

ANALISI IPERSPETTRALE E DISCRETA AD ALTA RISOLUZIONE DI SEZIONI DA UNA CAROTA DI GHIACCIO DELL'ADAMELLO

Università Degli Studi di Milano Bicocca

Relatore: Prof. Valter Maggi

Correlatore: Prof. Monica Sisti

Correlatore: Prof. M. C. A. Potenza

Email: d.fiorini@campus.unimib.it

Numero telefonico: 3406397443

Data di laurea: 25 Ottobre 2022

Introduzione

Le superfici ghiacciate del pianeta sono uno sguardo incontaminato sulla storia climatica della Terra. La loro capacità di riflettere la radiazione solare influisce sul bilancio energetico, cosicché le informazioni paleoclimatiche registrate nei ghiacciai polari e alpini possano raccontare la storia dei cambiamenti climatici e ambientali nel tempo. Le variazioni climatiche sono una realtà lampante, a causa di un progressivo riscaldamento climatico osservato fin dal 1950. L'ultimo rapporto IPCC 2022 [1], evidenzia lo stato preoccupante della criosfera. I ghiacciai alle medie latitudini, ad esempio, sono altamente sensibili all'attuale riscaldamento atmosferico, con anche conseguente compromissione della qualità del segnale nel ghiaccio.

Gli studi sulle carote di ghiaccio da ghiacciai alle medie latitudini sono essenziali per dedurre la recente variabilità climatica e l'impatto antropogenico su scala regionale. Nella letteratura scientifica sono stati presentati vari sistemi di imaging non distruttivi per: estrarre informazioni stratigrafiche su carote di ghiaccio usando la trasmittanza [2], identificare lo spessore annuale degli strati e collegare relazioni con la profondità in una carota di ghiaccio Antartica poco profonda [3] e determinare lo spessore annuale di strati collegando stratigrafia visiva e impurità contenute [4].

In questa tesi, un sistema non distruttivo basato su un sensore di imaging iperspettrale è utilizzato per analizzare le proprietà ottiche delle carote di ghiaccio presso il Laboratorio EuroCold (Università Milano-Bicocca). La spettroscopia a imaging iperspettrale è un'innovativa tecnica usata per caratterizzare le superfici dei materiali sulla base delle loro proprietà ottiche. Considerando che diverse proprietà del ghiaccio variano la sua capacità di assorbire e riflettere la radiazione elettromagnetica (ad esempio nel visibile), in questa tesi verranno estratti e analizzati la riflettanza e i parametri da essa derivati, Albedo, Snow Darkening Index (SDI) e Impurity Index (II), per ottenere curve continue in porzioni di carota a seconda delle proprietà del ghiaccio. Il record SDI sarà utilizzato per selezionare campioni per le analisi in discreto di concentrazione di polveri, al fine di estrarre una curva calibrata per la concentrazione di impurità, lungo l'intera carota, senza ulteriori analisi distruttive. Si analizzano sezioni di carota di ghiaccio estratta nel 2021 nel contesto del progetto ADA270 dalla regione del gruppo glaciale Adamello-Mandrone, per una lunghezza di 21 m, da 14 m a 35 m di profondità. Il sito di perforazione è stato la porzione Pian di Neve dei ghiacciai Adamello-Presanella, nelle Alpi Retiniche, a quota 3200 m. Il metodo di perforazione utilizzato è Electrothermal Drill (ET), che utilizza una porzione riscaldante a forma di anello sulla testa del carotiere per fondere un anello nel ghiaccio, sfruttando una resistenza elettrica.

Materiali e Metodi

La configurazione iperspettrale considerata in questo lavoro (Fig. 1) è un sistema di scansione formato da diverse parti [5]. I principali componenti mobili sono uno spettrometro di imaging iperspettrale (Hyperspec® VNIR, HeadWall Photonics) e una sorgente luminosa alogena stabile (600 W, LOT Quantum Design) che può essere ruotata per ottimizzare l'illuminazione della sezione di ghiaccio allineando il fascio al centro dell'asse lungo ogni sezione. Sia lo spettrometro che la sorgente luminosa sono in grado di muoversi avanti e indietro

per scansionare sezioni a una velocità definita, scelta per fornire il giusto movimento micrometrico per ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale (fino a 20 μm). Lo spettrometro si occupa di raccogliere la radianza spettrale in 840 bande nelle lunghezze d'onda VIS e NIR (da 380 a 1000 nm). A causa delle basse temperature in cui lo spettrometro deve lavorare (almeno $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), nella cella fredda due riscaldatori lo mantengono ad una temperatura interna di circa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Un altro componente fondamentale del sistema è la referenza bianca (un pannello Spectralon bianco), usato per simulare una riflettanza ideale pari a 1 (valore massimo). Lo Spectralon è posizionato al top di ogni sezione, sulla superficie piatta fissa del sistema.



Fig. 1: Sistema iperspettrale formato da: a) sistema ad alta precisione con porta campioni e driver motore; b) Telecamera HeadWall; c) lampada alogena; d) pannello Lambertian Spectralon®; e) PC collegato allo spettrometro; f) Single-Board RIO – Credit: Garzonio et al.

Il software di acquisizione dati è stato sviluppato da R. Garzonio et al. [5]. Questo software permette di impostare i parametri di scansione e sincronizzare il moto con la raccolta di dati iperspettrali, per ottenere immagini ad alta risoluzione spaziale. La sua interfaccia grafica utente (GUI), consente di definire manualmente la posizione iniziale dello spettrometro (posizione relativa all'origine sul pannello bianco) e la lunghezza delle scansioni. Per avere un'idea dei tempi di analisi, per scansionare una sezione di ghiaccio da 1 m con una risoluzione spaziale di 0,1 mm, il sistema richiede circa 20 minuti. Inoltre le superfici delle sezioni scansionate vengono precedentemente tagliate, fino ad ottenere una forma semicilindrica, per avere una superficie piana che la lampada possa illuminare uniformemente. Prima di ogni misura, ogni sezione viene trattata con una lama per levigare la superficie piana e cercare di ridurre possibili artefatti ottici. Inoltre, una spazzola morbida rimuove il materiale di ghiaccio residuo.

Il software di elaborazione dati (sviluppato in MATLAB) consente il calcolo della riflettanza da immagini iperspettrali in Digital Numbers. È progettato per gestire file di grandi dimensioni (ad esempio un'immagine iperspettrale di 6000 linee, 1000 righe e 840 bande occupa 6 GB sul disco rigido) mappando il tutto in file temporanei a cui è possibile accedere come memoria dinamica, accelerando la lettura e la scrittura dei file stessi. Dalla GUI, prima dell'inizio dell'elaborazione, l'utente può selezionare l'immagine iperspettrale di una sezione, il file DC corrispondente (un'immagine Dark Current acquisita prima di ogni misurazione) e il nome del file in output. Inoltre, l'operatore racchiude l'area bianca del pannello di riferimento all'interno dell'immagine e la regione della sezione, prima di iniziare l'analisi vera e propria. Il software così creato estrae immagini in cui ogni singolo pixel è descritto da uno spettro di riflettanza. Queste informazioni vengono utilizzate per costruire una matrice di impronte di riflettanza per intere carote di ghiaccio, con file che occupano meno spazio di memoria rispetto a immagini standard.

Infine, una volta eseguita l'acquisizione e l'elaborazione dei dati, è possibile proseguire con l'estrazione dei risultati. Le strutture del ghiaccio e le impurità che assorbono la luce, possono essere caratterizzate utilizzando diversi descrittori spettrali derivati da immagini di riflettanza. L'albedo, ad esempio, è una proprietà molto importante, ampiamente utilizzata per caratterizzare la porzione di energia riflessa da una superficie. Per quanto riguarda neve e ghiaccio, l'albedo è fondamentale poiché regola il bilancio energetico di ghiacciai e nevai e i conseguenti effetti sul clima. Inoltre, due descrittori spettrali, lo Snow Darkening Index (SDI) e l'Impurity Index (II), sono usati per caratterizzare le impurità nel ghiaccio che hanno un maggiore assorbimento della radiazione elettromagnetica. In particolare, originariamente l'SDI è stato correlato con la

concentrazione di polvere minerale sulla neve [6] e II è stato sviluppato per valutare, da dati satellitari, l'impatto sull'albedo delle impurità, depositate sulla calotta glaciale della Groenlandia, che assorbono radiazione [7]. In questa tesi, tutti e tre i descrittori ottici sopra menzionati vengono estratti dalla riflettanza, sotto forma matematica come riportato da Di Mauro et al. [6].

Il record dell'indice SDI, come menzionato sopra, viene anche utilizzato per selezionare campioni per analisi di concentrazione, che richiedono una decontaminazione. Lo strumento ora utilizzato è un Coulter Counter Beckman Multisizer 4E (CC). I parametri inseriti sono: modalità di controllo Volumetrica (1000 μL); soluzione elettrolitica l'ISOTON II BCI (soluzione filtrata, tamponata con fosfato); contenitore di campioni Accuvette ST; soglia dimensionale pari a 1 μm ; corrente di apertura di 800 μA ; guadagno del preamplificatore pari a 4; numero di bin è 400, con una dimensione da 1 μm a 30 μm ; spaziatura dei bin impostata come diametro log; valore impostato per la densità del campione pari a 2,5 g/ml. Per questa analisi, sono stati considerati 4 gruppi di caratteristiche del ghiaccio: picchi SDI alti, picchi SDI medio-alti, picchi di albedo alti e picchi di albedo medio-alti. Questi picchi sono rispettivamente associati ad alto contenuto di impurità, medio-alto contenuto di impurità, alta riflessione del ghiaccio e presenza di bolle d'aria.

Risultati sperimentali e discussione

A questo punto, la matrice di riflettanza lungo le sezioni della carota è stata creata. Con questo file, è possibile estrarre curve di riflettanza per ogni banda di pixel in precise regioni di interesse, per osservare le proprietà ottiche al variare delle caratteristiche del ghiaccio. Ad esempio, le curve di riflettanza per una sezione denominata #058 sono riportate in Fig. 2. Lo spettrometro, come descritto sopra, misura lunghezze d'onda che vanno da 380 nm a 1000 nm.

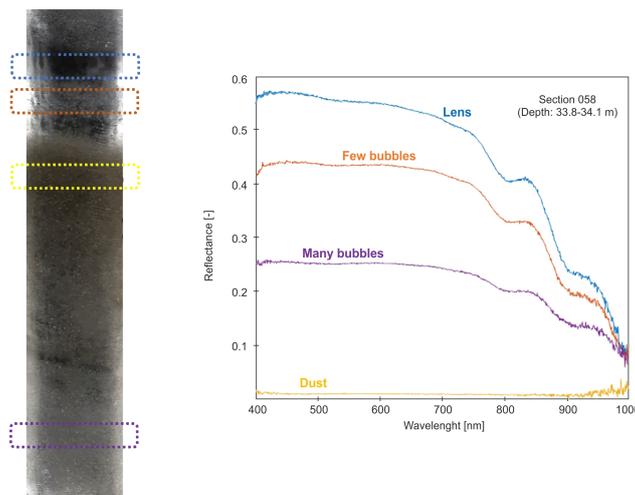


Fig. 2: Curve di riflettanza per una sezione di carota di ghiaccio lunga 0,3 m, etichettata #058. Diverse caratteristiche del ghiaccio variano le proprietà ottiche muovendosi lungo la sezione selezionata.

Come previsto, le impurità riducono la riflettanza mentre le lenti di ghiaccio la aumentano rapidamente. Le bolle hanno un comportamento particolare, a metà strada tra polveri e lenti. La sezione qui considerata è di particolare interesse per l'elevata concentrazione di impurità contenute, come si vedrà dalle misure CC. Spostando la camera HeadWall step-by-step dal top al bottom delle sezioni, tutti i record per Albedo, SDI e II vengono creati da queste curve. Il record di SDI, può essere visto in Fig. 3. Ci sono molti picchi alti, in

particolare tre di essi sono di maggiore interesse: il picco tra 23-24 m, quello tra 25-26 m e l'ultimo tra 33.5-34 m. Quest'ultimo è quello che corrisponde alla sezione etichettata #058 in Fig. 2.

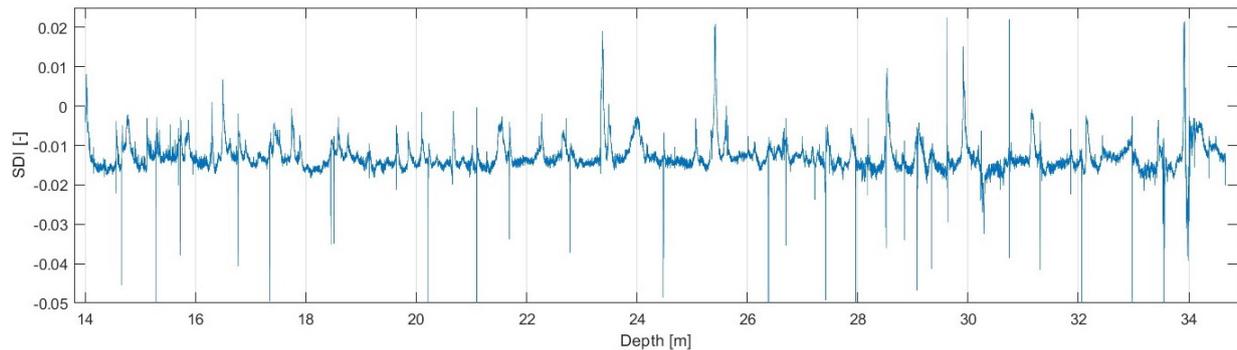


Fig. 3: registrazione continua dell'indice di scurimento della neve (SDI), lungo tutte le sezioni scansionate

In particolare, per campioni ad alta concentrazione di impurità, sono stati utilizzati esattamente i picchi sopra menzionati. Avendo un SDI elevato, i campioni sono stati diluiti prima dell'analisi. I risultati complessivi mostrano una concentrazione di particelle dell'ordine di $(12,93 \pm 3,67)$ ppm per campioni con SDI alto. I campioni di lenti di ghiaccio evidenziano una bassa concentrazione di particelle nell'ordine di $(0,58 \pm 0,40)$ ppm. I campioni con valori SDI medi mostrano concentrazioni di particelle dell'ordine di $(5,91 \pm 3,21)$ ppm e i campioni con bolle d'aria visibili hanno basse concentrazioni, nell'ordine di $(0,19 \pm 0,09)$ ppm. Successivamente all'utilizzo di un modello di regressione, si ottiene la curva calibrata (Fig. 4).

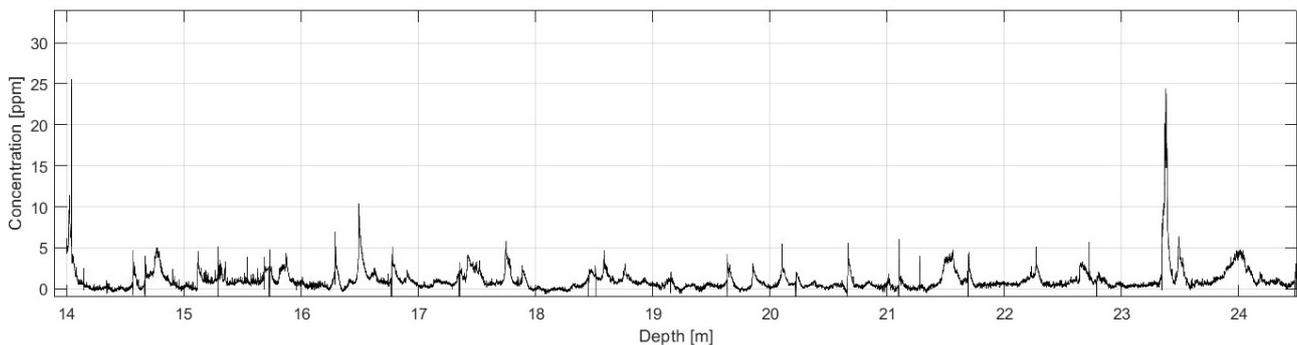


Fig. 4: curva calibrata per la concentrazione lungo le sezioni di carote di ghiaccio analizzate, fino a circa 35 m di profondità

La calibrazione evidenzia le regioni previste con bassa, media o alta concentrazione di impurità. La variazione di concentrazione va da 0 ppm a circa 30 ppm. La tendenza media oscilla tra poco più di 0 ppm e poco meno di 5 ppm. Quando la lampada illumina le sezioni, devono essere presi in considerazione diversi effetti. La luce incidente, ad esempio, penetra per alcuni millimetri all'interno della superficie creando effetti di dispersione, che potrebbero generare artefatti come brusche variazioni degli indici. L'analisi nel suo insieme mostra risultati promettenti che possono essere ulteriormente studiati per mappare le proprietà del ghiaccio. L'integrazione di imaging iperspettrale con le classiche tecniche, consentirà una raccolta completa delle proprietà fisiche e chimiche delle carote di ghiaccio da tutto il mondo.

Bibliografia

- [1] https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryVolume.pdf
- [2] <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008JD011083>
- [3] <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=12cd158fe2999bced407463b292332add20fafa8>
- [4] <https://epic.awi.de/id/eprint/12321/1/Sve2005a.pdf>
- [5] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165232X17305797>
- [6] <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2015JD023287>
- [7] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014NatGe...7..509D/abstract>