ICEGIANT: monitoraggio geodetico e geofisico del sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue nell'ambito della XLI spedizione antartica PNRA

Matteo Cappuccio[1], Salomon Hailemikael[2], Shahriar Mokhtari[1], Stefania Danesi[2], Cristina Castagnetti[3], Antonio Zanutta[1], Francesco Mancini[3], Francesca Grassi[3], Simone Salimbeni[2], Stefano Gandolfi[1], Alessandro Capra[3], Massimo Frezzotti[4], Luca Vittuari[1]

[1] Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna
[2] Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
[3] Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari", Università di Modena e Reggio Emilia
[4] Dipartimento di Scienze, Università degli Studi Roma Tre

Abstract. Il progetto ICEGIANT integra GNSS, sismologia e dati SAR per studiare il sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue. Durante la XLI spedizione PNRA sono state installate 12 stazioni GNSS e tre stazioni sismiche. Le prime analisi PPP-AR evidenziano un contrasto nella risposta verticale alle maree tra zona di galleggiamento e lingua flottante. Sono presentati la rete osservativa, le strategie di elaborazione e le prospettive di integrazione dei dati.

Parole chiave: GNSS; Drygalski Ice Tongue; sismologia broadband; SAR; dinamica glaciale; maree oceaniche; PNRA.

1. Contesto e obiettivi

Il David Glacier è il principale ghiacciaio di sbocco della Terra Vittoria settentrionale e drena circa il 4% della calotta dell'Antartide orientale, con un bacino che si estende fino a Dome C e Talos Dome (Rignot, 2002). Superato l'icefall del David Cauldron, dove la topografia basale cambia bruscamente pendenza nell'attraversamento delle Montagne Transantartiche, il flusso alimenta la Drygalski Ice Tongue, lingua galleggiante lunga circa 140 km dalla zona di galleggiamento e larga circa 20 km, di cui circa 90 km non confinati nel Mare di Ross. Si tratta di un ghiacciaio a base marina, con linea di galleggiamento a profondità prossime ai 2000 m sotto il livello del mare (Frezzotti et al., 2000); per dimensioni e posizione il sistema influenza la circolazione oceanica locale e la persistenza della polynya di Baia Terra Nova, e rappresenta quindi un osservatorio naturale delle interazioni tra ghiaccio, substrato roccioso, oceano e atmosfera.

Il sistema David Glacier–Drygalski Ice Tongue attraversa condizioni meccaniche e ambientali differenti: scorrimento del ghiaccio continentale, zona di transizione tra porzione appoggiata sul bedrock e lingua galleggiante, lingua glaciale libera e

interazione con l'oceano. Fratture, geometria basale complessa e sollecitazioni mareali rendono difficile descrivere la cinematica con una sola tecnica di misura. ICEGIANT mira, pertanto, a osservare in modo coordinato gli spostamenti superficiali e le deformazioni locali, a riconoscere il contributo della forzante mareale e a costruire un quadro di riferimento per interpretare la sismicità glaciale e i campi cinematici derivati dal radar satellitare. Il contributo ad ASITA è soprattutto metodologico: dimostrare come una rete geodetica in ambiente estremo possa collegare osservazioni puntuali ad alta frequenza, processi geofisici e copertura spaziale satellitare.

Il sistema è oggetto di osservazioni italiane fin dai primi anni '90: rilievi GPS temporanei sono stati eseguiti nelle stagioni 1992–1994, 2000-2001 e 2005–2006, mentre la sismicità glaciale dell'area è registrata durante le estati australi a partire dal 2003. Studi precedenti hanno documentato la sensibilità del flusso alla marea oceanica, compresa la modulazione a circa 14 giorni dell'ampiezza mareale, e la presenza di sismicità basale raggruppata nel tempo e nello spazio, verosimilmente condizionata dalle condizioni di lubrificazione alla base del ghiaccio (Vittuari et al., 2023; Danesi et al., 2025). La possibilità di rioccupare, ove praticabile, le posizioni geografiche delle campagne storiche rende ICEGIANT anche un'occasione per confronti su scale temporali di due-tre decenni. In un quadro più ampio, il progetto si colloca tra gli obiettivi del programma strategico SCAR INSTANT (INStabilities & Thresholds in ANTarctica), che richiama la necessità di nuove misure dirette attraverso le zone di galleggiamento e lungo i ghiacciai di sbocco per migliorare la capacità predittiva dei modelli di dinamica delle calotte.

2. Rete di osservazione e acquisizione

La distribuzione delle 12 postazioni GNSS copre diversi settori della Drygalski Ice Tongue, con gruppi trasversali DA2 e DR8 e stazioni disposte lungo la direzione prevalente del flusso. Tale geometria permette confronti tra porzioni più interne e settori flottanti, oltre all'analisi differenziale tra siti vicini. Il nuovo assetto estende spazialmente le osservazioni GNSS storiche svolte sul sistema. Le tre stazioni sismiche broadband sono destinate al riconoscimento di segnali associati a fratturazione, scorrimento e interazioni ghiaccio–substrato; la loro correlazione con le variazioni cinematiche GNSS potrà essere affrontata dopo il recupero dei dati. Le attività hanno richiesto soluzioni specifiche per accessibilità, sicurezza nei settori crepacciati, alimentazione e continuità di registrazione.

Le stazioni GNSS sono state progettate per un'installazione rapida e reversibile su ghiaccio: ricevitori geodetici multi-costellazione a basso consumo (Septentrio AsteRx e Stonex SC650), antenne montate su pali in alluminio infissi nel firn, elettronica e batterie al litio-ferro-fosfato (LiFePO4) alloggiate in contenitori stagni, alimentazione integrata da pannelli solari dimensionati in funzione dell'assorbimento degli strumenti e delle condizioni di ciascun sito. La scelta di strumentazione compatta e a costo contenuto rispetto ai sistemi tradizionali risponde all'obiettivo di aumentare la densità spaziale delle misure riducendo il carico logistico per singolo punto, senza rinunciare a

una cadenza di acquisizione adatta a ricavare soluzioni cinematiche a intervalli di pochi minuti.

La rete sismica è composta da tre stazioni broadband autonome (sensore triassiale nanometrics Trillium T40 e acquisitore Reftek RT130 con sincronizzazione GPS), installate su affioramenti rocciosi ai margini del flusso principale, in prossimità della zona di galleggiamento: Central Trio Nunatak, Hughes Bluff e D'Urville Wall. La collocazione su roccia, già sperimentata in campagne precedenti, garantisce accoppiamento con il substrato roccioso e un buon rapporto segnale/rumore, mentre la vicinanza ad alcuni gruppi di stazioni GNSS consente di formare coppie di osservazione geodetico-sismiche riferite a settori omogenei del ghiacciaio. I sistemi di alimentazione prevedono lo spegnimento controllato all'arrivo dell'inverno australe e il successivo riavvio nella stagione estiva.

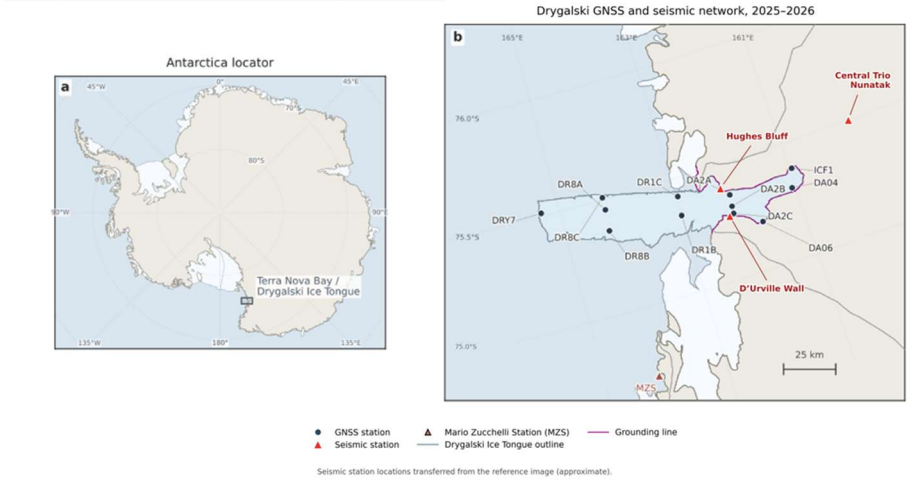

Figura 1 – Schema della rete di monitoraggio ICEGIANT 2025–2026 (3 stazioni sismiche, 12 stazioni GNSS) e inquadramento geografico.

Le attività di campo si sono svolte tra il 19 dicembre 2025 e il 19 gennaio 2026 e hanno compreso il collaudo della strumentazione presso la Stazione Mario Zucchelli, l'installazione, le rivisitazioni per verifica di funzionamento e scarico dati, interventi di riparazione e reinstallazione di alcune stazioni e, infine, la riconfigurazione della rete: al termine della fase intensiva quattro ricevitori sono stati lasciati in sito, uno in posizione più interna e tre lungo un transetto orientato circa nord-sud nel settore distale della lingua. GNSS e sismometri dispongono di una base temporale comune di oltre 18 giorni, mentre le acquisizioni prolungate potranno aumentare di un fattore due-tre il volume di dati disponibile, pur con prevedibili lacune invernali. Le criticità incontrate (malfunzionamenti di alcuni ricevitori, gestione energetica, accesso ai settori crepacciati) costituiscono indicazioni pratiche per la progettazione di reti geodetiche temporanee in contesti analoghi. In collaborazione con l'osservatorio geodetico IGOA (Italian Geodetic Observatory in Antarctica) è stata inoltre eseguita la manutenzione

del mareografo di Baia Terra Nova, i cui dati sono essenziali per definire un modello di marea locale non basato esclusivamente su previsioni armoniche.

3. Elaborazione GNSS e caratterizzazione della risposta mareale

In assenza di una rete regionale densa, e con le stazioni permanenti più vicine situate a distanze dell'ordine di 100 km o superiori dai settori di misura, l'elaborazione segue una strategia Precise Point Positioning con risoluzione intera delle ambiguità di fase (PPP-AR) in modalità cinematica, basata su prodotti precisi di orbite, orologi e bias dei satelliti, con coordinate espresse in ITRF2020. Rispetto alle soluzioni differenziate di rete, l'approccio PPP-AR non richiede stazioni di riferimento prossime né vincoli di rete che potrebbero attenuare segnali spazialmente coerenti; rispetto alle precedenti soluzioni PPP con ambiguità float, riduce la dispersione a breve termine e migliora la stabilità temporale delle serie, aspetto determinante per oscillazioni di piccola ampiezza in prossimità della zona di galleggiamento (Cappuccio et al., 2026). L'adozione di un flusso di elaborazione omogeneo (PRIDE PPP-AR; Geng et al., 2019), applicabile anche alla rielaborazione dei dati storici, favorisce inoltre la confrontabilità tra campagne acquisite a distanza di anni con strumentazioni e software differenti. Il controllo di qualità comprende la verifica della continuità delle sessioni, l'individuazione di salti e lacune e la valutazione del rumore residuo prima della modellazione.

Le serie di coordinate GNSS sono analizzate nelle componenti locali nord, est e verticale (Up) e, per l'interpretazione glaciologica, proiettate anche lungo e trasversalmente alla direzione media di scorrimento. Le analisi del rapporto tecnico ICEGIANT si basano su serie campionate nominalmente ogni cinque minuti e sul confronto con una previsione mareale per l'area della Stazione Mario Zucchelli. Per separare andamento medio e oscillazioni periodiche è stato adottato un modello costituito da termine lineare e due armoniche diurne principali, con periodi di circa 25,714 e 24 ore. L'ampiezza della risposta e la frazione di variabilità spiegata dal modello (R^2) descrivono le differenze fra i punti della rete: si tratta di indicatori di risposta cinematica alla marea, non di misure dirette del livello oceanico sotto ogni stazione.

La risposta verticale appare nettamente differenziata. La stazione ICF1, nel settore prossimo alla transizione con il ghiaccio ancorato, mostra una relazione mareale debole ($R^2 = 0,04$; rapporto composito di ampiezza = 0,02). DA06 presenta un comportamento intermedio ($R^2 = 0,37$; rapporto = 0,08). Al contrario, stazioni sulla lingua flottante quali DA2B e DR8C raggiungono rispettivamente $R^2 = 0,83$ e 0,86, con rapporti di ampiezza prossimi all'unità. Nei settori flottanti la variabilità Up risulta quindi largamente spiegata dalle oscillazioni diurne, mentre le componenti orizzontali presentano in generale una risposta periodica più contenuta. Questo contrasto è coerente con la diversa condizione dinamica dei settori attraversati dalla rete.

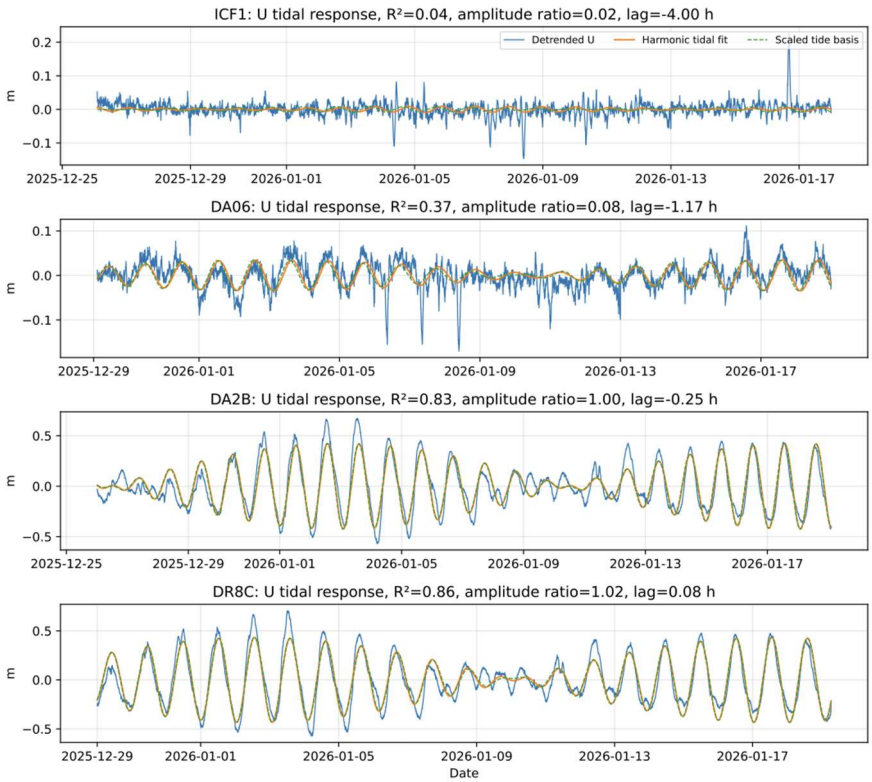

Figura 2 – Esempi di serie verticali GNSS de-trendizzate e ricostruzioni armoniche: ICF1 e DA06 rispetto a DA2B e DR8C.

4. Differenze cinematiche spaziali e aspetti interpretativi

La distribuzione delle velocità orizzontali lungo il corridoio glaciale descrive una progressiva accelerazione verso valle. Il rapporto tecnico indica velocità medie settoriali prossime a 516 m/anno nel gruppo DA2 e a 730 m/anno nel settore DR8, fino a circa 750 m/anno in corrispondenza di DRY7. La comparazione con valori pubblicati per il sistema suggerisce un comportamento compatibile con quello di una lingua flottante a rapido scorrimento; ogni confronto storico richiede tuttavia cautela per le diverse epoche di osservazione, coperture spaziali e tecniche impiegate.

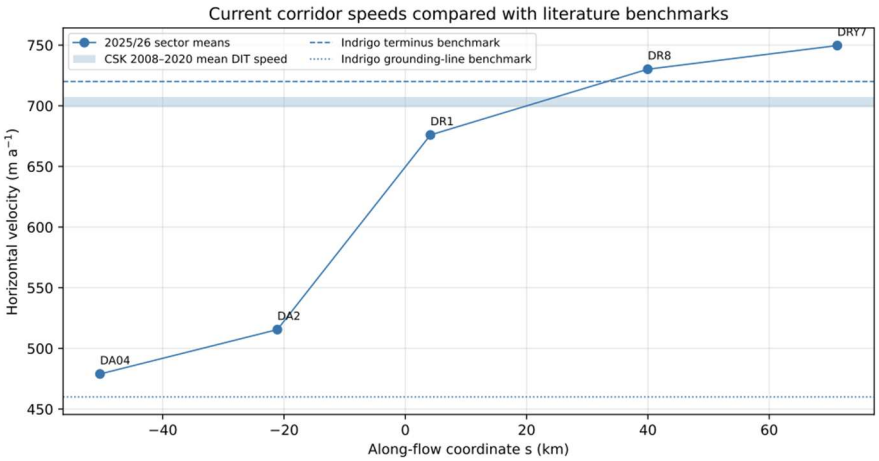

Figura 3 – Velocità orizzontali settoriali della campagna 2025–2026 lungo il flusso e confronto indicativo con riferimenti bibliografici.

L'organizzazione in triplette trasversali consente inoltre di esaminare differenze cinematiche laterali. Nel settore DA2 emerge un gradiente trasversale positivo della velocità lungo flusso (circa 4,35 × 10^{-5} giorno^{-1}), mentre nel settore DR8 risultano relativamente più evidenti le variazioni della componente trasversale. La quasi collinearità delle stazioni, però, rende mal condizionata l'inversione completa del tensore bidimensionale dei gradienti: i risultati sono pertanto interpretati come indicatori monodimensionali, non come misure complete dello stato deformativo. Anche l'analisi di differenze verticali dopo sottrazione delle armoniche mareali richiede una lettura prudente: nel transetto DA2 emergono residui differenziali interessanti, ma la breve durata e le correzioni locali ancora necessarie non consentono di convertirli in stime affidabili di assottigliamento o fusione basale.

5. Integrazione con sismologia e telerilevamento SAR

L'integrazione fra dati GNSS e sismici rappresenta la fase successiva del progetto. La registrazione broadband potrà contribuire a distinguere episodi legati alla fratturazione del ghiaccio, alla dinamica di scorrimento e ai processi prossimi all'interfaccia ghiaccio–substrato; l'analisi congiunta di eventi sismici, velocità GNSS e oscillazioni mareali permetterà di cercare eventuali correlazioni temporali senza assumerle a priori. Parallelamente, il telerilevamento SAR mediante offset tracking e, dove la coerenza delle scene lo consenta, interferometria, sarà utilizzato per costruire campi spazialmente continui di movimento e deformazione. Le misure GNSS serviranno come riferimento indipendente per il controllo dei prodotti satellitari, mentre l'estensione areale SAR aiuterà a contestualizzare le differenze osservate nei transetti.

5.1 Analisi sismologica

Il trattamento preliminare dei dati sismici continui è orientato a ottenere descrittori confrontabili con le serie geodetiche: dalle registrazioni di velocità del suolo vengono derivate serie orarie della densità spettrale di potenza (PSD) e della relativa frequenza di picco. Poiché la marea può modulare tutti questi segnali, sia le serie GNSS sia gli spostamenti al suolo sono trattati con uno stesso modello di regressione rispetto alla previsione di marea, che comprende un termine in fase (risposta elastica), un termine quadratico (risposta non lineare) e le derivate temporali prima e seconda (ritardi di fase). L'applicazione di un modello identico a grandezze fisicamente diverse consente di confrontare i residui su una base comune, in particolare per coppie di stazioni sismiche e GNSS vicine fra loro. Le prime verifiche indicano che questo confronto è informativo e meritevole di approfondimento, anche mediante la stima di variazioni di deformazione e di sforzo a partire dalle serie di velocità; i risultati saranno oggetto di una pubblicazione dedicata. Sul lungo periodo, i dati contribuiranno ad aggiornare il catalogo della sismicità del David Glacier e a individuare eventuali transitori legati a variazioni dell'idrologia subglaciale.

5.2 Telerilevamento SAR

La componente satellitare si basa principalmente sull'archivio Sentinel-1 in modalità Interferometric Wide Swath, che fornisce acquisizioni regolari con rivisitazione di 6–12 giorni lungo il margine antartico. L'offset tracking, basato sull'ampiezza delle immagini, è adatto ai settori a rapido scorrimento ma risente delle striature ionosferiche tipiche delle alte latitudini; l'interferometria differenziale, più accurata nei settori lenti, è limitata dalla perdita di coerenza dove gli spostamenti tra acquisizioni successive sono elevati o dove sono attivi processi di fusione superficiale. Il forte contrasto di velocità tra il flusso glaciale e gli affioramenti rocciosi circostanti costituisce un ulteriore elemento critico per la co-registrazione. In questo quadro le serie GNSS svolgono un duplice ruolo: riferimento indipendente per la validazione dei campi di velocità e fonte di informazione sulla variabilità di breve periodo che i campi mediati su più giorni non possono risolvere. L'esperienza maturata con immagini COSMO-SkyMed Stripmap, il cui confronto con le velocità GNSS aveva mostrato un buon accordo (Vittuari et al., 2023), costituisce la base per l'estensione a serie temporali dense. Le coordinate delle stazioni, comprese quelle collocate in posizioni già misurate in passato, saranno inoltre utilizzate come punti di controllo per il modello altimetrico REMA (Howat et al., 2019), impiegato come superficie di riferimento per l'elaborazione SAR e, con ipotesi sulla densità del ghiaccio e dell'acqua marina, per una stima idrostatica dello spessore immerso della lingua.

6. Indicazioni metodologiche per la geomatica in ambiente polare

Al di là degli specifici risultati glaciologici, l'esperienza di ICEGIANT fornisce alcune indicazioni di interesse generale per la geomatica applicata ad ambienti estremi. In primo luogo, l'integrazione di tecniche eterogenee richiede un'armonizzazione

esplicita dei riferimenti: un sistema di riferimento globale comune per le soluzioni GNSS e i prodotti SAR, una scala temporale unica per serie geodetiche e registrazioni sismiche, e una descrizione coerente della forzante mareale, basata su previsioni armoniche e, ove disponibili, su osservazioni mareografiche locali. In secondo luogo, la geometria della rete va progettata in funzione delle grandezze da stimare: transetti trasversali e longitudinali favoriscono il confronto tra settori, ma la stima completa di gradienti di velocità bidimensionali richiede configurazioni non collineari, da considerare nella pianificazione delle prossime installazioni. Infine, la combinazione di stazioni ad alta risoluzione temporale ma copertura puntuale con prodotti satellitari a copertura areale ma rivisitazione più rada suggerisce un modello di monitoraggio multi-scala, nel quale ciascuna tecnica valida e completa le altre. I dataset prodotti, corredati da metadati di stazione e di elaborazione, sono destinati a costituire un riferimento quantitativo per il confronto con future osservazioni e con i modelli di dinamica glaciale.

7. Conclusioni e prospettive

ICEGIANT ha realizzato un'infrastruttura di osservazione multiparametrica in uno dei settori glaciali più dinamici dell'Antartide orientale. Le prime analisi GNSS descrivono una netta transizione nella risposta verticale alla marea tra settore prossimo all'ancoraggio e lingua flottante, un aumento delle velocità lungo flusso e differenze laterali che potranno guidare successive analisi deformative. I risultati documentano già il valore della rete per la geomatica polare, ma indicano anche limiti interpretativi da rispettare: la risposta mareale non coincide con la fusione basale e la geometria delle triplette non risolve da sola un campo deformativo bidimensionale completo. Le quattro postazioni GNSS e le tre stazioni sismiche lasciate in sito, insieme al futuro confronto con i prodotti SAR, permetteranno di verificare la persistenza di questi segnali e di approfondire i meccanismi responsabili delle variazioni osservate.

Le prossime fasi prevedono il recupero, nella campagna 2026–2027, delle stazioni GNSS e sismiche lasciate in sito, che consentirà di estendere l'analisi a più cicli mareali quattordicinali, di verificare l'eventuale presenza di segnali stagionali e di confrontare, nei siti rioccupati, le velocità attuali con quelle delle campagne storiche. Parallelamente proseguiranno l'analisi congiunta geodetico-sismica e l'elaborazione delle serie Sentinel-1, con l'obiettivo di passare da una descrizione per punti e transetti a una lettura spazialmente continua della dinamica del sistema.

Ringraziamenti

I risultati presentati in questo articolo sono stati ottenuti nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), che ha fornito supporto finanziario e logistico nell'ambito del Progetto ICEGIAN PNRA0000060.

Bibliografia

Cappuccio, M., Del Ciondolo, G., Zanutta, A., Negusini, M., Mokhtari, S., Gandolfi, S., & Vittuari, L. (2026). Impact of PPP ambiguity resolution on Antarctic glacier GNSS time series: Comparison with network-based and PPP ambiguity-float solutions. In *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/1345_2026_359.

Danesi, S., Salimbeni, S., Borghi, A., Urbini, S., Zirizzotti, A., & Frezzotti, M. (2025). Ice mass discharge through the Antarctic subglacial hydrographic network as a trigger for cryoseismicity. *Journal of Glaciology, 71*, e89. https://doi.org/10.1017/jog.2025.10062.

Frezzotti, M., Tabacco, I. E., & Zirizzotti, A. (2000). Ice discharge of eastern Dome C drainage area, Antarctica, determined from airborne radar survey and satellite image analysis. *Journal of Glaciology, 46*(153), 253–264. https://doi.org/10.3189/172756500781832855.

Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J., & Zhang, K. (2019). PRIDE PPP-AR: An open-source software for GPS PPP ambiguity resolution. *GPS Solutions, 23*, 91. https://doi.org/10.1007/s10291-019-0888-1.

Howat, I. M., Porter, C., Smith, B. E., Noh, M.-J., & Morin, P. (2019). The Reference Elevation Model of Antarctica. *The Cryosphere, 13*, 665–674. https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019.

Indrigo, C., Dow, C. F., Greenbaum, J. S., & Morlighem, M. (2021). Drygalski Ice Tongue stability influenced by rift formation and ice morphology. *Journal of Glaciology, 67*(262), 243–252. https://doi.org/10.1017/jog.2020.99.

Rignot, E. (2002). Mass balance of East Antarctic glaciers and ice shelves from satellite data. *Annals of Glaciology, 34*, 217–227. https://doi.org/10.3189/172756402781817419.

Vittuari, L., Zanutta, A., Lugli, A., Martelli, L., & Dubbini, M. (2023). Sea tide influence on ice flow of David Drygalski's Ice Tongue inferred from geodetic GNSS observations and SAR offset tracking analysis. *Remote Sensing, 15*(8), 2037. https://doi.org/10.3390/rs15082037.