

Sintesi tesi di laurea magistrale: **Securo Andrea**

MULTI YEAR EVOLUTION OF ICE IN CAVES THROUGH SfM-MVS AND GPR TECHNIQUES

Relatore: **Colucci R. Renato**

Correlatori: **Forte Emanuele, Pillon Simone**

Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze

Corso di laurea in Geoscienze (Curriculum Geofisico) - A.A. 2019/20

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi mira ad investigare il potenziale di un approccio fotogrammetrico tramite *Structure from Motion* (SfM), combinato con rilievi geofisici tramite *Ground Penetrating Radar* (GPR), per monitorare le variazioni topografiche di alcuni depositi di ghiaccio permanente in grotta siti nel massiccio del monte Canin (Prealpi Giulie, S-E Alpi Europee). Questa metodologia permette sia il calcolo accurato delle variazioni di volume dei depositi di ghiaccio permanente, sia la stima del volume di ghiaccio sito in ogni singola cavità. La SfM terrestre rappresenta una soluzione a basso costo per rilievi topografici ad alta risoluzione con problemi logistici molto limitati sia in termini di pesi e ingombri che di personale utilizzato e un tempo di acquisizione molto veloce. La SfM permette di ricostruire la scena ripresa con precisione sub-centimetrica e rende meno conveniente e utile l'utilizzo di altre metodologie per rilievi ad alta risoluzione, come il laser scanner terrestre. Quattordici acquisizioni SfM sono state effettuate tra le stagioni di ablazione 2017-2020 (Luglio-Ottobre) nelle tre cavità analizzate (Vasto ice cave, Leupa ice cave e Pecore ice cave). A questi si aggiungono 2 rilievi GPR acquisiti nel 2012. Le nuvole di punti dense (3D) e i modelli digitali del terreno (2.5D) ottenuti al seguito delle elaborazioni hanno reso possibile un calcolo affidabile delle variazioni volumetriche verificatesi all'interno delle grotte durante il periodo analizzato. La combinazione delle indagini SfM e GPR ha fornito un *imaging* completo dello spessore e del volume totale del ghiaccio presente in ciascuna delle cavità, dimostrando di essere una metodologia ideale per possibili monitoraggi a lungo termine della criosfera sotterranea.

Le grotte di ghiaccio sono definite come depositi permanenti (> 2 anni) di ghiaccio in grotte naturali, tipicamente in ambienti carsici o tubi di lava ⁽¹⁾, e sono riconosciute dalla maggior parte degli autori come parte del permafrost ^(2, 3, 4). I depositi di ghiaccio in grotta stanno subendo notevoli perdite di massa in tutto il mondo ed è quindi estremamente urgente studiare e raccogliere dati su queste fonti di informazioni paleoclimatiche ⁽⁵⁾. I bilanci di massa a lungo termine sono piuttosto comuni sui ghiacciai, sia in ambienti alpini che polari, e negli ultimi decenni nuove metodologie come LiDAR, fotogrammetria terrestre/aerea e pseudo-3D GPR hanno migliorato enormemente l'affidabilità e le potenzialità di queste indagini. Questo non è il caso delle grotte di ghiaccio, dove esistono solamente dataset a breve termine e spesso riferiti a dati puntuali, come nella grotta di ghiaccio Eisriesenvelt (Alpi austriache) dove un sensore a ultrasuoni ha monitorato in continuo i cambiamenti dello spessore del ghiaccio ⁽⁶⁾ o nella grotta di Leupa (Prealpi Giulie) dove i cambiamenti della topografia della superficie sono monitorati usando 2 punti di riferimento fissi dal 2011 ⁽⁴⁾.

METODI

La Structure from Motion (SfM) è un workflow che combina diversi algoritmi provenienti principalmente dalla *computer vision*, dal *dense image matching* e parzialmente dalla fotogrammetria. Gli algoritmi utilizzati differiscono dalla fotogrammetria tradizionale perché le posizioni delle fotografie, l'orientamento e l'intera geometria della scena vengono ricostruiti simultaneamente senza alcun input esterno al di fuori delle fotografie ⁽⁸⁾. Tuttavia, qualora si vogliano effettuare delle misurazioni spaziali sui prodotti della SfM, l'acquisizione richiede vi siano dei punti di controllo, che necessitano di un rilievo topografico a parte ⁽⁸⁾. La combinazione di metodologie proposta permette di ottenere una risoluzione paragonabile a quella del TLS (*Terrestrial Laser*

Scanner) nella creazione di un modello digitale del terreno (DTM) ⁽⁹⁾. Inoltre, l'approccio riduce il costo strumentale facilitando il miglioramento della risoluzione temporale, fondamentale in monitoraggi a lungo termine come i bilanci di massa pluriennali. Un altro vantaggio è la gamma di applicabilità delle scale spaziali, rendendo possibile concentrarsi su piccoli dettagli (ad esempio *bedières*, sedimenti, crioconiti) o sull'intera area della grotta senza alterare il flusso di elaborazione (ad esempio, l'approccio è affidabile da 10^{-2} a 10^6 m²). A nostra conoscenza, la SfM non è mai stata utilizzata per rilievi multi-temporali in depositi di ghiaccio in grotta.

Il *Ground Penetrating Radar* (GPR) è una metodologia molto diffusa in diverse indagini glaciologiche grazie alle peculiari proprietà dielettriche dei materiali congelati e del ghiaccio che presentano entrambi una bassa attenuazione intrinseca. Questo permette alle onde elettromagnetiche di raggiungere profondità notevolmente superiori a quelle dei comuni materiali geologici. Altri aspetti chiave che stanno rendendo il GPR una soluzione diffusa per le indagini glaciologiche sono i tempi di acquisizione relativamente veloci e le alte risoluzioni laterali e verticali, che sono dell'ordine di alcuni centimetri, almeno per le applicazioni meno profonde. Le recenti applicazioni di tecniche GPR su corpi di ghiaccio nell'area delle Alpi Giulie sono numerose e di solito riguardano i ghiacciai ⁽¹⁰⁾, mentre vi sono tutt'ora solo pochi esempi al mondo di GPR in depositi di ghiaccio sotterranei ^(11, 12).

RISULTATI E CONCLUSIONI

Le nuvole di punti dense e le mesh poligonali ricostruite attraverso la SfM hanno permesso la riproduzione esatta delle tre grotte analizzate con una risoluzione sub-centimetrica. La texturizzazione delle mesh poligonali ha anche permesso la creazione di modelli 3D fotorealistici e interattivi che possono essere utili per altre applicazioni scientifiche o attività di divulgazione. L'utilizzo del software opensource CloudCompare per il confronto delle nuvole di punti ha reso possibile il calcolo delle entità delle variazioni topografiche all'interno delle cavità (Fig.1). Tutte le misurazioni sono state fatte sia lavorando su DTM 2.5D che su dataset 3D (Fig. 2) in modo da trovare quale metodo fosse il più efficace e affidabile. I dati GPR hanno permesso di stimare il volume dei depositi di ghiaccio con alta precisione (Fig. 4).

Il deposito permanente della grotta del Vasto (VIC) ha perso il 13,6% del volume di ghiaccio stimato dal 2012 al novembre 2020, che equivale a 134,00 m³. La grotta di Leupa (LIC) ha perso il 49,4% del suo volume di ghiaccio dal 2012 al novembre 2020, che equivale a 180,11 m³. Non ci sono dati sufficienti per stabilire quanto del ghiaccio totale sia fuso nella grotta delle Pecore (PIC) in quanto il deposito si estende in una zona molto maggiore di quella indagata tramite GPR. Tuttavia, nella PIC sono state misurate perdite di 66,12 m³ di ghiaccio dal 2019 al 2020. L'errore stimato per l'intera metodologia è di $0,02 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$ sulle misure puntuali. Questo valore si riduce a 0,01 m nelle aree occupate dai depositi di ghiaccio visto che queste sono state ricostruite con maggiore precisione vista la sovrapposizione superiore fra fotogrammi in fase di acquisizione. Vi sono sicuramente errori non stimabili che derivano dalle limitazioni della metodologia GPR 2.5D e da alcune porzioni di cavità non ricostruite attraverso la SfM-MVS per via delle geometrie complesse.

Ulteriori informazioni utili sull'evoluzione temporale che caratterizza queste porzioni di criosfera sotterranea e sull'interazione con l'ambiente esterno potrebbero in futuro provenire dalla combinazione di questi dati e simili acquisizioni con dati microclimatici raccolti in loco, sia all'interno che all'esterno delle grotte. Altre implementazioni della metodologia presentata potrebbero derivare dall'uso di una georeferenziazione dei dati più raffinata per il rilievo SfM-MVS (ad esempio utilizzando una stazione totale per il posizionamento dei GCP) combinata con GPR 3D georeferenziato acquisito nello stesso giorno.

I risultati ottenuti in questa tesi potrebbero costituire un punto di partenza per una migliore quantificazione della riduzione del volume di ghiaccio che si verifica nelle grotte alpine nell'attuale scenario condizionato dal riscaldamento globale. La metodologia stessa è applicabile anche ad altri rami della glaciologia. Indagini di

questo tipo possono essere un'alternativa economica e molto efficace anche per il bilancio di massa pluriennale dei ghiacciai, specialmente dove la morfologia del corpo glaciale e delle aree circostanti permetta un'acquisizione idonea.

Bibliografia

- 1) Perşoiu, A., 2018. *Ice caves climate*. In: A., Perşoiu, Lauritzen S.E., Eds., *Ice Caves*. Elsevier, pp. 750.
- 2) Holmlund, P., Onac, B.P., Hansson, M., Holmgren, K., Mörth, M., Nyman, M., Persoiu, A., 2005. *Assessing the palaeoclimate potential of cave glaciers: the example of the Scărisoara Ice Cave (Romania)*. *Geogr. Ann.*, 87, 193–201.
- 3) Luetscher, M., 2013. *Glacial processes in caves*. In: Shroder, J., Frumkin, A. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*, vol. 6, *Karst Geomorphology*. Academic Press, 258–266.
- 4) Colucci, R.R., Guglielmin M., 2019. *Climate change and rapid ice melt: suggestions from abrupt permafrost degradation and ice melting in an alpine ice cave*. *Progress in Physical Geography*, 43 (4), 561-573.
- 5) Kern, Z., Persoiu, A., 2013. *Cave ice - the imminent loss of untapped mid-latitude cryospheric palaeoenvironmental archives*. *Quat. Sci. Rev.*, 67, 1–7.
- 6) Obleitner, F., Spötl, C., 2011. *The mass and energy balance of ice within the Eisriesenwelt Cave, Austria*. *Cryosphere*, 5 (1), 245–257.
- 7) Bertozzi, B., Pulvirenti, B., Colucci, R.R., Di Sabatino, S., 2019. *On the interactions between airflow and ice melting in ice caves : A novel methodology based on computational fluid dynamics modeling*. *Science of the Total Environment*, 669, 322–332.
- 8) Carrivick, J., Smith, M., Quincey, D., 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. Wiley Blackwell.
- 9) Piermattei, L., Carturan, L., De Blasi, F., Tarolli, P., Dalla Fontana, G., Vettore, A., Pfeifer, N., 2016. *Suitability of ground-based SfM-MVS for monitoring glacial and periglacial processes*. *Earth Surface Dynamics*, 4, 425–443.
- 10) Forte, E., Dossi, M., Fontana, M.C., Colucci, R.R., 2014. *4-D quantitative GPR analyses to study the summer mass balance of a glacier: a case history*. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 352–356.
- 11) Hausmann, H., Behm, M., 2011. *Imaging the structure of cave ice by ground penetrating radar*. *The Cryosphere*, 5, 329-340.
- 12) Lende, M.G., Serrano, E., Bordehore, L.J., Sandoval, S., 2016. *The role of GPR techniques in determining ice cave properties: Peña Castil ice cave, Picos de Europa*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41 (15), 2177-2190.

Figure

- **Fig. 1** – Esempio di calcolo della distanza fra due nuvole di punti utilizzando l'algoritmo M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) per valutare l'entità delle variazioni di volume mensili all'interno della VIC (Vasto Ice Cave) durante la stagione di ablazione 2018.
- **Fig. 2** – Nuvole di punti dense della LIC (Leupa Ice Cave) generate tramite SfM (a, b). Distanza fra le due nuvole di punti calcolata tramite M3C2 e plottata sulla scena tramite campo scalare, utilizzando il software CloudCompare.
- **Fig. 3** – Esempio di un attributo geometrico calcolato sulle nuvole di punti tramite CloudCompare (Verticalità) all'interno del deposito permanente della VIC. L'interpretazione dell'evoluzione stagionale del deposito viene in questo modo facilitata. Si noti la formazione ed evoluzione delle bedieres e la presenza di buchi (zone bianche) dovuti alla posizione delle foto in fase di acquisizione.
- **Fig. 4** – Posizionamento dei profili GPR all'interno della LIC (soffitto rimosso) (a); modello 3D del deposito di ghiaccio permanente derivato dall'interpolazione 2.5D della profondità del substrato, interpretato nei profili GPR (b); vista prospettica 3D della LIC (luglio 2020) con il substrato roccioso ricostruito (rosso) e il soffitto in ghiaccio della cavità interna (giallo) (c).

Fig. 1

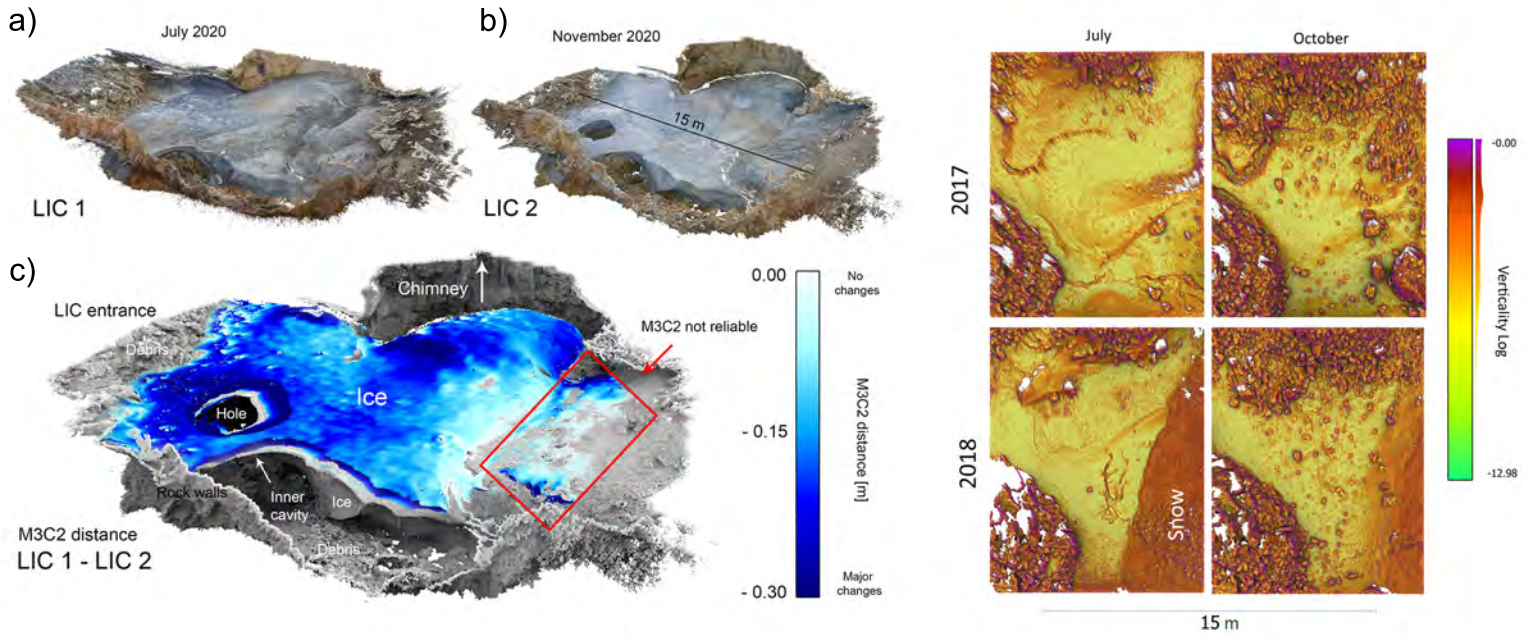
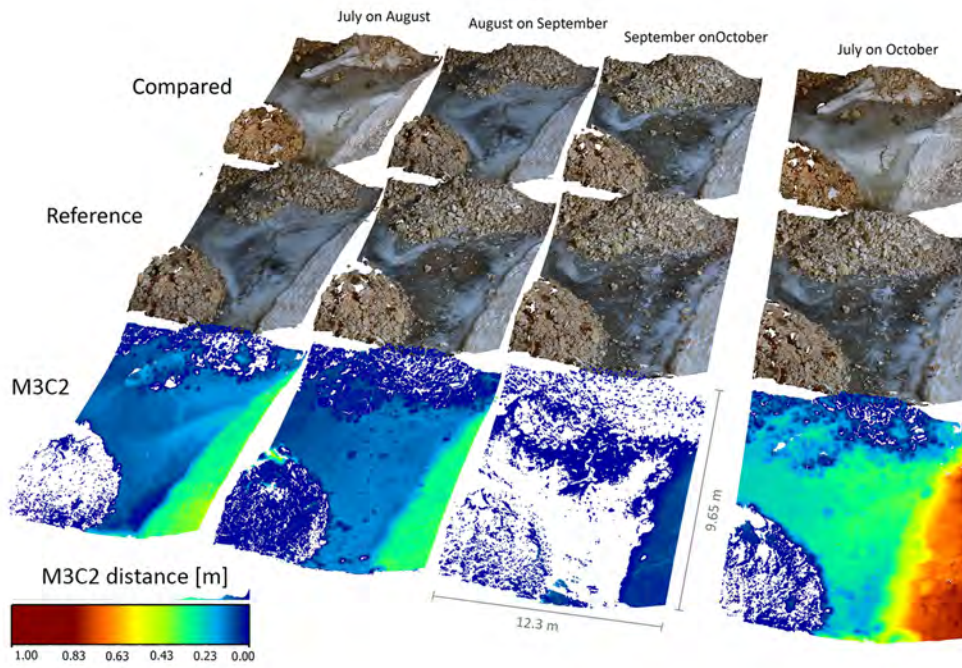


Fig. 2

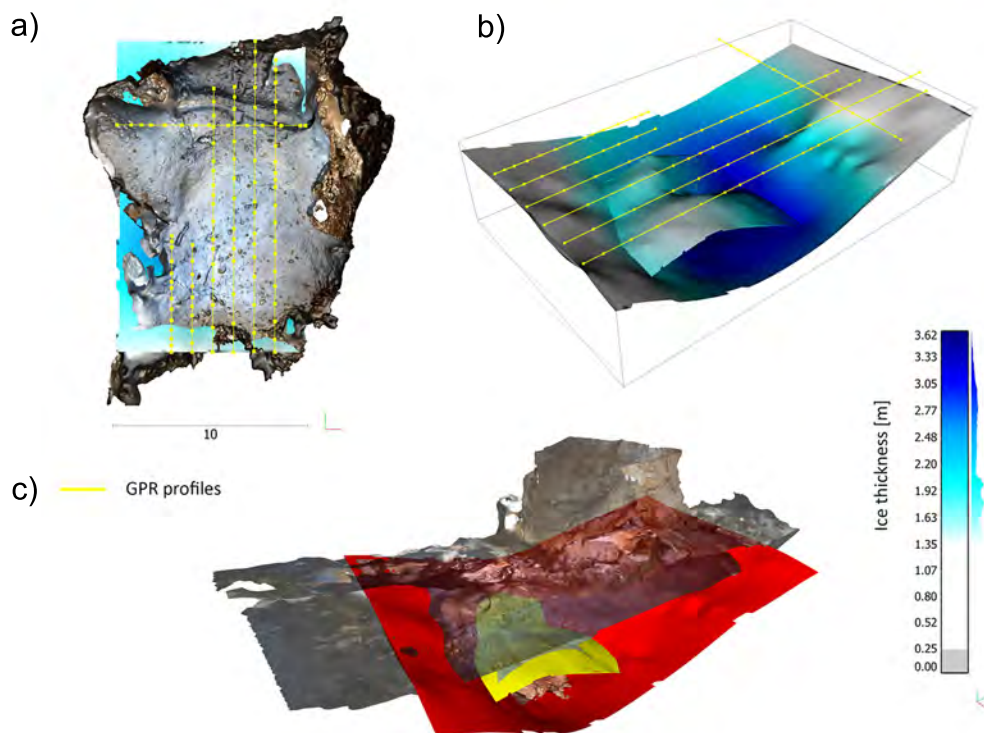


Fig. 4

Fig. 3