

Integrazione di dati ottici e InSAR per l'individuazione di rock glacier in un'area pilota della Valtellina

Daniele Pisanu^{1*}, Corrado A. S. Camera¹, Roberto S. Azzoni¹

1) Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio", Università degli Studi di Milano, Milan,
Italy

* corresponding author, email daniele.pisanu@unimi.it

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro è sviluppare un workflow che permetta l'individuazione di rock glacier su aree estese (circa 10–100 km²), distinguendoli da altre unità geomorfologiche attraverso l'integrazione di dati interferometrici e ottici. In particolare, le bande SWIR, NIR e RED sono state integrate per la definizione di un indice multispettrale per la distinzione di poligoni di aree detritiche. Parallelamente, sono stati generati interferogrammi con baseline temporale di 12, 24 e 36 giorni per definire le velocità medie annue lungo la *Line Of Sight* (LOS). Il metodo è stato testato su un'area di 3,7 km² in località Alpe Visogno (SO). I dati ottenuti sono stati integrati in un unico dataset, associando a ciascun poligono individuato le rispettive velocità. Questo dataset è stato poi analizzato mediante *cluster analysis*, permettendo la distinzione automatica tra rock glacier e depositi detritici non attivi. L'analisi ha evidenziato due gruppi principali: un cluster con maggiore velocità (media 24 mm/yr) attribuibile ai rock glacier e un cluster con minore velocità (media 11 mm/yr) riconducibile a depositi non attivi. I risultati, in termini di localizzazione dei depositi e interpretazione geomorfologica, sono coerenti con le osservazioni di campo e da ortofoto e confermano l'efficacia del workflow.

Introduzione

L'integrazione di diverse tipologie di dati satellitari, in questo caso ottici e interferometrici, permette l'analisi di ampie aree in modo automatico, garantendo l'accesso a un'ampia quantità di dati in tempi brevi. Questo studio si pone come obiettivo quello di definire una metodologia automatica per il riconoscimento di rock glacier su larga scala. L'area di studio è situata in una valle laterale della Valtellina, presso la località Alpe Visogno, tra una quota di circa 1700 m s.l.m. e 2600 m s.l.m. L'area ospita un rock glacier atipico per esposizione (sud) e quota (circa 2100 m s.l.m.), caratteristiche che lo rendono interessante per lo studio delle dinamiche del permafrost in ambiente alpino.

31 Metodo

32 Il metodo si articola in due distinti flussi di lavoro. Il primo prevede l'utilizzo di dati ottici Sentinel-2 per
33 l'individuazione delle aree coperte da detrito, mentre il secondo utilizza dati Sentinel-1 per la
34 definizione delle velocità superficiali nel periodo compreso tra maggio e dicembre 2024; tale intervallo
35 temporale è stato scelto al fine di ridurre la presenza di copertura nevosa nell'area di studio. In una
36 prima fase è stato definito un indice finalizzato all'identificazione automatica delle aree detritiche:

$$SWIR_{tot} = SWIR_1 + SWIR_2 \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

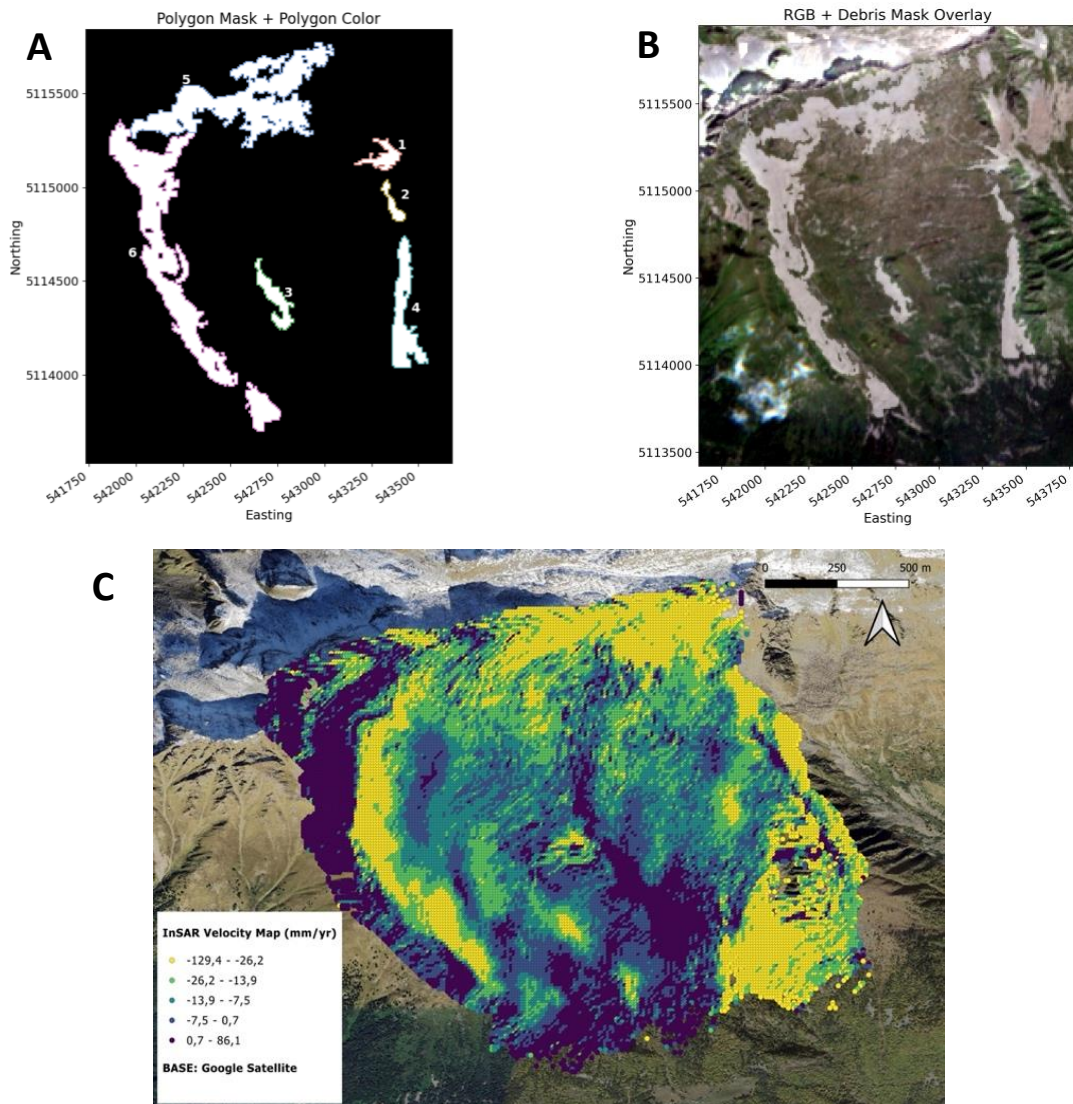
$$DEBRIS\ INDEX = \frac{(SWIR_{tot} - NIR)}{(SWIR_{tot} + NIR)} \cdot (1 - NDVI) \quad (3)$$

37 Sono state utilizzate le bande SWIR perché sensibili alla presenza di acqua, sia essa legata a copertura
38 nuvolosa, acqua interstiziale o fenomeni di evapotraspirazione. Inoltre, è stata integrata la banda NIR
39 ed è stato applicato il fattore (1-NDVI), al fine di ridurre l'influenza della vegetazione nella delimitazione
40 delle aree di interesse. Successivamente è stata selezionata un'immagine di riferimento da utilizzare
41 come base per le analisi. Si è scelto di utilizzare un'immagine estiva (08.08.2024), acquisita in assenza
42 di eventi precipitativi recenti. Per l'analisi delle immagini è stato sviluppato uno script Python. Gli
43 output, in termini di DEBRIS INDEX, sono stati analizzati con una procedura *trial-and-error* per
44 individuare una soglia percentile ottimale per discriminare le aree interessate dalla presenza di detrito.
45 Per quanto riguarda il secondo flusso di lavoro, sono state utilizzate immagini Sentinel-1 in formato
46 SLC (*Single Look Complex*), scaricate dal portale Copernicus e relative all'anno 2024. I dati sono stati
47 successivamente elaborati seguendo il workflow interferometrico classico mediante il software ESA
48 SNAP, eseguito tramite terminale. Le principali fasi di processamento hanno incluso la coregistrazione
49 delle immagini, la generazione degli interferogrammi, il filtraggio della fase e il calcolo della coerenza
50 interferometrica. La fase di phase unwrapping è stata eseguita mediante il software SNAPHU
51 (*Statistical-Cost Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping*; Chen e Zebker 2000, 2001, 2002). Il
52 processamento finale e la stima delle velocità superficiali sono stati successivamente effettuati
53 mediante il software Python MintPy (*Miami InSAR Time-series software in Python*; Yunjun, Fattahi e
54 Amelung 2019), utilizzato per l'analisi delle serie temporali e la derivazione delle velocità lungo la linea
55 di vista del sensore (*Line Of Sight*, LOS). Gli output in termini di poligoni detritici e velocità di
56 spostamento sono stati combinati mediante analisi statistica e clustering sviluppando script R.

57 Risultati e discussioni

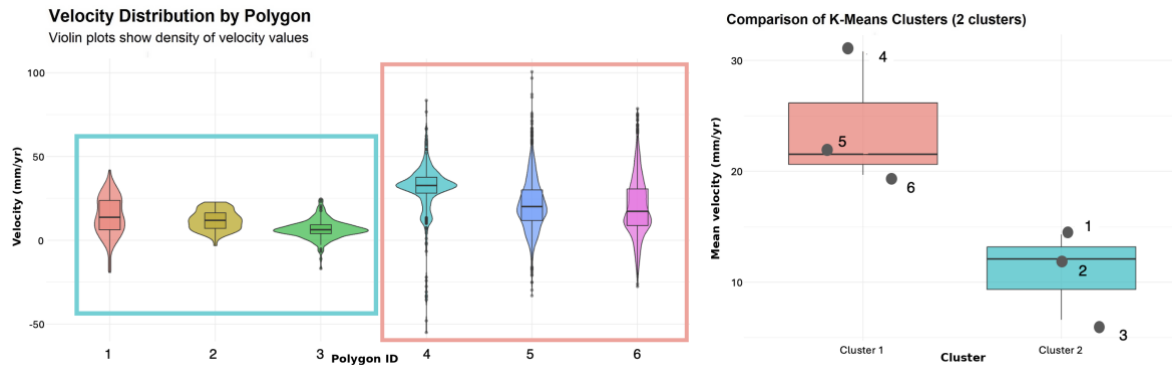
58 L'applicazione del workflow descritto ha permesso di individuare le aree caratterizzate dalla presenza
59 di detrito e di stimarne le velocità superficiali mediante analisi interferometrica SAR. L'applicazione del

60 DEBRIS INDEX ha consentito di discriminare le aree caratterizzate dalla presenza/assenza di copertura
 61 detritica all'interno dell'area di studio utilizzando una soglia pari al valore del 75° percentile. La buona
 62 capacità discriminante dell'indice tra superfici detritiche e aree circostanti è testimoniata dalla
 63 coerenza con le immagini RGB Sentinel-2 e con le osservazioni sul campo utilizzate come riferimento
 64 (Figura 1A, 1B). Le aree individuate (sei poligoni) risultano distribuite principalmente nei settori
 65 caratterizzati da maggiore accumulo di materiale superficiale e mostrano una buona continuità
 66 spaziale con le principali forme geomorfologiche osservabili nell'area di studio. Il workflow InSAR ha
 67 prodotto risultati coerenti in termini di distribuzione spaziale delle deformazioni superficiali,
 68 evidenziando differenti settori caratterizzati da diversa attività cinematica. In particolare, le velocità
 69 maggiori risultano concentrate lungo i versanti individuati come i più predisposti al distacco mentre i
 70 settori periferici mostrano valori inferiori e maggiore stabilità (Figura 1C).



71
 72 **Figura 1** — A) Maschera binaria delle superfici detritiche derivata dal DEBRIS INDEX mediante soglia al 75° percentile.
 73 B) Composizione RGB Sentinel-2 con sovrapposizione della maschera DEBRIS INDEX.
 74 C) Mappa delle velocità medie annuali lungo la LOS ottenuta da processamento InSAR Sentinel-1.

75 L'analisi statistica e di clustering (Figura 2) ha permesso di riconoscere i rock glacier (poligoni 4, 5, 6) e
 76 ha evidenziato come i poligoni classificati come semplici accumuli di detrito dalle osservazioni di
 77 campo (poligoni 1, 2, 3) presentino una velocità media inferiore (11 mm/yr) rispetto ai poligoni
 78 identificati come rock glacier (24 mm/yr).



79 *Figura 2 — Distribuzione delle velocità medie annuali dei sei poligoni analizzati e confronto tra i cluster identificati tramite*
 80 *analisi K-means.*

81 Conclusioni

82 Il metodo proposto ha mostrato buoni risultati per il riconoscimento dei rock glacier. L'indice sviluppato
 83 è risultato efficace nella discriminazione di aree detritiche, pur presentando il limite di una risoluzione
 84 direttamente dipendente da quella delle immagini ottiche. Per quanto riguarda i dati interferometrici,
 85 le principali limitazioni sono legate a fattori esterni, come la neve e la decorrelazione, che possono
 86 influenzare l'efficacia e la qualità del processamento InSAR. Per gli sviluppi futuri, l'obiettivo sarà quello
 87 di ampliare l'area di applicazione, estendendo l'analisi all'intera Valchiavenna (SO), al fine di verificare
 88 la robustezza del metodo su scala regionale.

89 References

- 90 Chen, C. W., e H. A. Zebker. 2000. «Network Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping:
 91 Intractability and Two New Algorithms». *Journal of the Optical Society of America. A, Optics,*
 92 *Image Science, and Vision* 17(3):401–14. doi:10.1364/josaa.17.000401.
- 93 Chen, Curtis W., e Howard A. Zebker. 2001. «Two-Dimensional Phase Unwrapping with Use of
 94 Statistical Models for Cost Functions in Nonlinear Optimization». *JOSA A* 18(2):338–51.
 95 doi:10.1364/JOSAA.18.000338.
- 96 Chen, Curtis W., e Howard A. Zebker. 2002. «Phase Unwrapping for Large SAR Interferograms:
 97 Statistical Segmentation and Generalized Network Models». *IEEE Transactions on Geoscience*
 98 *and Remote Sensing* 1709-1719. doi:10.1109/TGRS.2002.802453.
- 99 Yunjun, Zhang, Heresh Fattahi, e Falk Amelung. 2019. «Small baseline InSAR time series analysis:
 100 Unwrapping error correction and noise reduction». *Computers & Geosciences* 133:104331.
 101 doi:10.1016/j.cageo.2019.104331.

102