

Sintesi della tesi di laurea magistrale di

**Sara Gambelli**

**CONTRIBUTO AL CALCOLO DEL BILANCIO ENERGETICO SUPERFICIALE  
DISTRIBUITO ALLA SUPERFICIE DEL GHIACCIAIO DEI FORNI,  
VALTELLINA (GRUPPO ORTLES-CEVEDALE)**

**Università degli studi di Milano - Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali  
Corso di laurea magistrale in Scienze della Natura  
Curriculum: Analisi e gestione degli ambienti naturali  
A.A. 2009/2010**

**Relatore: Dott.ssa Guglielmina DIOLAIUTI - Correlatori: Dott.ssa Antonella SENESE - Dott.  
Carlo D'AGATA - Prof. Claudio SMIRAGLIA**

## **INTRODUZIONE**

Scopo di questo lavoro di tesi è stato quello di contribuire al calcolo del bilancio energetico distribuito all'intera superficie di un ghiacciaio alpino, in questo caso il Ghiacciaio dei Forni, il più grande apparato vallivo italiano, situato in Alta Valtellina nel gruppo Ortles-Cevedale (Parco Nazionale dello Stelvio). L'energia disponibile sulla superficie di un ghiacciaio non viene ridistribuita, ma utilizzata per la fusione della neve e/o del ghiaccio, perciò il bilancio energetico superficiale permette di calcolare il tasso di ablazione e quindi di conoscere la massa persa alla fine di un anno idrologico (sulle Alpi va da inizio ottobre a fine settembre).

Nel 2005 è stata installata la prima stazione meteorologica automatica permanente (*Automatic Weather Station* o AWS) sulla superficie di ablazione del Ghiacciaio dei Forni, alla quota ellissoidica di 2669 m (WGS84).

I dati raccolti da questa stazione (AWS1 Forni) sono stati utilizzati per la validazione delle analisi effettuate, mentre queste ultime sono state compiute a partire dai dati raccolti nell'estate meteorologica 2009 (1giugno–31agosto) dalla stazione meteorologica automatica di proprietà ARPA Lombardia, localizzata a S. Caterina Valfurva, a 1768 m di altitudine (quota ellissoidica WGS84).

Questa stazione, essendo localizzata nelle vicinanze del ghiacciaio, ma non direttamente sulla superficie glaciale, fornisce dati che permettono di descrivere il microclima di un'area alpina non influenzato dal *boundary layer* del ghiacciaio (inteso come strato limite atmosferico, esteso verticalmente per pochi metri, posto direttamente sopra la superficie terrestre). La superficie di un ghiacciaio, infatti, è un ambiente assai particolare, con caratteristiche peculiari che lo differenziano dall'ambiente circostante, ma pur sempre in stretta relazione con il clima e le sue variazioni (Oerlemans, 2005a).

I parametri meteorologici presi in considerazione in questo studio sono stati i valori di temperatura dell'aria e di radiazione solare globale (*incoming shortwave* o SWin).

## **DATI TOPOGRAFICI**

È stato necessario all'inizio delimitare il perimetro del Ghiacciaio dei Forni, tramite digitalizzazione manuale, grazie al software ArcMap 9.2, partendo dalle ortofoto del 2007 (Volo Italia 2007, CGR). Successivamente è stata estratta dal DEM (*Digital Elevation Model*) del 2007 di tutta la Lombardia, con griglia di 20 m x 20 m, una tabella con le coordinate e la quota di ogni punto, per un totale di 27'850 punti, utilizzata poi come dato di partenza in Excel per estendere il calcolo dei parametri meteorologici in esame ad ogni punto della superficie del ghiacciaio.

In Excel è stata successivamente calcolata la distribuzione dei punti del ghiacciaio per fasce altitudinali, rappresentata poi in percentuale mediante un grafico a istogramma da cui emerge che la

maggior parte dei punti ricade nella fascia altitudinale compresa tra i 3200 m e i 3300 m. Come ulteriore rappresentazione è stata prodotta in ArcMap una carta del Ghiacciaio dei Forni suddiviso in fasce altitudinali.

## DATI TERMICI E RADIATIVI

Dai valori orari di temperatura e radiazione registrati dalla AWS di S. Caterina si è calcolata sia la temperatura che la SWin orarie per ogni punto del ghiacciaio, successivamente mediate a livello giornaliero, settimanale e mensile.

La temperatura è stata spazializzata attraverso il *lapse rate* (o gradiente termico altitudinale) calcolato fra la AWS di S. Caterina e la AWS1 Forni.

Partendo dalla formula del *lapse rate* si ricava quella per ottenere la temperatura di ogni punto in funzione della quota:

$$T_{\text{punto}} = \Gamma * \Delta h + T_{S,\text{Cat}} \quad (1)$$

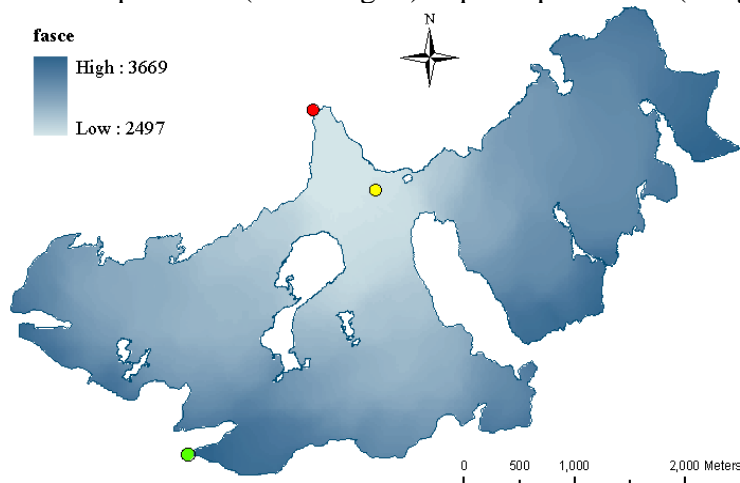
dove  $\Delta h$  indica la differenza di quota tra ogni punto e la stazione di S. Caterina Valfurva e  $\Gamma$  indica il *lapse rate*.

Per il calcolo della SWin invece, è stato necessario prima ottimizzare un parametro presente nella formula proposta da Oerlemans (2001) e successivamente modificata da Mihalcea *et al.* (2008), grazie al confronto con i dati misurati dalla AWS1 Forni. Per il Ghiacciaio dei Forni il valore adatto è risultato essere 1.025 e di conseguenza, la formula che è stata utilizzata per la spazializzazione della SWin sul Ghiacciaio dei Forni è la seguente :

$$SW_{\text{in}} = SW_{\text{in S.Cat}} * [1.025 + (2.4 * 10^{-5} * \Delta h)] \quad (2)$$

dove  $\Delta h$  è la differenza di quota tra ogni singolo punto del ghiacciaio e la AWS S.Cat.

Osservando i dati di temperatura dell'aria di ogni punto per tutto il periodo, il valore minore è raggiunto nei pressi della cima del S. Matteo (3669 m) il 22 giugno alle 20:00 (pari a  $-11.94^{\circ}\text{C}$ ) e il valore massimo alla fronte del ghiacciaio (2497 m) il 23 luglio alle 14:00 (pari a  $+16.10^{\circ}\text{C}$ ), con relativa escursione termica ( $T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$ ) pari a  $28.04^{\circ}\text{C}$  (Fig. 1). È stata determinata anche la settimana più calda (20-26 luglio) e quella più fredda (1-7 giugno).

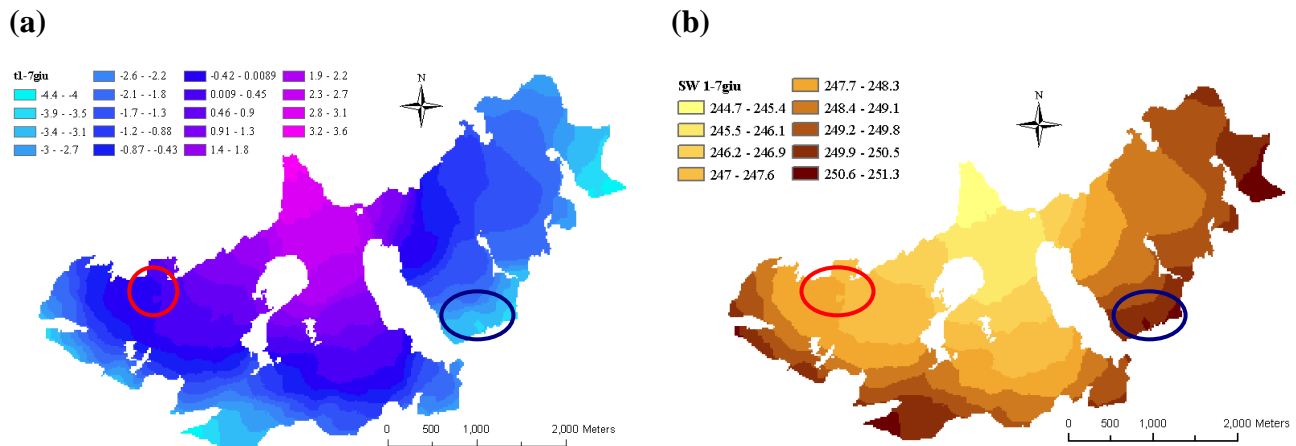


**Figura 1: Carta del Ghiacciaio dei Forni dove il punto giallo rappresenta la AWS1 Forni, il punto rosso è quello dove si è registrata la massima temperatura di tutta l'estate 2009 e quello verde corrisponde al punto con temperatura minima.**

Si sono poi create in ArcMap mappe relative alla spazializzazione di temperatura ed SWin per ogni settimana e per ogni mese, per un totale di 13 carte settimanali e 3 mensili per parametro, evidenziando come l'andamento di entrambi i parametri rispecchi quello delle fasce altitudinali. Inoltre, è stata notata una piccola isola di calore caratterizzata anche da minor radiazione presente in alcune settimane nel bacino occidentale, all'incirca sotto la cima S. Giacomo, dovuta ad una piccola valle, e una piccola isola più fredda con maggior insolazione rispetto ai punti attorno, nel bacino orientale, tra Punta Taviela e la Cima di Pejo, dovuta ad un piccolo promontorio (Fig. 2).

Tramite i valori della SWin sono state successivamente identificate giornate di cielo sereno (*clear sky conditions*) e giornate con intensa copertura nuvolosa, realizzando grafici esemplificativi.

Osservando i dati giornalieri di SWin calcolati per ogni punto del ghiacciaio, la radiazione presenta un valore massimo di  $406.97 \text{ W m}^{-2}$  il 13 giugno e un valore minimo, pari a  $28.51 \text{ W m}^{-2}$  il 6 giugno, mentre a livello settimanale il maggior valore di radiazione solare entrante, pari a  $327.11 \text{ W m}^{-2}$ , risulta nella settimana dal 20 al 26 luglio, e infine in quella dal 22 al 28 giugno si verifica il minor ammontare di SWin ( $207.78 \text{ W m}^{-2}$ ).

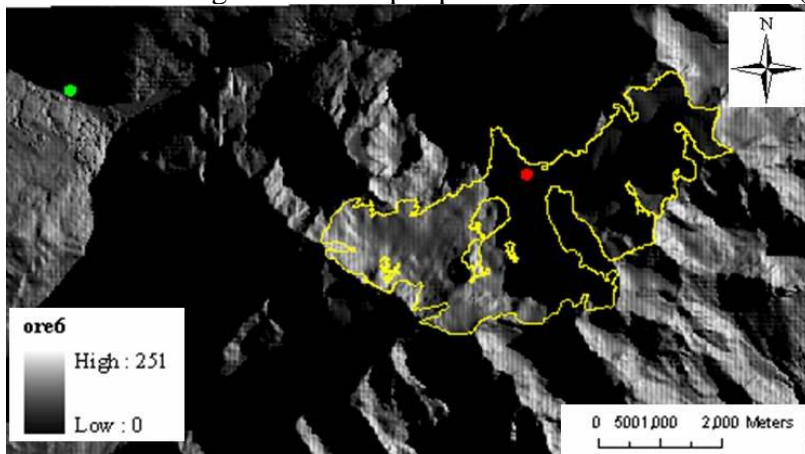


**Figura 2: Esempio di carte rappresentanti la distribuzione della temperatura (a) e della SWin (b) settimanali sul Ghiacciaio dei Forni. Cerchiata in rosso l'isola di calore e in blu l'isola più fredda.**

## SHADING

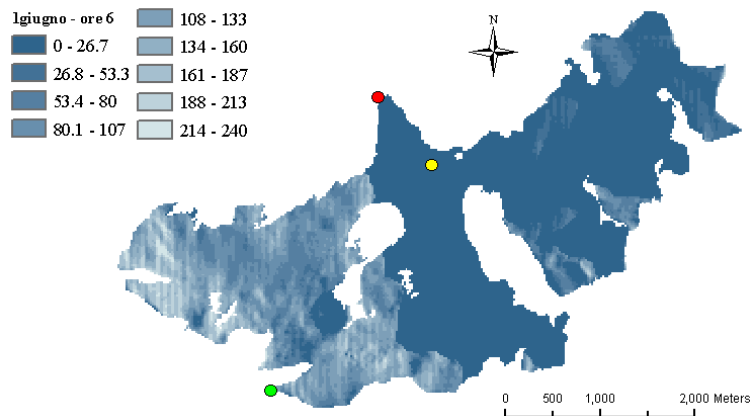
Per estendere il calcolo della radiazione è importante tenere conto anche del possibile effetto dello *shading*, o ombreggiamento, su ogni pixel, fattore che, insieme alla copertura nuvolosa, o *cloudiness*, riduce enormemente la quantità di energia solare percepita dalla superficie di un ghiacciaio.

Quindi, per quattro date indicative del periodo di studio, cioè 1 giugno, 1 luglio, 1 agosto e 31 agosto 2009, si sono realizzate in ArcMap carte dell'ombra ad intervallo orario, dall'alba al tramonto. Dalla tabella degli attributi di queste carte è stato ricavato il numero di pixel in ombra (cioè con value = 0), da cui si è potuta calcolare la percentuale di ghiacciaio illuminata (mediamente il 33% alle 6:00 di mattina e praticamente il 100% a mezzogiorno) e in ombra, così da verificare la situazione con i dati di SWin della AWS1 Forni. Il fatto che questi dati vadano dalle ore 6:00 alle 20:00 trova conferma nella carta dello *shading* (Fig. 3): alle ore 6:00 infatti la AWS1 Forni non è ancora in piena luce, ma sta per essere illuminata e il valore di SWin registrato dalla stazione (pari a soli  $37.30 \text{ W m}^{-2}$  per il 1 giugno) può essere dovuto al fenomeno della diffusione che i raggi solari subiscono attraversando l'atmosfera. Infine, essendo il Ghiacciaio dei Forni esposto a Nord, è corretto che venga illuminato per primo il bacino occidentale (Figg. 3 e 4).



**Fig. 3 – Shading relativo al 1 giugno 2009, ore 6:00. Il punto rosso rappresenta la AWS1 Forni, il punto verde la AWS S.Cat., il contorno giallo è lo *shapefile* Forni.**

**Fig. 4 – Carta d’ombra, relativa al solo Ghiacciaio dei Forni, estratta dalla carta dello *shading* del 1 giugno 2009, ore 6:00. Il punto giallo rappresenta la AWS1 Forni. Il punto rosso è quello dove si è registrata la massima temperatura di tutta l’estate 2009 e quello verde corrisponde al punto con temperatura minima.**



## **Discussione e conclusioni**

Il presente lavoro utilizzando, come valori di partenza, dati meteorologici non rilevati direttamente alla superficie di un ghiacciaio, consente di avere un metodo di lavoro esportabile a quei ghiacciai che, diversamente dal Ghiacciaio dei Forni, non hanno una stazione meteorologica automatica permanente collocata sulla loro superficie o nel caso ce l’abbiamo ne risulta difficile il mantenimento e la manutenzione.

Riguardo al punto del ghiacciaio in cui si verifica la temperatura minore (pari a  $-11.94^{\circ}\text{C}$ ) e maggiore (pari a  $+16.10^{\circ}\text{C}$ ) di tutto il periodo, si può dire che risultano in accordo con quanto atteso, tenendo presente che, nella spazializzazione dei parametri, non abbiamo considerato le zone coperte da detrito e le isole rocciose emergenti (seppur in percentuali limitate) dalla superficie del ghiacciaio. Questo è stato possibile in quanto si tratta di una prima valutazione del bilancio di massa del ghiacciaio.

A prova della notevole influenza della topografia e morfologia del territorio in esame, si sono osservate due piccole isole sia per la temperatura, sia per la radiazione.

Nell’analisi della SWin è importante tener conto anche del problema dello *shading*, o ombreggiamento. Infatti, nel caso di una zona in ombra, vi sarà solo la radiazione solare diffusa e non quella diretta. Le carte dell’ombra hanno permesso così di confermare il fatto che la AWS1 Forni registri valori di SWin dalle 6:00 alle 20:00 e sono quindi un utile strumento per effettuare controlli sull’accuratezza, la precisione e l’eventuale sovrastima dei valori di radiazione calcolata.

In futuro, sarà necessario estendere la modellazione del bilancio energetico completo all’intera superficie glaciale, spazializzando anche l’albedo, la radiazione ad onda lunga netta e i flussi turbolenti. In questo modo sarà possibile quantificare quanta massa è stata persa alla fine di ogni stagione di ablazione (settembre). Per una futura analisi di dettaglio sarà inoltre importante considerare anche le zone coperte da detrito e le isole rocciose emergenti, dal comportamento termico ben diverso, considerando spessore e pattern della copertura detritica.

Considerando infine anche l’accumulo invernale, sarà possibile calcolare l’intero bilancio di massa di un ghiacciaio alla fine di ogni anno idrologico. In questo modo si avranno informazioni sullo stato del ghiacciaio, ma soprattutto sarà possibile prevedere i cambiamenti nella massa in base ai diversi scenari climatici ipotizzati.

## **Bibliografia (relativa alla sintesi) :**

- MIHALCEA C., MAYER C., DIOLAIUTI G., D’AGATA C., SMIRAGLIA C., LAMBRECHT A., VUILLERMOZ E., TARTARI G. (2008). Spatial distribution of debris thickness and melting from remote-sensing and meteorological data, at debris-covered Baltoro glacier, Karakoram, Pakistan. - *Annals of Glaciology*, 48, 49-57.
- OERLEMANS J. (2001). *Glaciers and Climate Change*. - Balkema, Lisse, 115 pp.
- OERLEMANS J. (2005 a). *The microclimate of glaciers – I. Lecture notes from Karthaus summer school 2005*, Utrecht University, 13 pp.