



POLITECNICO MILANO 1863

EXECUTIVE SUMMARY OF THE THESIS

Bilancio di massa del ghiacciaio Perito Moreno tramite remote sensing e misure radar

LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

Author: CLAUDIA RIGGIO

Advisor: PROF. DANIELE BOCCHIOLA

Co-advisor: LEONARDO STUCCHI

Academic year: 2022-2023

1. Introduzione

La presente tesi propone un approccio innovativo per calcolare il bilancio di massa dell'area terminale del Perito Moreno (PM), un ghiacciaio stabile della Patagonia Argentina, appartenente al più ampio Southern Patagonian Icefield (SPI). Il PM è un ghiacciaio soggetto a calving e alla formazione ciclica di una diga di ghiaccio a ridosso della Penisola Magallanes che impedisce il deflusso idrico del ramo sud del Lago Argentino (Brazo Rico). Lo scopo finale è quello di dimostrare che con l'utilizzo di strumenti di misura satellitari affiancati a misure di campo è possibile ricostruire la dinamica e il bilancio di massa di un ghiacciaio.

2. Sito di studio

Il Ghiacciaio Perito Moreno ($50.5^{\circ}28'23''S$, $73.2^{\circ}02'10''W$) è situato nel Parco Nazionale Los Glaciares, nella parte sud-occidentale della

provincia di Santa Cruz in Argentina. Si tratta di un ghiacciaio d'acqua dolce che si estende per 30 km dal Cerro Pietrobelli (2950 m s.l.m. al confine col Cile) al Lago Argentino (circa 187 m s.l.m.) mentre la sua lingua è larga 4 km [2].

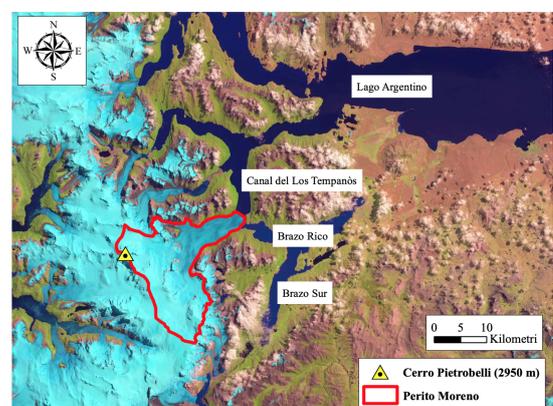


Figure 1: Confini del Perito Moreno

Il ghiacciaio copre un'area di 257,3 km² [3] e sfocia nel lago sia dal lato del Canal de los Témpanos (CT) che da quello del Brazo Rico (BR). Si tratta di un ghiacciaio stabile per dei motivi principali:

- La notevole altitudine della Equilibrium Line Altitude (ELA) a 1170 m e l'alta pendenza nel suo intorno
- il valore dell'Accumulation Area Ratio (AAR) pari a 0,71 che denota un'ampia area di accumulo.
- la diminuzione dell'altezza media delle Ande nella zona dei 50°S (dov'è situato il ghiacciaio), facilitando il superamento della barriera da parte dell'aria umida proveniente dal Pacifico.

3. Dati e metodi

3.1. Velocità

Il calcolo dei campi di velocità viene effettuato utilizzando uno strumento di feature-tracking sviluppato in MATLAB chiamato *Templatematch*, incluso nel toolbox di *ImGRAFT* da Aslak Grinsted e Alexandra Messerli. *Templatematch* utilizza tecniche di cross-correlation per determinare lo spostamento del ghiacciaio tra due immagini (A e B) con una distanza temporale ΔT , generando una mappa di vettori velocità associati ai punti della griglia di input. Il metodo di cross-correlation usato è l'Orientation Correlation che è risultato, secondo Bocchiola et al. 2021 [1], il più efficace. Gli spostamenti non vengono calcolati come multipli della risoluzione spaziale delle immagini, ma nello spazio delle frequenze utilizzando la Trasformata di Fourier veloce discreta. Questo approccio rende lo spazio quasi continuo e consente di riconoscere gli spostamenti per distanze inferiori alla risoluzione del singolo pixel. Parametri in entrata a *Templatematch*:

- Immagini: Sentinel-2 (10 m di risoluzione) a coppie A e B
- Banda: 2 VIS
- Passo della griglia: 5 pixel (50m), ovvero i punti dove centrare la ricerca nelle immagini.
- *TemplateWidth* e *TemplateHeight*: 71 pixel, ovvero la dimensione del template quadrato che si identifica in A e si cerca in B

- *SearchWidth* e *SearchHeight*: $\text{TemplateWidth} + 41$, ovvero la dimensione dell'area in cui cercare il template in B.
- *Initial du* e *Initial dv*: è stato scelto solo $du = 10$, ovvero il punto dove centrare la ricerca nell'immagine B (10 pixel più a est)

Outliers eliminati:

- 5 m giorno⁻¹: eliminate tutte le velocità sopra questa soglia
- no westward: direzione solo verso est

Per il calcolo dei campi di velocità sono state usate 26 coppie di immagini di Sentinel 2 scattate in quattro anni (2019-2023). Infine da questi è stato elaborato un campo di velocità medio in cui a ogni pixel-velocità di 50x50m è associato un vettore velocità.

3.2. Spessori

I valori di spessore del ghiacciaio sono stati calcolati su due sezioni, ovvero la B a 8 km dalla fronte (arancione in Figura 2) e sulla fronte stessa (fucsia in Figura 2). Le due sezioni sono state scelte perché in tali punti sono disponibili i dati di elevazione del letto misurati da Stuefer 1999 [3].

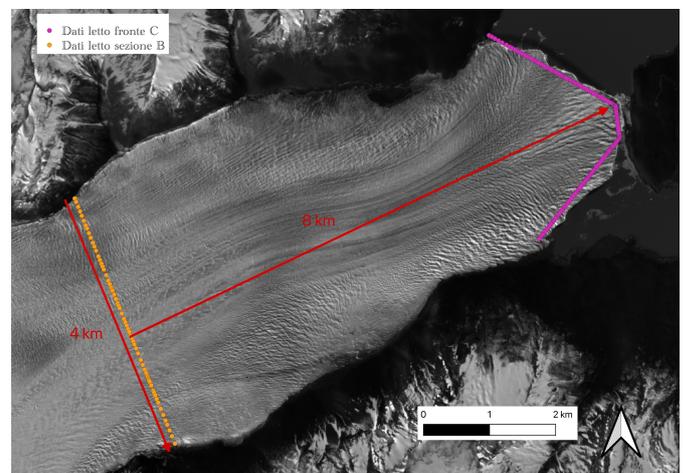


Figure 2: Punti di elevazione del letto misurati da Stuefer 1999

Lo spessore viene calcolato come differenza tra l'elevazione della superficie estratta dall'ASTER GDEM v003 e quella del letto. In questo modo si ottengono una serie di punti sulla sezione B e sul fronte di cui sono noti gli spessori H e H' . In Figura 3 sono rappresentati i dati di elevazione del letto e della superficie del ghiacciaio, quindi il suo spessore.

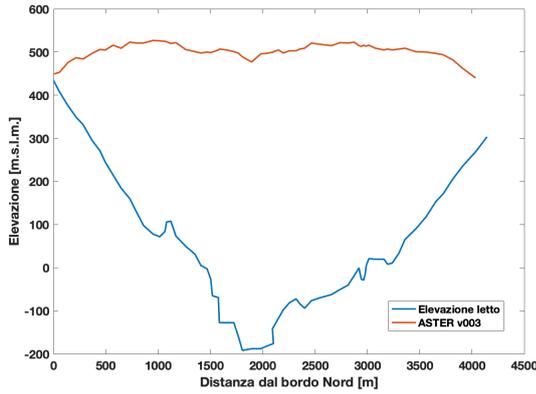


Figure 3: Area della sezione B

3.3. Traiettorie

Le traiettorie vengono calcolate con una funzione implementata su MATLAB che, dati una serie di punti iniziali, un intervallo di tempo (ΔT) e un campo di velocità, permette di spostare la loro posizione fino alla sezione terminale del ghiacciaio. In output il codice restituirà la geolocalizzazione di ogni spostamento dei punti da cui si ricava poi uno shapefile di traiettorie. Inoltre in uscita fornirà anche il tempo impiegato da ogni punto per raggiungere la fronte. La traslazione su cui si basa la funzione avviene secondo la formula di seguito dove x' e y' sono le coordinate dei nuovi punti dopo lo spostamento e $\Delta T = 50$ giorni:

$$\begin{cases} x' = x + u\Delta T \\ y' = y + v\Delta T \end{cases} \quad (1)$$

$$(2)$$

3.4. Ablazione

Il calcolo dell'ablazione si basa su una formula fondamentale di bilancio di massa applicata a ogni concio di ghiacciaio (Figura 4) con possibilità di estenderlo al volume intero.

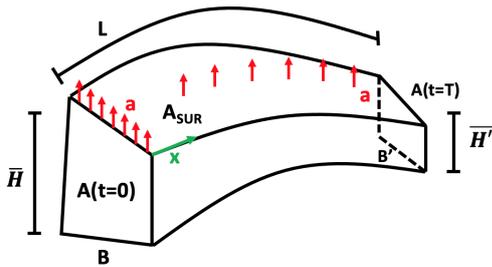


Figure 4: Concio di ghiacciaio

Il bilancio di massa si basa sulle seguenti ipotesi:

stabilità, il ghiacciaio è temperato e si poggia sul fondo del lago ("grounded"). Questo si esprime tramite l'Equazione ?? che descrive la variazione dell'area trasversale dalla sezione B alla fronte.

$$A_{t=0} - A_{t=T}$$

Infine si ottiene la formula dell'ablazione media associata a un concio di ghiacciaio (o coppia di traiettorie di flusso):

$$\bar{a} = \frac{\bar{U}(B\bar{H} - B'\bar{H}')}{A_{SUR}} \quad (4)$$

3.5. Modello degree day

Per confermare i risultati ottenuti usando il metodo illustrato fino ad ora è stato usato un modello per il calcolo dell'ablazione superficiale basato sulle temperature del ghiacciaio e sul degree-day. Le temperature usate sono quelle misurate da una centralina situata a 35 km dal ghiacciaio (Lago Dickson) e alla stessa altitudine della fronte, i dati disponibili vanno dal 2000 al 2023 (valori medi annuali in Figura 5).

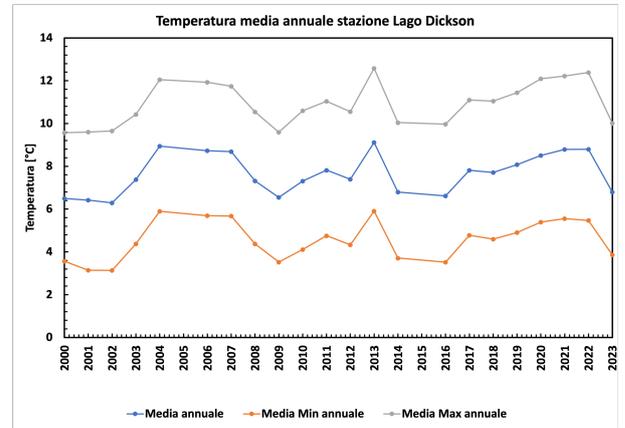


Figure 5: Valori medi annuali di temperatura della Centralina Dickson

Il gradiente verticale di temperatura usato è pari a $0.8 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$. Lo scopo finale è quello di calibrare un degree-day associato all'ablazione ottenuta col metodo proposto a partire da dati diversi (ovvero le temperature).

4. Risultati e discussione

Usando Templatematch sono stati prodotti 26 campi di velocità in m giorno^{-1} come in Figura 6.

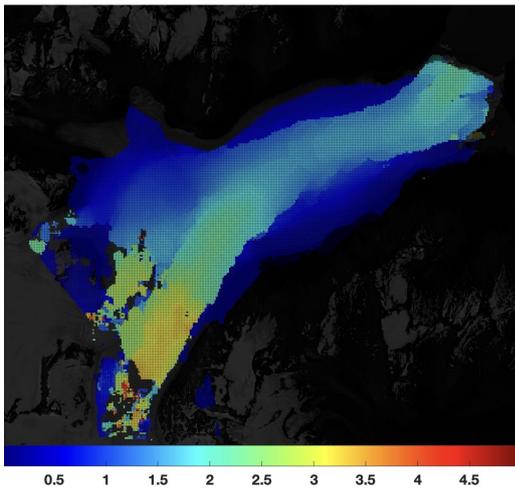


Figure 6: Campo di velocità della coppia 18/12/2021 - 21/02/2022

Dalla sezione in B Figura 2 si estraggono le velocità di ogni periodo analizzato in cinque punti della zona centrale più la media.

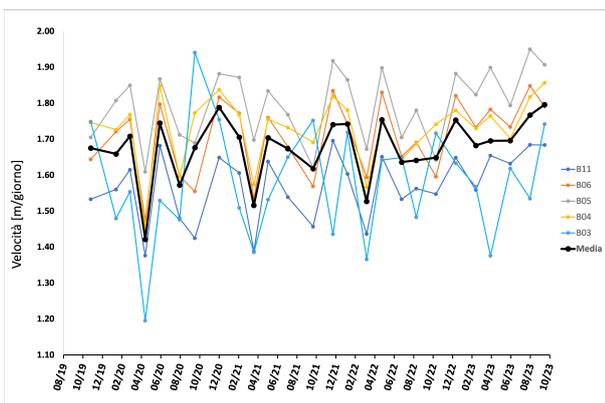


Figure 7: Variazione stagionale delle velocità in dei punti disposti lungo la sezione B

Si delinea la variabilità stagionale delle velocità come i minimi invernali e i massimi estivi. Nella Figura 8 si mostrano le traiettorie ottenute con la funzione iterativa su MATLAB. Delle traiettorie sono state selezionate le centrali e ridotte quelle che terminano nel Brazo Rico (ramo sud del lago) per ragioni di incertezza del campo di velocità medio in quella zona.

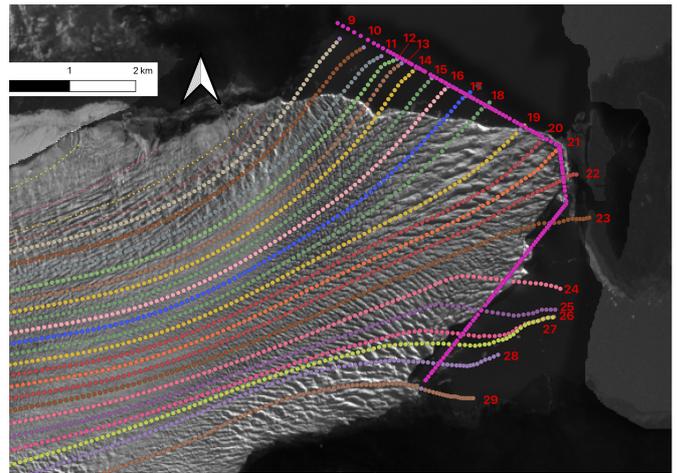


Figure 8: Traiettorie selezionate

L'incertezza di alcune traiettorie si spiega sia per motivi di scarsità di immagini usate per il calcolo della media dei campi in alcuni punti, sia per un'eccessiva variabilità dell'inclinazione dei vettori. Quest'ultima viene rappresentata in Figura 9 tramite la deviazione standard delle inclinazioni di ognuno dei 26 campi e si può notare il valore eccessivo ottenuto proprio sul lato sud finale che termina contro la penisola e nel Brazo Rico.

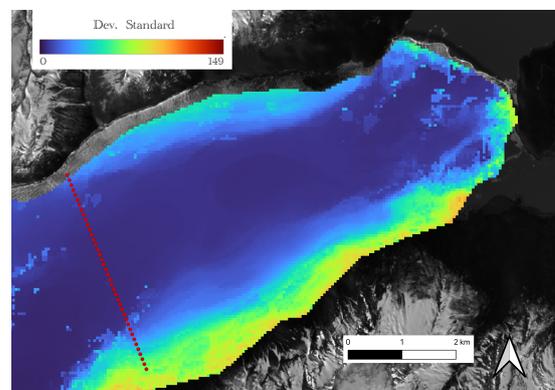


Figure 9: Deviazione standard dell'inclinazione dei vettori

L'ablazione ottenuta per coppia di traiettorie è riportata in Figura 10 associata agli spessori del fronte del ghiacciaio usati nel calcolo B'H'.

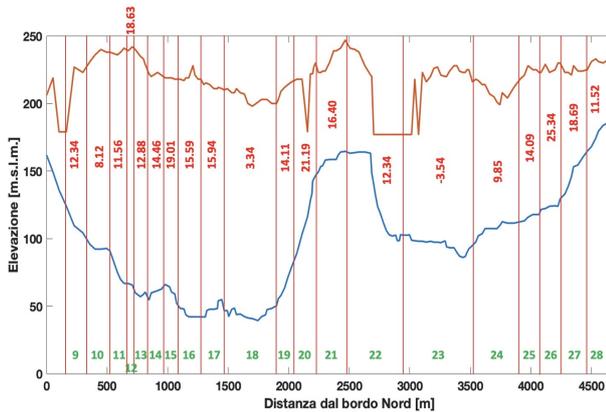


Figure 10: Ablazione associata a ogni spessore terminale B'H'

Si può notare come la coppia 23 presenti un risultato inverosimilmente negativo, questo probabilmente avviene perché il tratto terminale delle traiettorie usate per il calcolo dell'ablazione in quel punto non sono basate su dati di velocità particolarmente rappresentativi del periodo di 4 anni (si veda la Figura 9). Dunque è possibile che siano state tracciate delle deviazioni finali di traiettoria da considerarsi non valide poiché sottostimano l'ablazione reale. Queste incertezze si eliminano nel momento in cui si calcola il valore medio di ablazione su tutto il ghiacciaio, pesato sull'area superficiale delle coppie di traiettorie, che risulta pari a $13.00 \text{ m anno}^{-1}$. Questo valore è in linea con le misure di ablazione effettuate da Stuefer 2007 [4] che risultano leggermente inferiori poiché prelevate più in quota (in media $11.19 \text{ m anno}^{-1}$).

Il modello per il calcolo dell'ablazione alternativo produce un degree-day di $5.53 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ giorno}^{-1}$, calibrato per ottenere un'ablazione media di $13.00 \text{ m anno}^{-1}$ (ovvero quella ottenuta nel presente studio). Questo valore si avvicina molto dai $5.7 \text{ mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ giorno}^{-1}$ misurati da Stuefer 1999 [3] nella stessa zona. Le ablazioni annuali ottenute sono rappresentate in Figura 11 e non presentano rilevanti deviazioni dal valore medio.

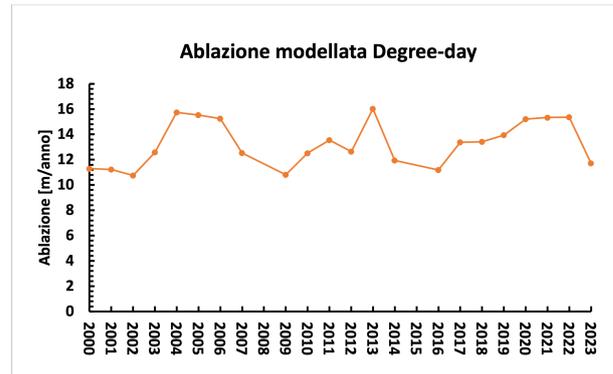


Figure 11: Tasso di ablazione annuale calcolato con modello degree-day

La conferma ottenuta dalle paline di ablazione di Stuefer 2007 e la somiglianza del degree-day stimato con quello misurato da Stuefer 1999 confermano la correttezza del metodo su molte delle traiettorie analizzate e soprattutto sul ghiacciaio intero.

5. Conclusione

Si può infine affermare che il metodo funziona bene se applicato sulla sezione totale del ghiacciaio dando un risultato ($13.00 \text{ m anno}^{-1}$) confermato dalle misure in letteratura e con limitazioni sulle singole traiettorie. Infatti se usato sui singoli conci è necessario assicurarsi che i campi di velocità usati per calcolare il campo medio siano temporalmente stabili in modulo ma soprattutto in inclinazione e che più è ampio il campione di immagini usato più sarà preciso. L'ambizione futura di questo approccio è che diventi di facile applicazione e che possa affiancare o dare inizio a una serie di altri studi sul bilancio di massa dei ghiacciai.

References

- [1] Daniele Bocchiola, Francesco Chirico, Andrea Soncini, Roberto Sergio Azzoni, Guglielmina Adele Diolaiuti, and Antonella Senese. Assessment of Recent Flow, and Calving Rate of the Perito Moreno Glacier Using LANDSAT and SENTINEL2 Images. *Remote Sensing*, 14(1):52, December 2021.
- [2] Andrea I. Pasquini and Pedro J. Depetris. Southern Patagonia's Perito Moreno Glacier, Lake Argentino, and Santa Cruz River. 2011.
- [3] Martin Stuefer. Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based

on Field Measurements and Satellite Imagery. *Investigations on Mass Balance and Dynamics of Moreno Glacier based on Field Measurements and Satellite Imagery*, page 174, 1999.

- [4] Martin Stuefer, Helmut Rott, and Pedro Skvarca. Glaciar Perito Moreno, Patagonia: climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events. *Journal of Glaciology*, 53(180):3–16, 2007.