

Comparing measured incoming shortwave and longwave radiation on a glacier surface with estimated records from satellite and off-glacier observations: a case study for the Forni Glacier, Italy



Veronica Manara (veronica.manara@unimi.it), Antonella Senese, Maurizio Maugeri, Guglielmina Adele Diolaiuti

Dipartimento di Scienze e Politiche Ambientali – Università degli Studi di Milano – via Celoria 10, 20133, Milano

1. Introduzione

L'aumento della temperatura osservato nelle ultime decadi è stato particolarmente evidente nella regione Alpina dove si sono osservati trend con intensità maggiore rispetto al resto della Terra. L'elevato trend delle temperature, insieme con l'elevata vulnerabilità delle aree glacializzate ai cambiamenti climatici ha fortemente aumentato l'impatto del *global warming* portando alla perdita di una rilevante frazione del loro volume.

In questo contesto studiare i processi di fusione dei ghiacciai Alpini sta diventando sempre più importante. Una delle metodologie più usate per studiare questi processi è il modello del bilancio di energia che richiede la conoscenza dei flussi radiativi, dei flussi di calore sensibile e latente. → **RUOLO CHIAVE:** conoscenza della distribuzione spaziale e dell'andamento temporale della radiazione a onda corta e onda lunga sulla superficie del ghiacciaio.

Questa conoscenza non può essere basata solo su dati provenienti da stazioni osservative perché i ghiacciai sono collocati in aree remote dove il numero di stazioni meteorologiche è generalmente basso. E' quindi necessario sviluppare metodologie che permettano di stimare dati radiativi sulla superficie del ghiacciaio a partire da altri dati provenienti per esempio da stazioni poste esternamente al ghiacciaio oppure verificare la possibilità di utilizzare informazioni provenienti da altre fonti come per esempio misure satellitari facilmente reperibili anche nelle aree glacializzate.

CASO STUDIO: Ghiacciaio dei Forni

OBIETTIVI: (i) ricercare parametrizzazioni che permettano di stimare la trasmittività delle nubi sulla superficie del ghiacciaio a partire da dati meteorologici misurati nelle vicinanze del ghiacciaio o da dati satellitari;

(ii) verificare l'abilità dei valori parametrizzati a stimare la radiazione a onda corta e lunga entrante sulla superficie del ghiacciaio (SW_{in} e LW_{in});

(iii) studiare l'impatto dell'introduzione della stima della radiazione a onda corta e lunga all'interno di un modello di bilancio di energia per calcolare la fusione giornaliera del ghiacciaio.

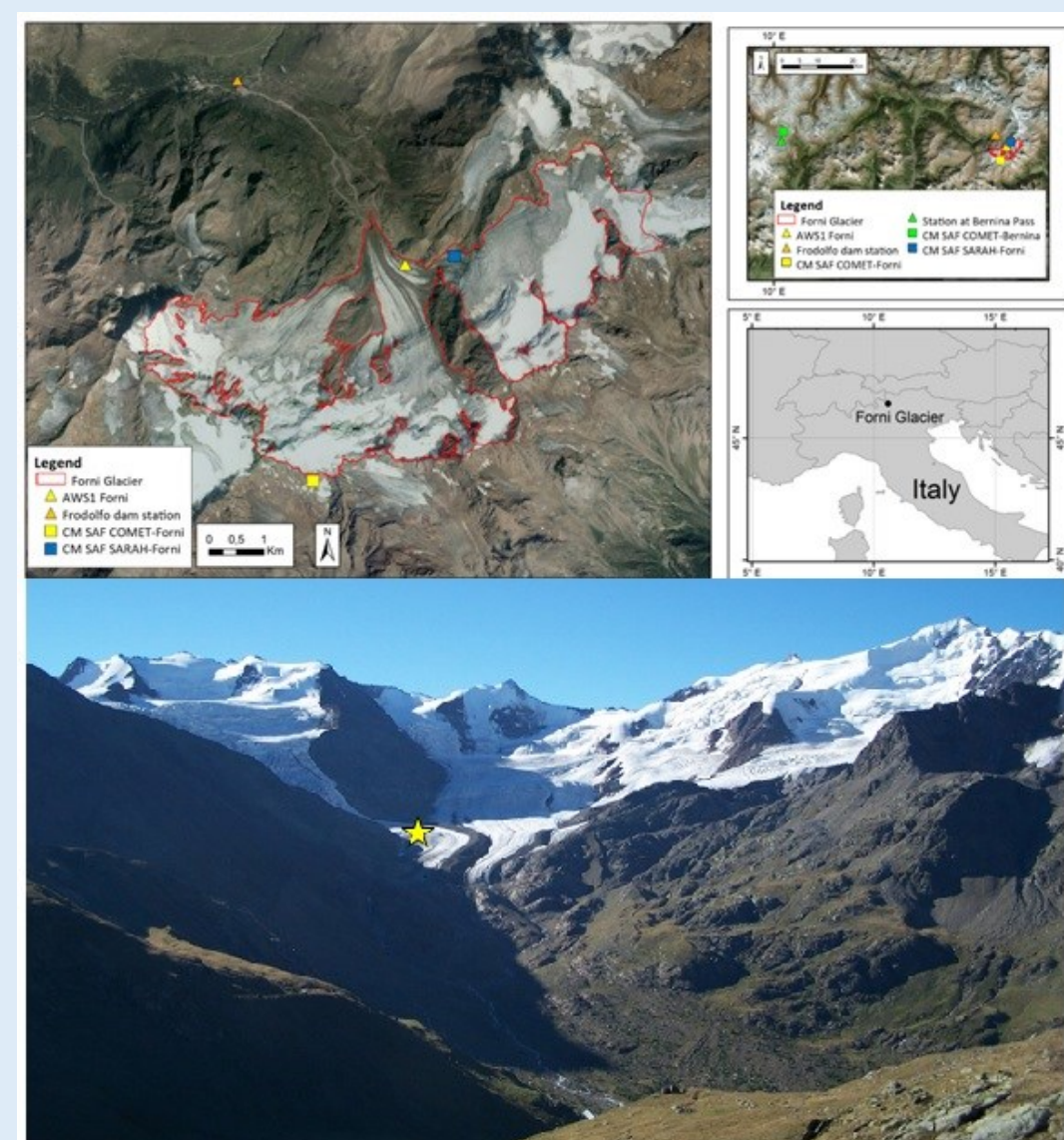
2. Area di studio e dati

Area di studio e stazioni meteorologiche

Il ghiacciaio dei Forni è uno dei più grandi ghiacciai d'Italia (ca. 11.34 km²) collocato all'interno del Parco Nazionale dello Stelvio e con quote che vanno da 2600 a 3670 m a.s.l..

Nell'area sono presenti:

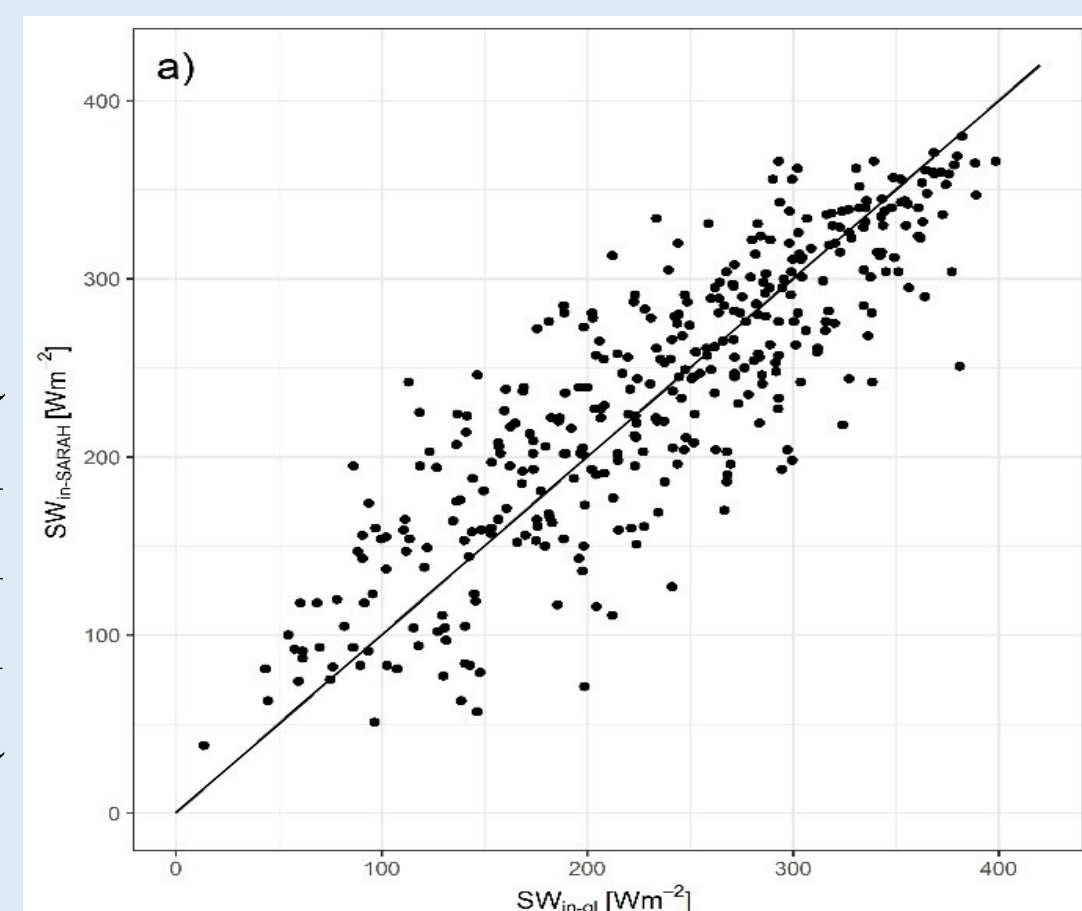
- **Stazione meteorologica sulla superficie del ghiacciaio** (stazione gestita da UNIMI) (AWS1-Forni); Dei parametri misurati è stata considerata la radiazione entrante ed uscente a onda corta (SW_{in-gl} e SW_{out-gl}) e a onda lunga (LW_{in-gl} e LW_{out-gl}), la temperatura (T_{gl}), l'umidità relativa (RH_{gl});
- **Stazione meteorologica nei pressi della diga del fiume Frodolfo** (stazione gestita da ARPA Lombardia) posta esternamente al ghiacciaio a distanza di 3 km dalla stazione AWS1-Forni. Dei parametri misurati è stata considerata la temperatura (T_{dam}).



Dataset satellitari

CM SAF SARAH 2.1

Radiazione entrante a onda corta ($SW_{in-SARAH}$) disponibile a scala giornaliera con risoluzione 0.05° x 0.05°. E' stato scelto il punto più vicino (circa 0.8 km) alla stazione AWS1-Forni. Il confronto tra dati satellitari e i dati misurati effettuato sui mesi estivi (Giugno-Agosto) nel periodo 2006-2009 mostra MBE pari a 2.0 Wm⁻² - MAE pari a 34.9 Wm⁻² - R² pari a 73%.



CM SAF COMET

Nuvolosità (n_{COMET}) disponibile a scala giornaliera con risoluzione 0.05° x 0.05°. E' stato scelto il punto più vicino (circa 3 km) alla stazione AWS1-Forni. Per verificare la rappresentatività dei dati satellitari non essendo la nuvolosità osservata sul ghiacciaio è stato fatto un confronto tra la stazione disponibile presso il passo del Bernina e il punto di griglia più vicino ad essa ottenendo un R² pari a 74%.

3. Metodi

Cloud transmissivity (τ)

Dipende dalla frazione di cielo coperto da nubi e dalla loro tipologia:

$$\tau_{gl} = \frac{SW_{in-gl}}{SW_{in-CS}} \quad (1)$$

dove SW_{in-CS} è la radiazione entrante ad onda corta in condizioni di clear-sky ricavato da Senese et al. 2016.

Parametrizzazione della cloud transmissivity a partire dal Daily Temperature Range

Sono stati testati differenti modelli di complessità via via maggiore (lineare, polinomiale, esponenziale, gaussiano) per stimare la cloud transmissivity a partire dal Daily temperature range misurato alla stazione esterna al ghiacciaio (ΔT_{dam}).

Sono stati considerati il 2006 e il 2008 come anni per la calibrazione del modello e il 2007 e il 2009 come anni per la validazione. La performance dei modelli studiati è stata verificata per confronto con i valori ricavati dall'Equazione 1.

I differenti modelli hanno mostrato risultati confrontabili.

E' stato quindi scelto per semplicità il modello lineare (MBE pari a 0.019 - MAE pari a 0.109 - R² pari a 42%):

$$\tau = (0.055 \pm 0.005)\Delta T_{dam} + (0.26 \pm 0.05) \quad (2)$$

Cloud transmissivity e nuvolosità

Seguendo l'approccio proposto da Sauberer 1955 e Konzelmann et al. 1994 è stata calibrata la relazione che permette di ottenere τ a partire da n usando τ_{gl} e n_{COMET} (MBE pari a 0.016 - MAE pari a 0.097 - R² pari a 53%):

$$\tau = (0.99 \pm 0.04) - (0.41 \pm 0.15)n - (0.08 \pm 0.15)n^2 \quad (3)$$

$$n = \frac{-0.41 + \sqrt{0.41^2 + 4(0.08)(0.99 - \tau)}}{2(0.08)} \quad (4)$$

Stima della radiazione a onda corta e lunga entrante

La radiazione ad onda corta (SW_{in-AT} e $SW_{in-COMET}$) è stata stimata tramite l'Equazione 1 dove la cloud transmissivity è stata ottenuta dall'Equazione 2 (τ_{AT}) e dall'Equazione 3 (τ_{COMET}) rispettivamente.

La radiazione ad onda lunga (LW_{in-AT} e $LW_{in-COMET}$) è stata stimata a partire dalla nuvolosità ricavata dall'Equazione 4 (n_{AT}) e dai dati satellitari (n_{COMET}) rispettivamente.

In particolare è stato utilizzato il seguente metodo:

$$LW_{in} = [\epsilon_{CS}(1 - n^2) + \epsilon_{CL}n^2]\sigma T_{gl}^4 \quad (5)$$

dove ϵ_{CL} è l'emissività in condizioni di cielo coperto (0.976), σ è la costante di Stephan-Boltzmann (5.67x10⁻⁸ Wm⁻²K⁻⁴), ϵ_{CS} è l'emissività in condizioni di cielo sereno ed è dato da:

$$\epsilon_{CS} = 0.23 + 0.475 \left(\frac{e_{gl}}{T_{gl}} \right)^{1/8} \quad (6)$$

dove e_{gl} è la pressione di vapore calcolata come:

$$e_{gl} = RH_{gl} \left(610.8 e^{19.85 \left(1 - \frac{273.15}{T_{gl}} \right)} \right) \quad (7)$$

Calcolo della fusione del ghiacciaio

Per il calcolo della fusione del ghiacciaio è stato utilizzato il modello del bilancio di energia:

$$M_{EnBal} = \frac{(SW_{in} - SW_{out}) + (LW_{in} - LW_{out}) + SH + LE}{Lm} \quad (8)$$

Dove M_{EnBal} è la neve/ghiaccio fuso (kgm⁻² o metri di acqua equivalenti m w.e.), SW_{out} è la radiazione a onda corta riflessa (uscente), LW_{out} è la radiazione a onda lunga emessa dalla superficie (uscente), SH e LE sono i flussi di calore sensibile e latente rispettivamente e Lm è il calore latente di fusione (3.34x10⁵ Jkg⁻¹).

Tutti i flussi sono definiti positivi quando diretti entranti alla superficie.

La fusione avviene quando la temperatura della superficie è 0° C e il numeratore è positivo.

Confronto della fusione del ghiacciaio ottenuta dai valori osservati e stimati di SW_{in} e LW_{in}

E' stato studiato l'errore che si commette nel calcolo della fusione del ghiacciaio se si utilizzano i valori stimati della radiazione entrante ad onda corta e lunga invece che i valori osservati.

4. Risultati

Confronto tra i valori osservati e i valori stimati della radiazione entrante ad onda lunga e corta.

	MBE	MAE	RMSE	BRRMSE	R ²
$SW_{in-SARAH}$ (W m ⁻²)	2.0	34.9	44.4	44.4	0.73
SW_{in-AT} (W m ⁻²)	10.8	47.5	60.6	59.7	0.51
$SW_{in-COMET}$ (W m ⁻²)	8.1	42.0	52.2	51.6	0.66
LW_{in-AT} (W m ⁻²)	-9.4	14.8	19.5	17.0	0.51
$LW_{in-COMET}$ (W m ⁻²)	-6.9	10.7	13.6	11.8	0.76

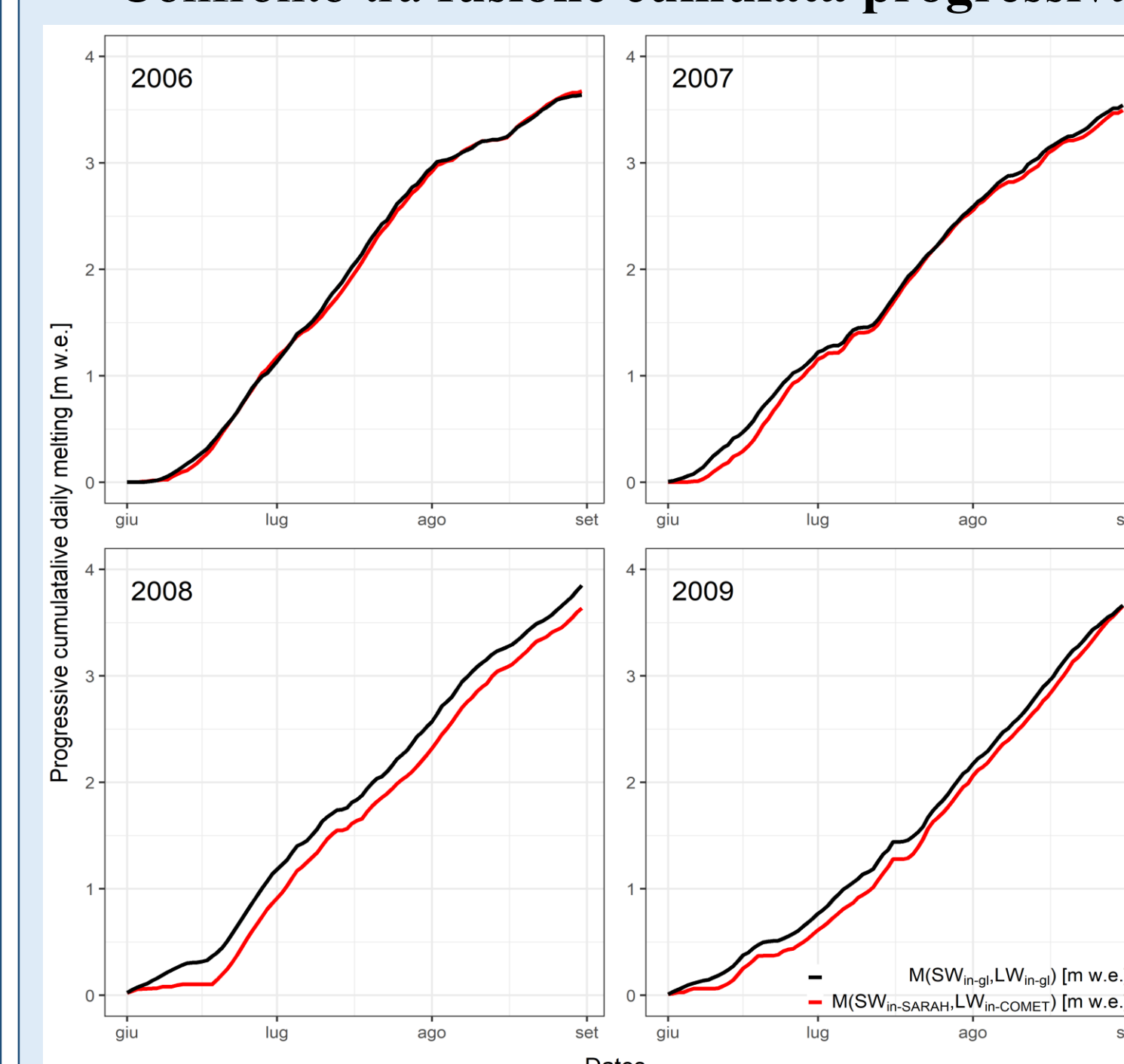
Il confronto mostra un miglior accordo per i valori di radiazione entranti ottenuti dai dati satellitari rispetto ai valori ottenuti partendo dal Daily temperature range misurato da una stazione meteorologica esterna al ghiacciaio. Inoltre la radiazione entrante ad onda corta ottenuta a partire dai dati di nuvolosità COMET mostra un errore maggiore dei corrispondenti valori ottenuti a partire dal dataset SARAH.

Stima della fusione del ghiacciaio utilizzando diverse combinazioni di dati osservati e stimati:

	MBE	MAE	RMSE	BRRMSE	R ²	Cumulative melting (m w.e.)			
						2006	2007	2008	2009
M(SW_{in-gl}, LW_{in-gl})						3.64	3.54	3.85	3.66
M($SW_{in-gl}, LW_{in-COMET}$)	-0.002	0.003	0.003	0.003	0.98	3.49	3.34	3.71	3.52
M(SW_{in-gl}, LW_{in-AT})	-0.002	0.004	0.005	0.004	0.96	3.39	3.26	3.72	3.46
M($SW_{in-SARAH}, LW_{in-gl}$)	0.001	0.008	0.011	0.011	0.75	3.83	3.68	3.77	3.80
M($SW_{in-COMET}, LW_{in-gl}$)	0.003	0.011	0.013	0.013	0.58	3.73	3.89	4.09	3.81
M(SW_{in-AT}, LW_{in-gl})	0.003	0.012	0.016	0.015	0.44	3.93	4.00	3.98	3.87
M($SW_{in-SARAH}, LW_{in-COMET}$)	0.000	0.008	0.010	0.010	0.73	3.67	3.49	3.63	3.65
M($SW_{in-COMET}, LW_{in-COMET}$)	0.001	0.010	0.012	0.012	0.62	3.57	3.69	3.95	3.66
M(SW_{in-AT}, LW_{in-AT})	0.001	0.011	0.013	0.013	0.55	3.67	3.71	3.85	3.65

Parametrizzare LW_{in} introduce un errore minore rispetto a parametrizzare SW_{in} .

Confronto tra fusione cumulata progressiva giornaliera (m w.e.) ottenuta da M($SW_{in-SARAH}, LW_{in-COMET}$) e M(SW_{in-gl}, LW_{in-gl})



L'accordo è buono sia a livello stagionale che a livello dei singoli giorni. I giorni con il maggiore disaccordo sono quelli per cui è presente un elevato albedo (dovuti alla neve fresca). Questi giorni vengono probabilmente interpretati come nuvolosi dai satelliti. Questi periodi sono più evidenti nei primi giorni del periodo Giugno-Agosto quando il ghiacciaio è spesso coperto da neve.

5. Conclusioni

Le analisi hanno mostrato come l'uso dei dati satellitari per modellizzare la radiazione entrante a onda corta e lunga restituisce un miglior risultato che utilizzare dati provenienti da una stazione meteorologica esterna al ghiacciaio. Tuttavia questi risultati non possono essere generalizzati a tutti i ghiacciai in quanto i dati da satellite e i dati osservativi possono presentare dei significativi bias in aree con orografia complessa. I dati satellitari possono infatti essere influenzati da un elevato albedo della superficie quando è coperta da neve che quindi viene non correttamente interpretata come una nube mentre i dati osservativi possono essere affetti da ombreggiamento o da radiazione riflessa proveniente dalle aree innevate circostanti la stazione