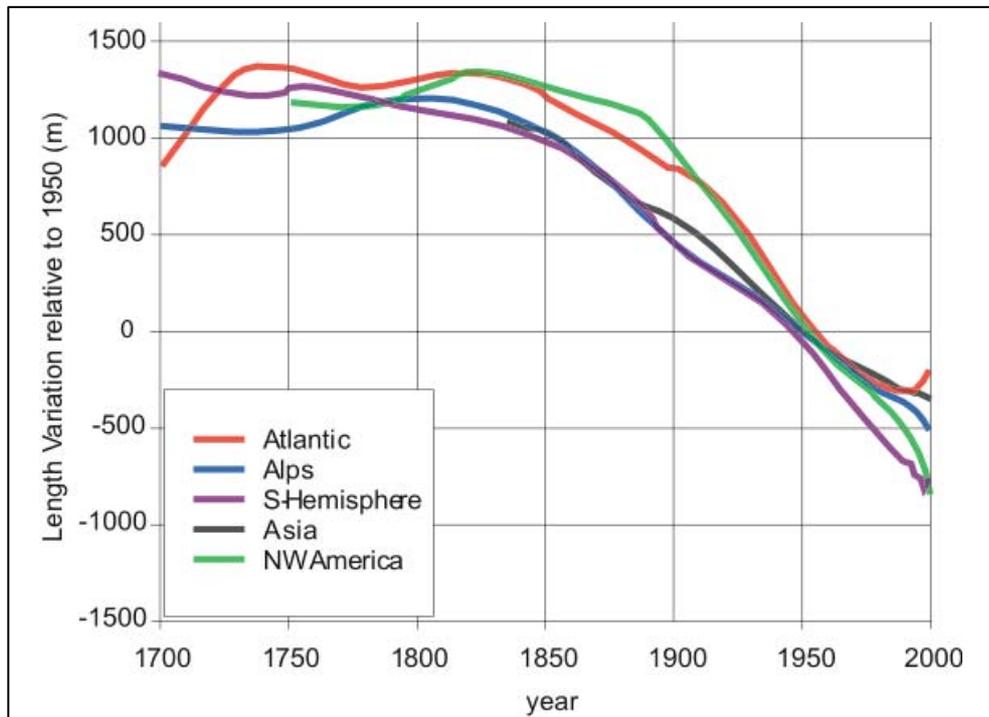


Fig. 15.13 – Variazioni di lunghezza sulle lingue glaciali a larga scala (Oerlemans, 2005). I ghiacciai sono raggruppati secondo le seguenti classi regionali: SH (tropicali, Nuova Zelanda, Patagonia), America nord-occidentale (Canadian Rockies), Atlantico (sud della Groenlandia, Islanda, Jan Mayen, isole Svalbard, Scandinavia), Alpi europee e Asia (Caucaso e Asia centrale) (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

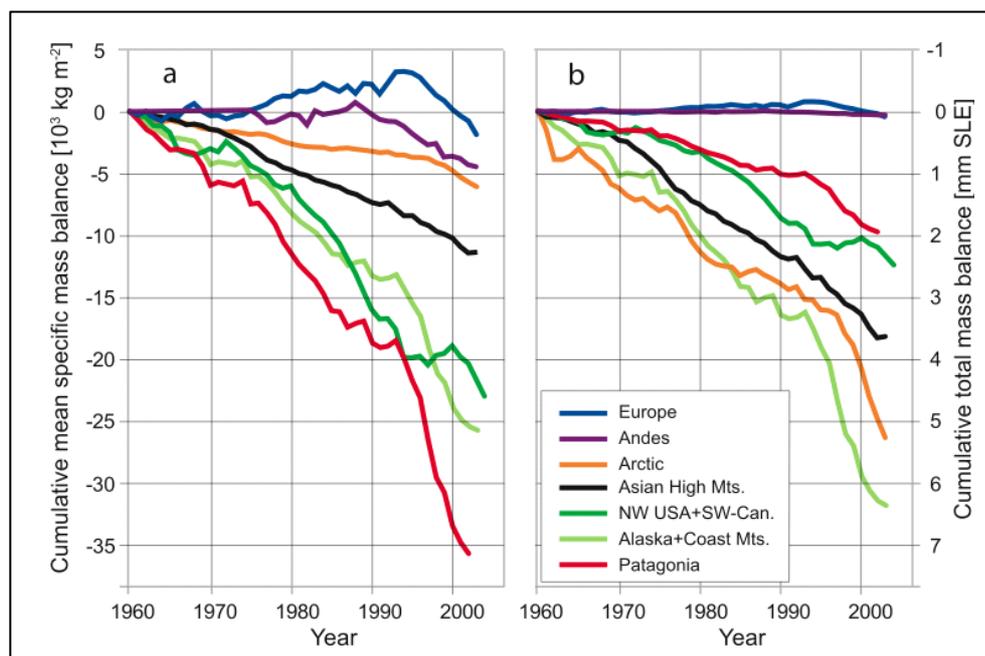


Fig. 15.14 – Media cumulata dei bilanci di massa specifici (a) e totale cumulato dei bilanci di massa (b) dei ghiacciai e delle calotte glaciali, calcolate per grandi regioni (Dyrgerov e Meier, 2005). La media dei bilanci di massa specifici mostra la forza dei cambiamenti climatici nelle rispettive regioni. Il bilancio di massa totale è espresso come contributo di ciascuna regione all’incremento del livello del mare (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4).

### 15.3 Considerazioni finali

La sintesi di tutti i risultati emersi dall’analisi effettuata nei capitoli precedenti è quanto mai difficoltosa e complessa, per la quantità di relazioni trasversali che coinvolgono direttamente un apparato glaciale. Si può comunque affermare con certezza che lo studio non solo delle grandi distese glaciali, ma anche dei sistemi alpini, è fondamentale per conoscere e monitorare l’evoluzione climatica del pianeta. È ormai riconosciuto a livello globale che i ghiacciai sono degli ottimi indicatori ambientali e che rappresentano una testimonianza indelebile sul territorio delle fluttuazioni passate del clima; sono altresì una ricchezza idrica da non sottovalutare e da preservare con oculatezza, poiché costituiscono lo 0.7% dell’acqua dolce presente sul globo (Williams & Hall, 1983). Anche se si tratta di una

percentuale piccola è molto importante in virtù delle molteplici possibilità di utilizzazione cui essa si può prestare. I ghiacciai rilasciano acqua liquida anzitutto nei mesi estivi ed alimentano con acqua ed energia innumerevoli fiumi e, anche l'uomo indirettamente, ne beneficia. Questa energia viene prodotta per mezzo di centrali idroelettriche servite da serbatoi di accumulo oppure ad acqua fluente. Fiumi e torrenti servono poi per l'agricoltura e per le attività produttive e offrono all'uomo acqua potabile nelle zone di siccità interalpina, indiane, dell'Himalaia e delle Ande (AA 1997).

A causa del forte surriscaldamento dell'atmosfera sono sempre maggiori le preoccupazioni per l'innalzamento del livello degli oceani, anche perchè una parte consistente della popolazione della terra vive lungo le coste a pochi metri sopra il livello del mare oppure addirittura al di sotto di esso. Larghe parti di India o Bangladesh possono essere prese come esempio a riguardo e gli stessi Paesi Bassi sarebbero colpiti da un eventuale innalzamento del livello dei mari, dal momento che gran parte della loro superficie si trova al di sotto del mare. (AA 1997).

Quasi la totalità della comunità scientifica concorda, come si è appreso dall'analisi del IV Rapporto di Valutazione, che il riscaldamento globale sia per lo più imputabile agli effetti delle attività umane e direttamente correlabile all'aumento della concentrazione di biossido di carbonio e di altri gas ad effetto serra nell'atmosfera (IPCC, 2007). L'importanza di effettuare campagne di misurazione sui ghiacciai, monitorando la loro evoluzione e confrontare tali risultati tra zone omogenee, risulta quindi del tutto basilare e necessaria. Nello stesso arco alpino, l'esposizione dell'apparato glaciale e la morfologia dello stesso, sono di fondamentale importanza per comprendere il comportamento del bilancio di massa. Infatti, anche a distanza di pochi km in linea d'aria, si pensi al ghiacciaio di Vedretta Lunga e al Fontana Bianca, si possono avere bilanci di massa anche molto diversi tra loro nello stesso anno. Considerando un incremento di temperatura dell'aria di 0.2 °C per decennio,

come previsto dall'AR4, che significano 0.4°C in venti anni, avremo ipoteticamente che questo porterebbe, considerando un gradiente termico di 6.5°C ogni 1000 m di quota, ad un innalzamento, per esempio, della linea di equilibrio di circa 154 m.

Nonostante il ghiacciaio di Fontana Bianca sia ormai destinato, se tali condizioni climatiche persisteranno, a rimanere senza bacino d'accumulo e quindi a ritirarsi sempre più, l'Ufficio Idrografico intende comunque mantenere la rete di monitoraggio per osservare in modo scientifico le modalità di estinzione del sistema.

## **ALLEGATI**

**Handprofil**

Beobachter: Ch. Oberschmied A. Di Lullo  
 Höhe ü. M. 3250 m  
 Exposition: E  
 Wetter/Niederschlag:  
 Bemerkungen:

HSW: 716,8 mm (HS:185 cm)

Ort: **W WBF 1er Pegel**

Datum/Zeit: **10.05.2007 08:45**

Station: Uffi  
 Koordinaten: /  
 Neigung: 10 °

Mittlere Dichte: 387 kg/m<sup>3</sup>

Profilnr: 1

Temp.: 0,0 °C

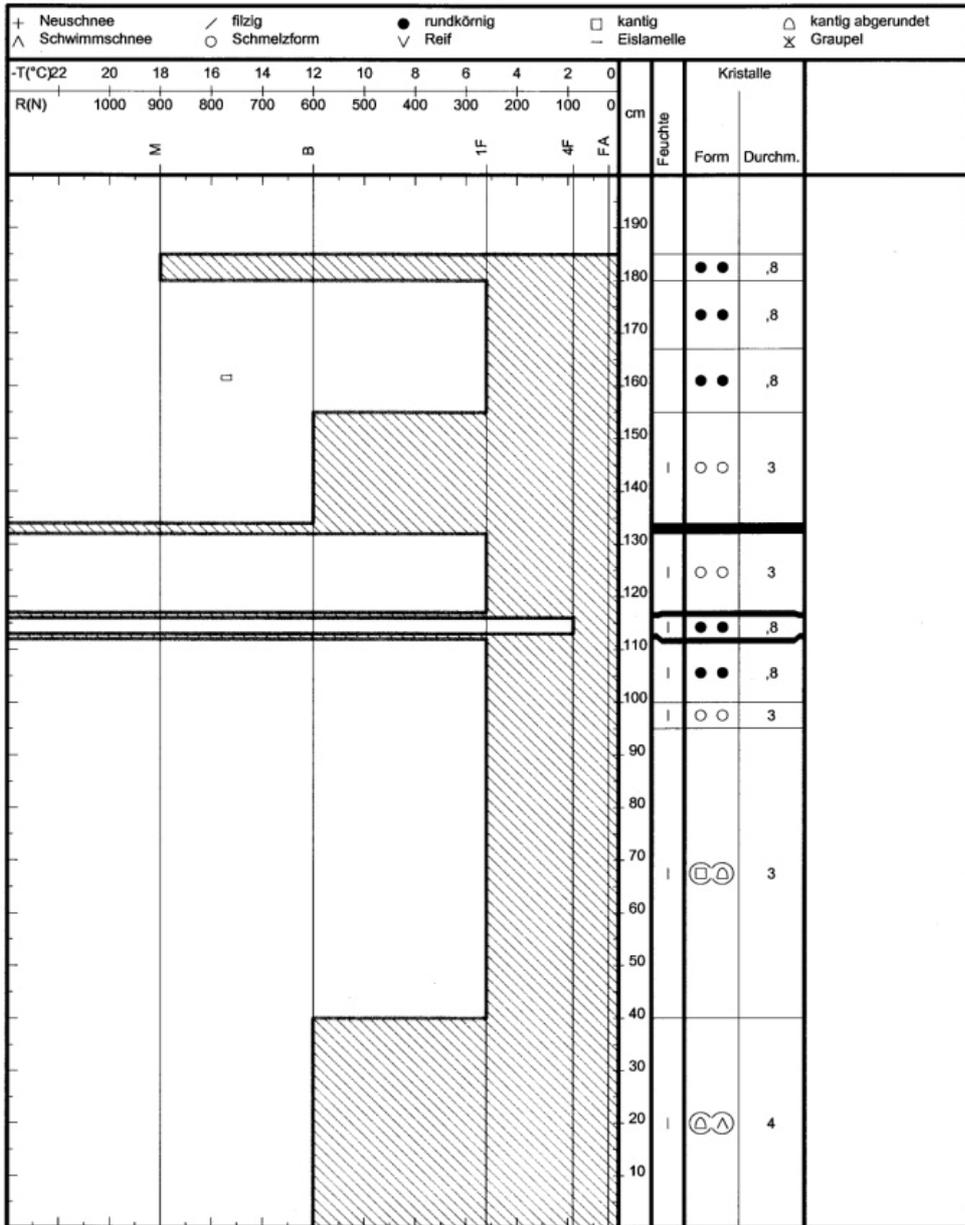
wolkig (2/8-3/8)

Windrichtung: W

Windstärke: schwach

Neuschnee: 0 cm

Mittl. Rammwiderstand: 0 N



Allegato 1 – Profilo stratigrafico della prima trincea, presso la palina 1.

**Handprofil**

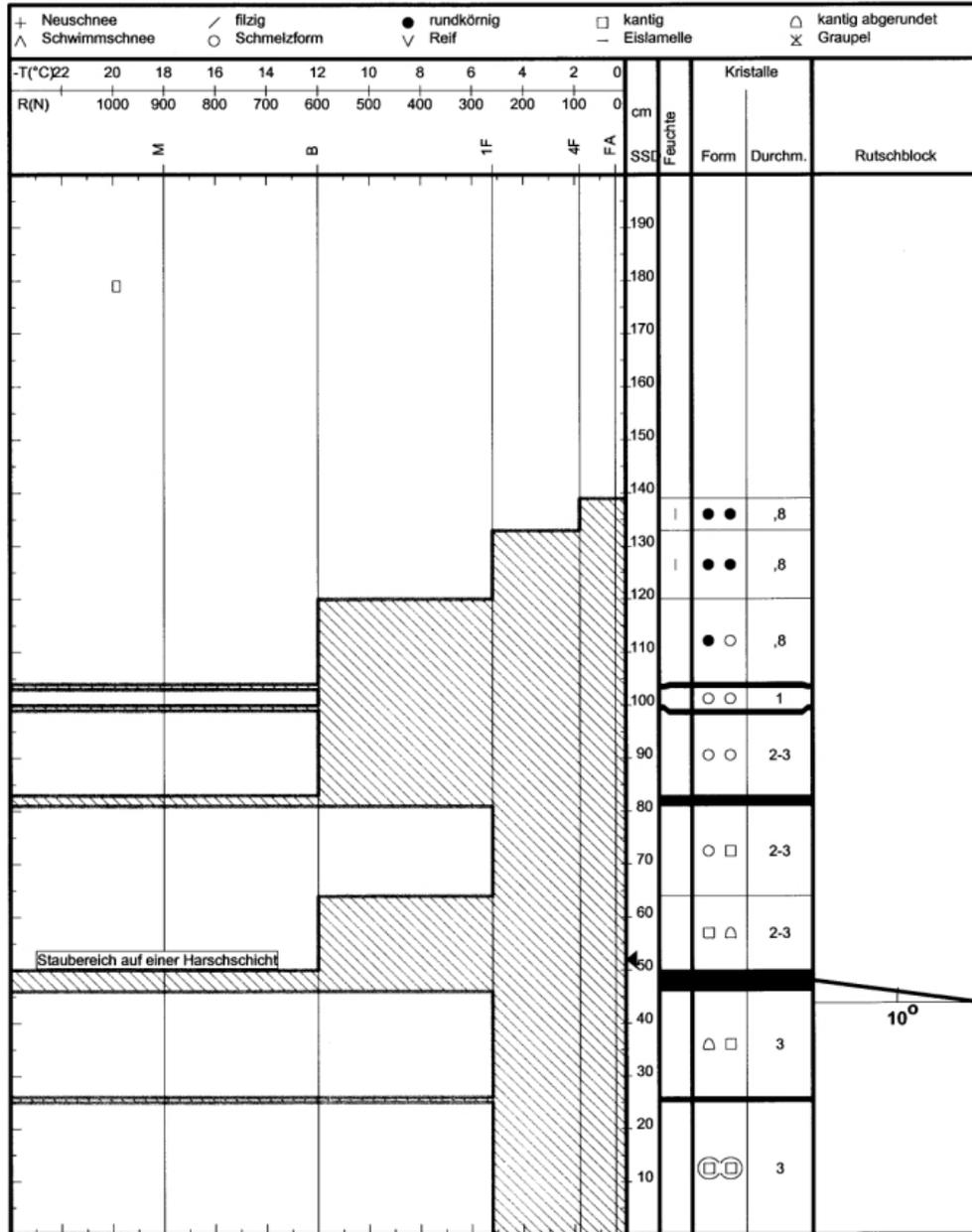
Beobachter: Ch. Oberschmied, A. Di Lullo, R. Dinale  
 Höhe ü. M. 2950 m  
 Exposition: E  
 Wetter/Niederschlag:  
 Bemerkungen:  
 HSW: 566,0 mm (HS:139 cm)

Ort: **W Wbf\_10er-Pegel**  
 Datum/Zeit: **14.05.2007 10:20**  
 Station: Uffi  
 Koordinaten: /  
 Neigung: 10 °

Profilnr: 2  
 Temp.: 2,0 °C  
 wolkig (2/8-3/8)  
 Windrichtung: W  
 Windstärke: schwach  
 Neuschnee: 0 cm

Mittlere Dichte: 407 kg/m³

Mittl. Rammwiderstand: 0 N



Allegato 2 – Profilo stratigrafico della prima trincea, presso la palina 10.

## Auswertungsprotokoll

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **07/06/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 11:00  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 11:00  
 Messtrupp: **RD/ADL**  
 Bemerkung:

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 17.5 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 17.5 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.034 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 17.5 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.192 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.10 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 17.5 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.174 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 0.610 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.197 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.885$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	0.40	0.0	17.5				
P	0.40	17.5	17.5			0.237	0.041
M	0.50	17.5	17.5	<b>0.610</b>	<b>0.448</b>	<b>0.473</b>	<b>0.083</b>
M	0.60	17.5	17.5	0.439	0.405	0.393	0.069
M	0.70	17.5	17.5	0.320	0.269	0.270	0.047
M	0.80	17.5	17.5	0.187	0.245	0.213	0.037
M	0.90	17.5	17.5	0.129	0.088	0.096	0.017
M	1.00	17.5	17.5	0.154	0.040	0.073	0.013
M	1.10	17.5	17.5	0.072	0.040	0.048	0.008
M	1.20	17.5	17.5	0.040	0.040	0.038	0.007
M	1.30	17.5	17.5	0.040	0.040	0.038	0.007
P	1.50	17.5	17.5			0.019	0.003
U	1.50	0.0	17.5				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle:	<b>Pegel / UT</b>	Datum der Messung:	<b>07/06/2007</b>
Messstellen - Nr.:	<b>Weissbrunnferner SX</b>	Beginn:	11:00
Gewässer:	<b>---</b>	Ende:	11:00
Betreiber:	<b>Unbekannt</b>		
Messtrupp:	<b>RD/ADL</b>		
Bemerkung:			

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.45 m
Hydraulischer Radius	R =	0.13 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.082 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.062 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	0.41 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	0.54 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.018

**Allgemeine Angaben**

Messart	Zweipunktmessung nach Kreps		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	rechten Ufer zum linken Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

<b>Eichgleichungs-Nr.:</b>	<b>W_Kit_05_C1_2874</b>	<b>Eichdatum:</b>	<b>11/01/2006</b>
<b>gültig bis:</b>		Resttiefe:	0.0 [cm]
<b>Flügelkörper-Nr.:</b>	<b>141682</b>	Befestigung:	Stange 9 mm
Hersteller:	OTT	FlügelkörperTyp:	Flügel
<b>Schaufel-Nr.:</b>	<b>3.137.956</b>	Schaufel Steigung:	0.25 [mm]
Hersteller:	OTT	Schaufel Durchmesser:	0.05 [mm]
<b>Zählgeräte-Nr.:</b>	<b>2</b>	Bezeichnung:	Z30
Hersteller:	OTT		

## Auswertungsprotokoll

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner DX** Datum der Messung: **13/06/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 14:00  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 14:00  
 Messtrupp: **RD/ADL**  
 Bemerkung: **sektion aktiviert**

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 14.0 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 14.0 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 14.0 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.150 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.00 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 15.0 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.233 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 0.542 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.271 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.859$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	0.30	0.0	14.0				
P	0.30	15.0	14.0			0.029	0.004
M	0.40	15.0	14.0	0.072	0.055	0.057	0.009
M	0.50	15.0	14.0	0.047	0.113	0.086	0.013
M	0.60	15.0	14.0	0.072	0.047	0.052	0.008
M	0.70	15.0	14.0	0.154	0.137	0.135	0.020
M	0.80	15.0	14.0	0.294	0.195	0.215	0.032
M	0.90	15.0	14.0	0.405	0.294	0.312	0.047
M	1.00	15.0	14.0	0.465	0.380	0.385	0.058
M	1.10	15.0	14.0	0.508	0.405	0.414	0.062
M	1.20	15.0	14.0	<b>0.542</b>	<b>0.474</b>	<b>0.468</b>	<b>0.070</b>
P	1.30	15.0	14.0			0.234	0.035
U	1.30	0.0	14.0				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle:	<b>Pegel / UT</b>	Datum der Messung:	<b>13/06/2007</b>
Messstellen - Nr.:	<b>Weissbrunnferner DX</b>	Beginn:	14:00
Gewässer:	<b>---</b>	Ende:	14:00
Betreiber:	<b>Unbekannt</b>		
Messtrupp:	<b>RD/ADL</b>		
Bemerkung:	sektion aktiviert		

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.30 m
Hydraulischer Radius	R =	0.12 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.061 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.044 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	0.57 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	0.79 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.037

**Allgemeine Angaben**

Messart	Zweipunktmessung nach Kreps		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	linken Ufer zum rechten Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

Eichgleichungs-Nr.:	<b>W_Kit_05_C1_2874</b>	Eichdatum:	<b>11/01/2006</b>
gültig bis:		Resttiefe:	0.0 [cm]
Flügelkörper-Nr.:	<b>141682</b>	Befestigung:	Stange 9 mm
Hersteller:	OTT	FlügelkörperTyp:	Flügel
Schaufel-Nr.:	<b>3.137.956</b>	Schaufel Steigung:	0.25 [mm]
Hersteller:	OTT	Schaufel Durchmesser:	0.05 [mm]
Zählgeräte-Nr.:	<b>2</b>	Bezeichnung:	Z30
Hersteller:	OTT		

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 07:15  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 07:15  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 22.2 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 21.5 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.092 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 22.5 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.215 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.03 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 20.9 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.430 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 0.884 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.431 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.997$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	1.13	0.0	21.5				
P	1.13	18.0	21.5			-0.066	-0.012
M	1.20	18.0	21.5	-0.113	-0.154	-0.133	-0.024
M	1.30	21.0	21.5	-0.096	-0.121	-0.107	-0.022
M	1.40	22.0	21.5	0.088	0.040	0.053	0.012
M	1.50	22.5	22.0	0.187	0.088	0.114	0.026
M	1.60	21.0	22.0	0.465	0.371	0.379	0.080
M	1.70	21.0	22.0	0.807	0.790	0.751	0.158
M	1.80	21.5	22.0	<b>0.884</b>	<b>1.002</b>	<b>0.909</b>	<b>0.195</b>
M	1.90	21.5	22.0	0.832	0.943	0.856	0.184
M	2.00	21.0	22.5	0.790	0.934	0.837	0.176
P	2.15	21.0	22.5			0.445	0.093
U	2.16	0.0	22.5				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 07:15  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 07:15  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.42 m
Hydraulischer Radius	R =	0.15 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.101 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.078 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	0.92 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	1.19 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.090

**Allgemeine Angaben**

Messart	Zweipunktmessung nach Kreps		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	rechten Ufer zum linken Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

Eichgleichungs-Nr.:	<b>W_Kit_05_C1_2874</b>	Eichdatum:	<b>11/01/2006</b>
gültig bis:		Resttiefe:	0.0 [cm]
Flügelkörper-Nr.:	<b>141682</b>	Befestigung:	Stange 9 mm
Hersteller:	OTT	FlügelkörperTyp:	Flügel
Schaufel-Nr.:	<b>3.137.956</b>	Schaufel Steigung:	0.25 [mm]
Hersteller:	OTT	Schaufel Durchmesser:	0.05 [mm]
Zählgeräte-Nr.:	<b>4</b>	Bezeichnung:	Z4
Hersteller:	SEBA		

## Auswertungsprotokoll

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 11:50  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 11:50  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 33.8 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 33.0 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.324 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 34.0 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.356 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.03 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 34.5 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.909 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 1.441 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.941 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.966$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	0.05	0.0	34.0				
P	0.08	35.0	34.0			0.814	0.285
M	0.20	34.0	34.0	1.424	<b>1.306</b>	<b>1.357</b>	0.461
M	0.30	35.0	34.0	<b>1.441</b>	1.298	1.346	<b>0.471</b>
M	0.40	35.0	34.0	1.365	1.205	1.301	0.455
M	0.50	35.5	34.0	1.315	1.070	1.174	0.417
M	0.60	36.0	34.0	1.163	1.129	1.134	0.408
M	0.70	36.0	33.5	0.951	0.909	0.892	0.321
M	0.80	36.0	33.0	0.696	0.499	0.607	0.219
M	0.90	34.0	33.0	0.431	0.195	0.307	0.104
M	1.00	34.5	33.0	0.040	0.187	0.154	0.053
P	1.08	34.0	33.0			0.077	0.026
U	1.08	0.0	33.0				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 11:50  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 11:50  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.69 m
Hydraulischer Radius	R =	0.21 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.214 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.180 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	1.51 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	1.80 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.244

**Allgemeine Angaben**

Messart	3-Punktmessung		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	rechten Ufer zum linken Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

Eichgleichungs-Nr.:	W_Kit_05_C1_2874	Eichdatum:	11/01/2006
gültig bis:		Resttiefe:	0.0 [cm]
Flügelkörper-Nr.:	141682	Befestigung:	Stange 9 mm
Hersteller:	OTT	FlügelkörperTyp:	Flügel
Schaufel-Nr.:	3.137.956	Schaufel Steigung:	0.25 [mm]
Hersteller:	OTT	Schaufel Durchmesser:	0.05 [mm]
Zählgeräte-Nr.:	2	Bezeichnung:	Z30
Hersteller:	OTT		

## Auswertungsprotokoll

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner DX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 09:30  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 09:30  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 20.0 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 20.0 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.116 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 20.0 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.250 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.01 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 24.7 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.463 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 0.739 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.499 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.927$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	0.05	0.0	20.0				
P	0.05	25.0	20.0			0.215	0.054
M	0.15	25.5	20.0	0.596	0.387	0.430	0.110
M	0.25	26.5	20.0	0.607	0.409	0.447	0.119
M	0.35	25.5	20.0	0.640	0.629	0.597	0.152
M	0.45	25.5	20.0	0.662	0.662	0.625	0.159
M	0.55	25.5	20.0	0.706	<b>0.739</b>	0.687	<b>0.175</b>
M	0.65	24.5	20.0	<b>0.739</b>	<b>0.739</b>	<b>0.698</b>	0.171
M	0.75	24.5	20.0	0.596	0.574	0.549	0.134
M	0.85	23.0	20.0	0.202	0.255	0.224	0.052
M	0.95	23.0	20.0	0.128	0.128	0.121	0.028
P	1.06	23.0	20.0			0.061	0.014
U	1.06	0.0	20.0				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner DX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 09:30  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 09:30  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.49 m
Hydraulischer Radius	R =	0.17 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.129 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.102 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	0.89 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	1.13 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.088

**Allgemeine Angaben**

Messart	Zweipunktmessung nach Kreps		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	rechten Ufer zum linken Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

Eichgleichungs-Nr.:	W_Kit_01_D1_28684	Eichdatum:	24/11/2005
gültig bis:		Resttiefe:	0.0 [cm]
Flügelkörper-Nr.:	314	Befestigung:	Stange 20 mm
Hersteller:	SEBA	FlügelkörperTyp:	Flügel
Schaufel-Nr.:	1.046.80	Schaufel Steigung:	0.30 [mm]
Hersteller:	SEBA	Schaufel Durchmesser:	0.08 [mm]
Zählgeräte-Nr.:	4	Bezeichnung:	Z4
Hersteller:	SEBA		

## Auswertungsprotokoll

Messstelle: **Pegel / UT**  
 Messstellen - Nr.: **Weissbrunnferner SX** Datum der Messung: **20/07/2007**  
 Gewässer: **---** Beginn: 11:50  
 Betreiber: **Unbekannt** Ende: 11:50  
 Messtrupp: **rd/adl**  
 Bemerkung:

**Mittlerer Wasserstand**  $W_m = 33.8 \text{ cm}$  Wasserstand: min = 33.0 cm  
**Durchfluss**  $Q = 0.324 \text{ m}^3/\text{s}$  Wasserstand: max = 34.0 cm

Durchflussquerschnitt  $A = 0.356 \text{ m}^2$   
 Wasserspiegelbreite  $b = 1.03 \text{ m}$   
 Mittlere Gerinnetiefe  $h_m = 34.5 \text{ cm}$   
 mittlere Fließgeschwindigkeit  $v_m = 0.909 \text{ m/s}$   
 maximale Oberflächengeschwindigkeit  $vo_{max} = 1.441 \text{ m/s}$   
 mittlere Oberflächengeschwindigkeit  $vo_m = 0.941 \text{ m/s}$   
 Verhältnis  $v_m / vo_m = 0.966$   
 Einzugsgebietsgröße  $A_E = 0.000 \text{ km}^2$

U/M/P	d [m]	h [cm]	W [cm]	vo [m/s]	vu [m/s]	vm [m/s]	fv [m <sup>2</sup> /s]
U	0.05	0.0	34.0				
P	0.08	35.0	34.0			0.814	0.285
M	0.20	34.0	34.0	1.424	<b>1.306</b>	<b>1.357</b>	0.461
M	0.30	35.0	34.0	<b>1.441</b>	1.298	1.346	<b>0.471</b>
M	0.40	35.0	34.0	1.365	1.205	1.301	0.455
M	0.50	35.5	34.0	1.315	1.070	1.174	0.417
M	0.60	36.0	34.0	1.163	1.129	1.134	0.408
M	0.70	36.0	33.5	0.951	0.909	0.892	0.321
M	0.80	36.0	33.0	0.696	0.499	0.607	0.219
M	0.90	34.0	33.0	0.431	0.195	0.307	0.104
M	1.00	34.5	33.0	0.040	0.187	0.154	0.053
P	1.08	34.0	33.0			0.077	0.026
U	1.08	0.0	33.0				

**Auswertungsprotokoll**

Messstelle:	<b>Pegel / UT</b>	Datum der Messung:	<b>20/07/2007</b>
Messstellen - Nr.:	<b>Weissbrunnferner SX</b>	Beginn:	11:50
Gewässer:	<b>---</b>	Ende:	11:50
Betreiber:	<b>Unbekannt</b>		
Messtrupp:	<b>rd/adl</b>		
Bemerkung:			

**Hydraulische Parameter:**

Benetzter Umfang	U =	1.69 m
Hydraulischer Radius	R =	0.21 m
Profilwert		
nach Rinsum:	P =	0.214 m <sup>5/2</sup>
nach Manning Strickler	P =	0.180 m <sup>8/3</sup>
Einfluss von Rauigkeit und Gefälle		
nach Rinsum:	Q/P =	1.51 m <sup>1/2</sup> /s
nach Manning Strickler	Q/P =	1.80 m <sup>1/3</sup> /s
Quadrat der Froudezahl:	F <sup>2</sup> =	0.244

**Allgemeine Angaben**

Messart	3-Punktmessung		
Berechnungsverfahren	Pegelvorschrift		
Methode für Einpunktmessungen	Gerade		
Methode für Zweipunktmessungen	Gerade		
Messrichtung vom	rechten Ufer zum linken Ufer		
Boden-/Wandrauhigkeitsfaktor:	50 %	Zeitvorgabe in Sekunden	30

**Messflügel und Zählgerät**

<b>Eichgleichungs-Nr.:</b>	<b>W_Kit_05_C1_2874</b>	<b>Eichdatum:</b>	<b>11/01/2006</b>
<b>gültig bis:</b>		Resttiefe:	0.0 [cm]
<b>Flügelkörper-Nr.:</b>	<b>141682</b>	Befestigung:	Stange 9 mm
Hersteller:	OTT	FlügelkörperTyp:	Flügel
<b>Schaufel-Nr.:</b>	<b>3.137.956</b>	Schaufel Steigung:	0.25 [mm]
Hersteller:	OTT	Schaufel Durchmesser:	0.05 [mm]
<b>Zählgeräte-Nr.:</b>	<b>2</b>	Bezeichnung:	Z30
Hersteller:	OTT		

## **ELENCO FIGURE**

## ELENCO DELLE FIGURE

- Fig. 1.1** Sezione verticale e pianta di un tipico apparato montano (Fonte: Valentini, 1985). p. 12
- Fig. 1.2** Distribuzione delle velocità superficiali di un ghiacciaio montano (Fonte: Andersen e Bjorns, 1994). p. 14
- Fig. 1.3** Profili longitudinali di un ghiacciaio che illustrano: la zona di accumulo e quella di ablazione; le linee di flusso; la velocità in diversi punti (Fonte: Hock & Goodfellow, 2005, ridisegnato). p. 16
- Fig. 2.1** Visione tridimensionale del bacino dove sorge il ghiacciaio di Fontana Bianca. In basso a sinistra è visibile un *rock glacier* (Fonte: Ufficio Geologico della Provincia Autonoma di Bolzano). p. 21
- Fig. 3.1** L'andamento tipico di bilancio di massa in un anno idrologico: in blu è rappresentato l'accumulo, in rosso l'ablazione. *b* rappresenta il bilancio di massa. p. 24
- Fig. 3.2** Il profilo verticale del bilancio di massa (VBP) e la posizione della linea di equilibrio (ELA). p. 27
- Fig. 3.3** Effetto di un incremento della quota della linea di equilibrio in un ghiacciaio vallivo (Fonte: Sugden e John, 1984, ridisegnato). p. 28
- Fig. 4.1** Distribuzione dei ghiacciai nel mondo (Fonte: IAHS, 1989). p. 32
- Fig. 4.2** – Distribuzione dei ghiacciai in Alto Adige. In rosso il gruppo dell'Ortles – Cevedale (Fonte: Prov. Aut. di Bolzano, 1997). p. 33
- Fig. 5.1** La forra a sinistra e i vigneti a terrazzamenti sulla destra. p. 34
- Fig. 6.1** Indicazioni principali della scheda del catasto del 1983 sul ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 43
- Fig. 6.2** Scheda del catasto 1997 relativa al ghiacciaio di Fontana Bianca (Fonte: Prov. Aut. Bolzano). p. 46

- Fig. 6.3** Detriti e rocce cadono sul ghiacciaio dall'incombente parete nord-est di Cima Sternai (20/07/07). p. 48
- Fig. 6.4** Rocce montonate nei pressi della stazione idrometrica in orografica sinistra. p. 48
- Fig. 6.5** Canale di ruscellamento in orografica sinistra il 20/07/07 (sinistra) e successiva formazione di una *bedier* evidenziata da una nevicata estiva il 24/08/07 (destra). p. 49
- Fig. 6.6** *Ice core rock glacier*. p. 60
- Fig. 6.7** Panoramica invernale del ghiacciaio di Fontana Bianca (10/05/07). p. 52
- Fig. 6.8** Panoramica estiva del ghiacciaio di Fontana Bianca (20/07/07). p. 52
- Fig. 6.9** Valori totali e specifici di accumulo, ablazione e bilancio per l'intero periodo (Fonte: Valentini, 1991). p. 54
- Fig. 8.1** Cima Sternai ed il pendio valanghivo (10/05/07). p. 59
- Fig. 8.2** I punti rossi rappresentano i sondaggi con indicata l'altezza della neve (h), mentre i due quadrati neri le trincee. p. 59
- Fig. 8.3** Trincea sul ghiacciaio di Fontana Bianca il 10/05/2007 (a sinistra) e il 13/05/2001 (a destra). p. 61
- Fig 8.4** La trincea e le operazioni di misura della densità della neve. p. 62
- Fig. 9.1** Le due stazioni idrometriche al momento della loro attivazione, il 7-05-2007. In alto la stazione idrometrica in orografica sinistra. p. 65
- Fig. 9.2** Mulinello idrometrico. p. 66
- Fig. 9.3** Palina sepolta dalla neve (sinistra) e fase di trasporto paline. p. 68
- Fig. 9.4** La trivella a vapore Heucke (Fonte: Kaser et al., 2003). p. 69

- Fig. 9.5** Fase di perforazione con la trivella a vapore Heucke. p. 70
- Fig. 9.6** Distribuzione delle paline sul ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 71
- Fig. 9.7** Il *reference* a sinistra e *rover* a destra. p. 74
- Fig. 9.8** La stazione idrometrica in orografica sinistra e relativa misura di portata (in alto); rimozione dei detriti e misura di portata nella stazione idrografica in orografica destra (24 agosto 2007). p. 75
- Fig. 9.9** La stazione idrometrica sinistra il 12 ottobre 2007. p. 77
- Fig. 9.10** La stazione idrometrica destra il 12 ottobre 2007. p. 77
- Fig. 10.1** Punti marcati con i GPS durante il rilievo del 24 agosto 2007. p. 81
- Fig. 10.2** Variazioni areali del ghiacciaio nel 1997, 2005 e 2007. p. 82
- Fig. 10.3** Tabella excel con i dati relativi ad alcuni sondaggi. p. 83
- Fig. 10.4** Particolare della lingua in orografica sinistra che mette in evidenza i punti di sondaggio con l'equivalente in acqua misurato. Il quadrato nero indica la posizione di una trincea. p. 84
- Fig. 10.5** Distribuzione dell'accumulo invernale nell'anno idrologico 2066 - 2007. p. 86
- Fig. 10.6** Il layer dell'equivalente in acqua (sinistra) e quello riportante la suddivisione altimetrica e orografica. p. 87
- Fig. 10.7** Il risultato dell'intersezione spaziale: la carta tematica del bilancio invernale diviso per orografia. p. 88
- Fig. 10.8** Tabella con tutti i dati di tutti i poligoni in orografica sinistra. p. 89
- Fig. 10.9** Le tabelle con i dati relativi all'orografica sinistra e destra del ghiacciaio. p. 89

- Fig. 10.10** Accumulo complessivo registrato sul ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 90
- Fig. 10.11** Ablazione delle paline nell'estate 2007. p. 91
- Fig. 10.12** Tabella delle misure delle paline nei rilievi 2006/2007. p. 92
- Fig. 10.13** Elenco delle paline ablatimetriche con i relativi valori di mm WE. p. 93
- Fig. 10.14** Elaborazione manuale delle zone di ablazione. p. 94
- Fig. 10.15** Distribuzione del bilancio di massa. p. 95
- Fig. 10.16** Bilancio di massa diviso per orografia. p. 96
- Fig. 10.17** Distribuzione dell'ablazione per fasce altitudinali sull'orografia sinistra, destra e sul ghiacciaio intero (in basso). p. 97
- Fig. 10.18** Analisi della distribuzione altimetrica dell'accumulo invernale (blu), del bilancio estivo (rosso) e del bilancio annuale (verde), in orografia sinistra, destra e sul ghiacciaio intero (in basso). p. 98
- Fig. 10.19** Livelli dei deflussi misurati nelle due stazioni idrometriche sul ghiacciaio di Fontana Bianca dal 7 giugno al 12 ottobre 2007. p. 101
- Fig. 10.20** In viola la curva di portata della stazione idrometrica destra e in blu quella sinistra. p. 102
- Fig. 10.21** Deflussi complessivi misurati alle stazioni idrometriche nell'estate 2007. I dati riportati risultano dalla somma delle portate misurate alle stazioni idrometriche in orografia sinistra e destra. p. 103
- Fig. 10.22** La stazione meteorologica sullo sperone al centro del ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 106
- Fig. 10.23** Temperatura e precipitazione cumulata misurate nell'anno idrologico 2006/07 alla stazione di Fontana Bianca confrontate con le medie del periodo. p. 106

- Fig. 11.1** I punti di misura effettuati con il georadar e le relative profondità determinate espresse in metri (Fonte: Kaser, 1995, ridisegnato). p. 109
- Fig. 11.2** Profilo longitudinale A sulla lingua glaciale sinistra (Fonte: Kaser, 2001; ridisegnato). p. 110
- Fig. 11.3** Variazioni volumetriche sul ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 110
- Fig. 12.1** Variazione di superficie glaciale nei principali gruppi montuosi dell'Alto Adige. (Fonte: AA 1997, ridisegnato). p. 112
- Fig. 12.2** Posizione della ELA<sub>0</sub> per gruppo montuoso in Alto Adige e tabella correlata (Fonte: AA 1997, rielaborato). p. 113
- Fig. 13.1** Distribuzione altimetrica della superficie del ghiacciaio e relativa posizione della ELA<sub>0</sub> nel 1997 (rosso) e 2007 (blu). p. 116
- Fig. 14.1** Evoluzione temporale di bilancio invernale, estivo e di massa (mm WE) dal 1983/84 al 2006/07. p. 118
- Fig. 14.2** Serie di bilanci di massa dall'anno 1991/92 al 2006/07. p. 119
- Fig. 14.3** Serie cumulata di bilanci di massa dal 1983/84 al 2006/07. p. 120
- Fig. 14.4** Relazione tra la linea di equilibrio ed il bilancio specifico. p. 121
- Fig. 14.5** Relazione tra il rapporto di accumulo sull'area totale del ghiacciaio ed il bilancio specifico. p. 122
- Fig. 15.1** Valori riassuntivi del bilancio di massa; la media del bilancio specifico annuale di 30 ghiacciai nel periodo 2000-2003 confrontati con la media delle medie annuali degli ultimi 20 anni ed i valori specifici per il 2002 ed il 2003 (WGMS, 2005). p. 124
- Fig. 15.2** Valori riassuntivi del bilancio di massa per il ghiacciaio di Fontana Bianca. p. 125

**Fig. 15.3** Valori riassuntivi del bilancio di massa; la media del bilancio specifico annuale di 30 ghiacciai nel periodo 2001-2006 (Fonte: www.wgms.ch). p. 126

**Fig. 15.4** Valori medi di bilancio specifico di massa annuale per i ghiacciai monitorati dal WGMS (sopra) con quelli registrati per il ghiacciaio di Fontana Bianca (sotto). p. 126

**Fig. 15.5** La media dei bilanci specifici annuali dal 1980 al 2006 (Fonte: www.wgms.ch). p. 127

**Fig. 15.6** La media cumulata dei bilanci specifici annuali dal 1980 al 2006 (Fonte: www.wgms.ch). p. 127

**Fig. 15.7** I 30 ghiacciai suddivisi in 9 regioni montane con una serie di dati dal 1980 (Fonte: www.wgms.ch). p. 128

**Fig. 15.8** Bilanci di massa dei ghiacciai italiani che vengono pubblicati sul GMBB (Fonte: www.wgms.ch). p. 129

**Fig. 15.9** Cambiamenti osservati di a) temperatura media globale alla superficie, (b) livello del mare medio globale da mareografi (blu) e da dati da satellite (rosso) e (c) copertura nevosa dell'emisfero Nord fra Marzo e Aprile. Tutti i cambiamenti sono relativi alle corrispondenti medie per il periodo 1961-1990. Le curve smussate rappresentano i valori medi decennali mentre i cerchi mostrano i valori annuali. Le aree ombreggiate sono gli intervalli di incertezza stimati attraverso un'analisi dettagliata delle incertezze conosciute (a e b) e in base alle serie temporali (c) (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 134

**Fig. 15.10** Tassi di innalzamento del livello del mare osservati e stime dei contributi di diverse cause (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 135

**Fig. 15.11** Le linee spesse sono le medie globali di più modelli del riscaldamento della superficie (rispetto al periodo 1980-1999) per gli scenari A2, A1B e B1, mostrati come la continuazione delle simulazioni per il XX secolo. Le aree ombreggiate indicano l'intervallo di più o meno una deviazione standard delle medie annuali di ogni singolo modello. La linea arancione si riferisce all'esperimento in cui le concentrazioni sono mantenute costanti ai valori dell'anno 2000. Le barre grigie a destra indicano la miglior stima (linea solida all'interno di ciascuna barra) e l'intervallo di probabilità valutato per i sei scenari di riferimento SRES. La valutazione della miglior stima e dell'intervallo di

probabilità nelle barre grigie include sia gli AOGCM (modelli di Circolazione Generale Oceano-Atmosfera) della parte sinistra della figura, sia i risultati provenienti da una gerarchia di modelli indipendenti e da vincoli osservativi (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 139

**Fig. 15.12** Serie temporali del livello medio globale del mare (deviazione dalla media dal 1980 al 1999) nel passato e come proiezione futura. Prima del 1970 non ci sono dati disponibili. La banda grigia mostra l'incertezza nella stima delle variazioni del livello del mare a lungo termine. La linea rossa è una ricostruzione del livello medio globale del mare dalle oscillazioni delle maree, e la banda rossa indica il campo di variazione. La linea verde rappresenta il livello medio globale del mare ripreso dal satellite. La banda blu rappresenta l'intervallo di valori previsti dal modello di proiezione (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 140

**Fig. 15.13** Variazioni di lunghezza sulle lingue glaciali a larga scala (Oerlemans, 2005). I ghiacciai sono raggruppati secondo le seguenti classi regionali: SH (tropici, Nuova Zelanda, Patagonia), America nord-occidentale (Canadian Rockies), Atlantico (sud della Groenlandia, Islanda, Jan Mayen, isole Svalbard, Scandinavia), Alpi europee e Asia (Caucaso e Asia centrale) (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 141

**Fig. 15.14** Media cumulata dei bilanci di massa specifici (a) e totale cumulato dei bilanci di massa (b) dei ghiacciai e delle calotte glaciali, calcolate per grandi regioni (Dyrgerov e Meier, 2005). La media dei bilanci di massa specifici mostra la forza dei cambiamenti climatici nelle rispettive regioni. Il bilancio di massa totale è espresso come contributo di ciascuna regione all'incremento del livello del mare (Fonte: IPCC 2007, WG1-AR4). p. 142

## **BIBLIOGRAFIA**

## BIBLIOGRAFIA

ANDERSEN B., BJORNS H.W., *The Ice Age World*, Scandinavian University Press, Oslo, 1994.

ARTONI C., *Ghiacciai e valli dell'Ortles-Cevedale*, Manfrini editore, Trento, 1984.

BACHMANN R.C., *Ghiacciai delle Alpi*, Zanichelli, Bologna, 1980.

BALLESTRA G., BERTOZZI R., BUSCAROLI A., GHERARDI M., VIANELLO G., *Applicazione dei Sistemi Informativi Geografici nella valutazione delle modificazioni ambientali e territoriali*, Ricerche avanzate per innovazioni nel sistema agricolo, Franco Angeli, Milano, 1996.

BELLONI S., CATASTA G., SMIRAGLIA C., *Parametri climatici e variazioni glaciali nel periodo 1950 – 1982*, in “Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, “Atti del V Convegno Glaciologico Italiano”, Bolzano – Val Martello, 30 settembre – 2 ottobre 1983., vol. 8, pp. 97-123, 1985, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1986.

BONAPACE U., *Il mondo alpino*, in “Paesaggi Umani – Capire l'Italia”, Touring Club Italiano, pp. 14-51, Milano, 1977.

BUSCAINI G., *Ortles-Cevedale, Parco Nazionale dello Stelvio*, Guida ai Monti d'Italia, Club Alpino Italiano, Touring Club Italiano, Milano, 1984.

CAGNATI A., *Strumenti di misura e metodi di osservazione nivometeorologici*, AINEVA, Trento, 2005.

CAZORZI F., DALLA FONTANA G., CARTURAN L., *Esperienze di monitoraggio e simulazione della risorsa idrica nivoglaciale*, in “Atti del Seminario conclusivo: La risorsa idrica nivoglaciale nel bacino del fiume Po, Saint-Vincent (Valle d'Aosta), 3 ottobre 2006.

CASTIGLIONI G.B., *Geomorfologia*, UTET, Torino, 1979.

- CHIOZZOTTO B., GIADA M., ROSSI G.C., *Impiego del sistema GPS in modalità RTK (Real Time Kinematic) per la determinazione delle variazioni volumetriche del ghiacciaio del Caresèr*, in “Archivio del Comitato Glaciologico Italiano: Bilanci di massa dei ghiacciai italiani, esperienze e confronti”, vol. 4, pp. 17-22, Torino, 2001.
- CINA A., *GPS, Principi, modalità e tecniche di posizionamento*, Celid, Torino, 2000.
- CITRINI D., NOSEDA G., *Idraulica*, ed. Ambrosiano, Milano, 2000.
- COLBECK S., AKITAYA E., ARMOSTRONG R., GUBLER H., LAFEUILLE J., LIED K., MCCLUNG D. AND MORRIS E., *International Classification for Seasonal Snow on the Ground. International Commission for Snow and Ice (IAHS)*, World Data Center A for Glaciology, U. of Colorado, Boulder, CO, USA, 23 pp., 1990.
- CORTI G. *I ghiacciai del Ticino*, in “Dati - statistiche e società”, Ustat, n°2, Repubblica e Canton Ticino, 2006.
- CUCCAGNA A., *Appunti sulla difesa contro le valanghe nelle Alpi*, in “Atti del XVI Congresso geografico Italiano”, Padova - Venezia, 20-25 aprile 1954.
- D’AGATA C., SMIRAGLIA C., DIOLAIUTI G.A., *Elaborazione di cartografia tematica tramite GIS per la conoscenza e la valorizzazione di una risorsa ambientale: i ghiacciai alpini*, in “Geostorie”, vol. 10, pagg. 65-68, Centro Studi Storico Geografici, Roma, 2002.
- DAGRADI P., *Introduzione alla geografia umana*, II edizione, Patron Editore, Bologna, 1982.
- DELLA MAGGIORE R., PEROTTE E., FRESCO R., MAMMINI U., *L’approccio GIS multidisciplinare a supporto di indagini ambientali*, in “Atti della VI Conferenza Nazionale ASITA”, Volume II, 5-8 ottobre, Perugia, 2002.

- DESIO A., *I ghiacciai del gruppo Ortles-Cevedale (Alpi Centrali), Testo e Tavole*, Consiglio Nazionale delle Ricerche - Comitato Glaciologico Italiano, Tamburini editore, Milano, 1967.
- DIOLAIUTI G., *La recente riduzione dei ghiacciai lombardi: i risultati degli ultimi bilanci di massa*, in “Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, supplemento V, atti dell’VIII Convegno Glaciologico Italiano, 9-12 settembre 1999, Bormio, pp. 65-68, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 2001.
- DIOLAIUTI G., CASATI D., D’AGATA C., STELLA G., *Utilizzo GPS e GIS per ridurre l’errore nel calcolo del bilancio di massa glaciale: l’esempio del ghiacciaio della Sforzellina (Alta Valtellina, Alpi Lombarde)*, in “Archivio del Comitato Glaciologico Italiano: Bilanci di massa dei ghiacciai italiani, esperienze e confronti”, vol. 4, pp. 23-26, Torino, 2001.
- DI SCLAFANI N., *Utilizzo del GPS e della rete provinciale di stazioni di riferimento*, documento interno dell’Ufficio per il Rilevamento Geodetico, Provincia Autonoma di Bolzano, 2007.
- DYURGEROV M., *Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle*, in “Journal of Hydrology”, 282 (NOS. 1-4), pp. 164-176, 2003.
- DYURGEROV M., MEIER M.F., *Glaciers and the Changing Earth System: A 2004 Snapshot*, Occasional Paper 58, Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado, Boulder, CO, 118 pp, 2005.
- EDER K., RENTSCH H., *Photogrammetrische Interpretation und Erfassung der Gletschergrenzen für das Gletscherinventar der Autonomen Provinz Bozen – Südtirol. – München*, 2002.
- FIERZ C., RIBER P., ADAMS E.E., CURRAN A.R., FÖHN P.M.B., LEHNING M., PLÜSS C., *Evaluation of snow-surface energy balance models in alpine terrain*, in “Journal of Hydrology”, 282 (NOS. 1-4), pp. 77-94, 2003.

- FOUNTAIN A., VECCHIA A., *How many stakes are required to measure the mass balance of a glacier?*, in "Geografiska Annaler", 81 A (4), pp. 570-5571, 1999.
- FUNK M., MORELLI R., STAHEL W., *Mass balance of Gries gletscher 1961-1994: different methods of determination*, in "Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie", 33 (1), pp. 41-55, 1997.
- GIADA M., ZANON G., *Modificazioni volumetriche sul Ghiacciaio del Caresèr (Alpi Centrali, Gruppo Ortles-Cevedale) tra il 1967 e il 1980*, in "Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria", vol. 8, pp. 10-13, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1985.
- GUDMUNDSSON G.H., BAUDER A., *Towards an indirect determination of the mass-balance distribution of glacier using the kinematic boundary condition*, in "Geografiska Annaler", 81 A (4), pp. 575-583, 1999.
- HAEBERLI W., *Glacier fluctuations and climate change detection*, in "Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria", v. 18, p. 191-199, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1996.
- HOCK R., GOODFELLOW B., *Compendium Glaciology*, Department of Physical Geography and Quaternary Geology, Stockholm University, 2005.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO, *World glacier inventory*, (Haeberli W., Bösch H., Scherler K., Østrem G., Wallen C.C.), Nairobi, 1989.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO, *Glacier mass balance bulletin no. 1* (Haeberli W. and Herren E., eds.), World Glacier Monitoring Service, ETH Zurich, 1991.
- IAHS(ICSU)-UNEP-UNESCO, *Fluctuations of glaciers 1990-1995 Vol. V*, (Haeberli W., Hoelzle M., Suter S., Frauenfelder R.), Paris, 1998.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO/WMO, *Glacier Mass Balance Bulletin No. 7* (Haeberli W., Frauenfelder R., Hoelzle M. and Zemp, M., eds.). World Glacier Monitoring Service, Zurich, 87 pp., 2003.

- IPCC, *Climate Change 2001 - the scientific basis*, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 2001.
- IPCC, *Summary for Policymakers*, in “Climate Change 2007: The Physical Science Basis”, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (eds.)), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- IUGG(CCS)/UNEP/UNESCO/WMO, *Glacier Mass Balance Bulletin No. 8* (Haeberli W., Noetzli J., Zemp M., Baumann S., Frauenfelder R. and Hoelzle M., eds.). World Glacier Monitoring Service, Zurich, 100pp., 2005.
- JANSSON P., HOCK R., SCHNEIDER T., *The concept of glacier storage: a review*, in “Journal of Hydrology”, 282 (NOS. 1-4), pp. 116-129, 2003.
- KASER G., FOUNTAIN A., JANSSON P., *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers*, IHP-IV, Technical Document in Hydrology, n°59, UNESCO, Paris, 2003.
- KASER G., JUEN I., GEORGES C., GOMEZ J., TAMAYO W., *The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Perù*, in “Journal of Hydrology”, 282 (NOS. 1-4), pp. 132-144, 2003.
- KASER G., MUNARI M., NOGGLER B., OBERSCHIEMD C., VALENTINI P., *Ricerche sul bilancio di massa del ghiacciaio di Fontana Bianca (Weissbrunnferner) nel gruppo Ortles-Cevedale*, in “Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, vol. 18, pp. 277-280, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1995.

- KASER G., ZINGERLE C., OBERSCHIEMD C., MUNARI M., *An exceptionally negative mass-balance of a small alpine glacier*, in “Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, supplemento V, atti dell’VIII Convegno Glaciologico Italiano, 9-12 settembre 1999, Bormio, pp. 65-68, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 2001.
- KUHN M., *Redistribution of snow and glacier mass balance from a hydrometeorological model*, in “Journal of Hydrology”, 282 (NOS. 1-4), pp. 95-103, 2003.
- LEICA GEOSYSTEM S.p.A., *Il sistema GPS, applicazioni e sviluppi nel rilievo del territorio*, Maggioli editore, 2003.
- LEMKE P., REN J., ALLEY R.B., ALLISON I., CARRASCO J., FLATO G., FUJII Y., KASER G., MOTE P., THOMAS R.H., ZHANG T., *2007 Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground*, in “Climate Change 2007: The Physical Science Basis”, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- LUZI G., PIERACCINI M., MECATTI D., NOFERINI L., MACALUSO G., ATZENI C., *Impiego di un Interferometro SAR da terra per la stima dell’equivalente in acqua della neve (Swe): risultati di una campagna sperimentale condotta in una zona alpina del Tirolo*, in “Atti XIII Riunione annuale CETEM & IV Workshop A.I.T: il Telerilevamento a Microonde”, Milano, 9-10 novembre 2006.
- MAIER M.F., *Contribution of small glaciers to global sea level*, in “Science”, 226 (4681), pp. 1418-1421, 1984.
- MEIER, M.F., BAHR, D.B., *Counting glaciers: use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world*, in “Colbeck, S.C. (Hrsg.), Glaciers, ice sheets and volcanoes: a tribute to Mark F. Meier” - CRREL Special Report 96 (27), 89-94, 1996.
- MC CLUNG D., SCHAERER P., *Manuale delle valanghe*, Zanichelli, Bologna, 1996.

- MERLI F., PAVAN M., ROSSI G.C., SMIRAGLIA C., TAMBURINI., UBIALI G., *Variazioni di spessore e di volume della lingua del ghiacciaio dei Forni (Alpi centrali, gruppo Ortles-Cevedale) nel XX secolo. Risultati e confronti di metodologie*, in “Supplementi di Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, supplemento V, atti dell’VIII Convegno Glaciologico Italiano, 9-12 settembre 1999, Bormio, pp. 65-68, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 2001.
- MOTTA M., *La misura dell’ablazione nel bilancio di massa del ghiacciaio del Lys (M. Rosa, Valle d’Aosta)*, in “Archivio del Comitato Glaciologico Italiano: Bilanci di massa dei ghiacciai italiani, esperienze e confronti”, vol. 4, pp. 61-74, Torino, 2001.
- MUNARI M. DINALE R., *Hydro 001 – Misure di portata*, documento interno dell’Ufficio Idrografico, Provincia Autonoma di Bolzano, 2005.
- ØSTREM G., BRUGMAN M., *Glacier mass-balance measurement - a manual for field and office work*, in “Technical report, National Hydrology Research Institute”, Science Report N.º 4, 1991.
- OERLEMANS J., *Extracting a climate signal from 169 glacier records*, in *Science*, 308, pp. 675-677, 2005.
- PAUL F., *Combined technologies allow rapid analysis of glacier changes*, in “Eos Trans. American Geophysical Union”, 83(23), pp. 253, 260, 261, 2002.
- PICHOT C., VINCENT C., *Glaciology : another field of application of GPS*, in “Geodetical Info Magazine”, Case study 1, pp. 19-24, 1991.
- RAPETTI F., VITTORINI S., *Aspetti del clima del bacino del Gesso (Alpi Marittime) in relazione alla presenza di alcuni piccoli ghiacciai*, in “Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, Atti del “VI Convegno Glaciologico Italiano”, Gressoney, 26-28 settembre 1991., vol. 15, pp. 149-158, 1992, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1993.

- ROSSI G., *Considerazioni sul bilancio idrologico dei ghiacciai*, in “Archivio del Comitato Glaciologico Italiano: Bilanci di massa dei ghiacciai italiani, esperienze e confronti”, vol. 4, pp. 83-88, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 2001.
- ROSSI G.C., FRANCHI G., MUNARI M., DINALE R., *I ghiacciai della val Ridanna*, in “Neve e valanghe”, n 53, pp. 46-59, Alcione srl, Trento, 2004.
- ROOTS E.F., GLEN J.W., *Hydrological aspects of Alpine and high mountain areas*, in: “Proceeding of the Exeter Symposium”, International Association of Hydrological Sciences 138, V-VI, July 1982.
- SALANDIN A., *Modellazione numerica dei processi di fusione nivale per la stima dell'equivalente in acqua*, in “Atti del Seminario conclusivo: La risorsa idrica nivo-glaciale nel bacino del fiume Po, Saint-Vincent (Valle d'Aosta), 3 ottobre 2006.
- SCHWITTER M.P., RAYMOND C.F., *Changes in the longitudinal profiles of glaciers during advance and retreat*, in “Journal of Glaciology”, 39 (133), pp. 582-590, 1993.
- SECCHIERI F., VALENTINI P., *I ghiacciai della Val d'Ultimo (gruppo Ortles-Cevedale) ed il loro contributo agli apporti idrici dei sottostanti bacini*, in “Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, “Atti del VI Convegno Glaciologico Italiano”, Gressoney, 26-28 settembre 1991., vol. 15, pp. 171-176, 1992, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1993.
- SMIRAGLIA C., *Guida ai ghiacciai e alla glaciologia. Forme, fluttuazioni, ambienti*, Zanichelli, Bologna, 1992.
- SMIRAGLIA C., *Sviluppi recenti e prospettive della ricerca glaciologica in Italia*, in “Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria”, “Atti del VI Convegno Glaciologico Italiano”, Gressoney, 26-28 settembre 1991, vol. 15, pp. 189-194, 1992, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1993.
- STRAHLER A.N., *Geografia Fisica*, Piccin, Padova, 1984.

- VALENTINI P., *Il ghiacciaio, riserva della natura - funzione e tutela*, Assessorato per la tutela dell'ambiente, Provincia Autonoma di Bolzano, Bolzano, 1985.
- VALENTINI P., *Il catasto dei ghiacciai della Provincia di Bolzano*, in "Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria", "Atti del V Convegno Glaciologico Italiano", Bolzano – Val Martello, 30 settembre – 2 ottobre 1983., vol. 8, pp. 182-195, 1985, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1986.
- VERBUNT M., GURTZ J., JASPER K., LANG H., WANDERDAM P., ZAPPA M., *The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling*, in "Journal of Hydrology", 282 (NOS. 1-4), pp. 36-55, 2003.
- WILLIAMS R.S.JR., HALL D.K., *Glaciers*, in "Atlas of satellite observations related to global change" [Gurey R.J., Foster J.L., Parkinson C.L. (Hrsg.)], - Cambridge University Press, pp. 401-421, 1993.
- ZANON G., *L'attuale tendenza evolutiva dei ghiacciai delle alpi italiane*, in "Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria", "Atti del V Convegno Glaciologico Italiano", Bolzano – Val Martello, 30 settembre – 2 ottobre 1983., vol. 8, pp. 89-96, 1985, Comitato Glaciologico Italiano, Torino, 1986.

**FONTI INTERNET CONSULTATE**

<http://www.geo.unizh.ch/wgms/index.html>

<http://www.ipcc.ch/index.htm>

<http://www.aineva.it>

<http://www.disat.unimib.it/comigliacio/membri.htm>

<http://www.iugg.org/>

<http://www.cig.ensmp.fr/~iahs/>

<http://www.cryosphericsscience.org/>

<http://www.usgs.gov/>

<http://www.eea.europa.eu/>

<http://www.cmcc.it/web/public/IPCC-Italia>