

istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

***Monitoraggio DInSAR di aree vulcaniche***  
**Monitoraggio di Vulcano e Stromboli**

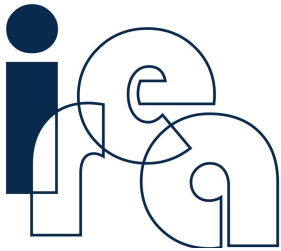
**Analisi DInSAR di Stromboli tramite dati Sentinel-1**  
**Aggiornamento al 22 agosto 2024**

Gruppo di lavoro:

Manuela Bonano, Francesco Casu, Claudio De Luca, Riccardo Lanari, Michele Manunta, Fernando Monterroso, Giovanni Onorato, Yenni Lorena Belen Roa, Pasquale Striano, Muhammad Yasir, Ivana Zinno

Rif: WP1\_EOLI\_SNT\_24\_08\_S

27 agosto 2024



istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

## Sintesi

La presente relazione fornisce una descrizione degli spostamenti del suolo misurati nell'isola di Stromboli, nel periodo 24 aprile 2015 – 22 agosto 2024, mediante tecniche di Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) applicate ai dati acquisiti dai sensori Sentinel-1 del programma europeo Copernicus.

Lo stato delle osservazioni si può riassumere come segue:

- Il segnale di deformazione in abbassamento della parte sommitale della Sciara del Fuoco, registrato in seguito al parossismo del 3 luglio 2019, mostra un andamento stazionario nel tempo fino ad ottobre 2022.
- Da ottobre del 2022 a fine giugno 2024, nella parte più prossima alla sommità, si registra un incremento dell'abbassamento e dello spostamento verso ovest. In particolare, dopo un'accelerazione iniziale, il tasso di spostamento verticale diventa pressoché costante da gennaio 2023 con un'entità di circa -5,5 cm/anno. In quest'area dal 1° ottobre 2022 al 29 giugno 2024 si misura un abbassamento massimo di circa 11 cm e uno spostamento verso ovest di circa 8 cm.
- A causa degli eventi di inizio luglio 2024, gli interferogrammi a cavallo di tale periodo mostrano un elevato rumore di decorrelazione nella fase interferometrica su un'ampia porzione dell'isola. Ciò indica in generale un cambiamento della scena dal punto di vista elettromagnetico.
- Di conseguenza si riscontra un'elevata rumorosità della serie temporale di spostamento a cavallo degli eventi di inizio luglio 2024, rendendo quindi la misura poca accurata.
- Di contro, negli interferogrammi che coinvolgono acquisizioni successive agli eventi di inizio luglio 2024, si nota una riduzione del rumore e quindi un progressivo incremento della coerenza e dell'affidabilità della misura. Saranno ad ogni modo necessarie ulteriori acquisizioni per comprendere gli andamenti dello spostamento post-evento.
- L'analisi dei singoli interferogrammi acquisiti lungo orbita discendente, relativi al periodo 17 luglio 2024 – 22 agosto 2024, mostra che non sono visibili segnali di fase chiaramente riconducibili a deformazione alla scala del vulcano.

### Analisi degli interferogrammi e delle serie temporali di deformazione

Lo Stromboli è interessato da uno spostamento pressoché continuo lungo il versante occidentale dell'isola, caratterizzato da una componente di subsidenza ed una orizzontale (lungo la direzione est-ovest) verso occidente.

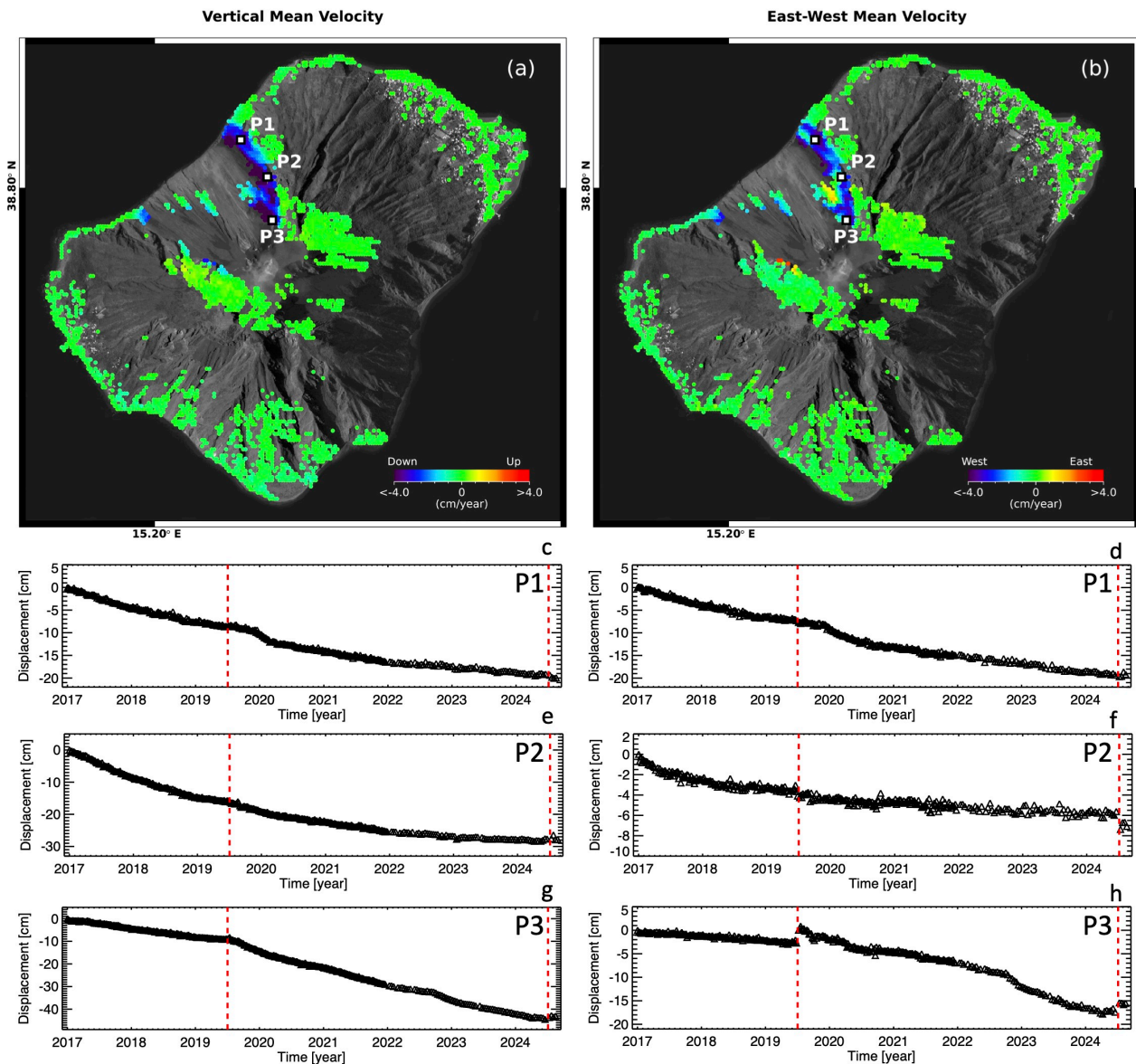


Figura 1. Mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione relative al periodo 24 aprile 2015 – 22 agosto 2024 generate a partire da dati Sentinel-1. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest. c-h) Andamento temporale della deformazione lungo la direzione Verticale (c)(e)(g) ed Est-Ovest (d)(f)(h) in corrispondenza di tre punti identificati come P1, P2 e P3 in (a)-(b) nel periodo gennaio 2017 – 22 agosto 2024. Le linee rosse tratteggiate indicano il parossismo del 3 luglio 2019 e gli eventi di inizio luglio 2024.

In Figura 1 sono mostrate le serie temporali di deformazione, relative ad alcuni punti della Sciara del Fuoco, a partire dal 2017 fino al 22 agosto 2024. Si può notare come le zone lungo costa del settore settentrionale siano interessate da un andamento della deformazione (punto P1 in Figura 1a-b) la cui entità non è stata influenzata in maniera significativa dagli eventi parossistici di luglio e agosto 2019 (l'evento del 3 luglio 2019 è indicato con una linea rossa

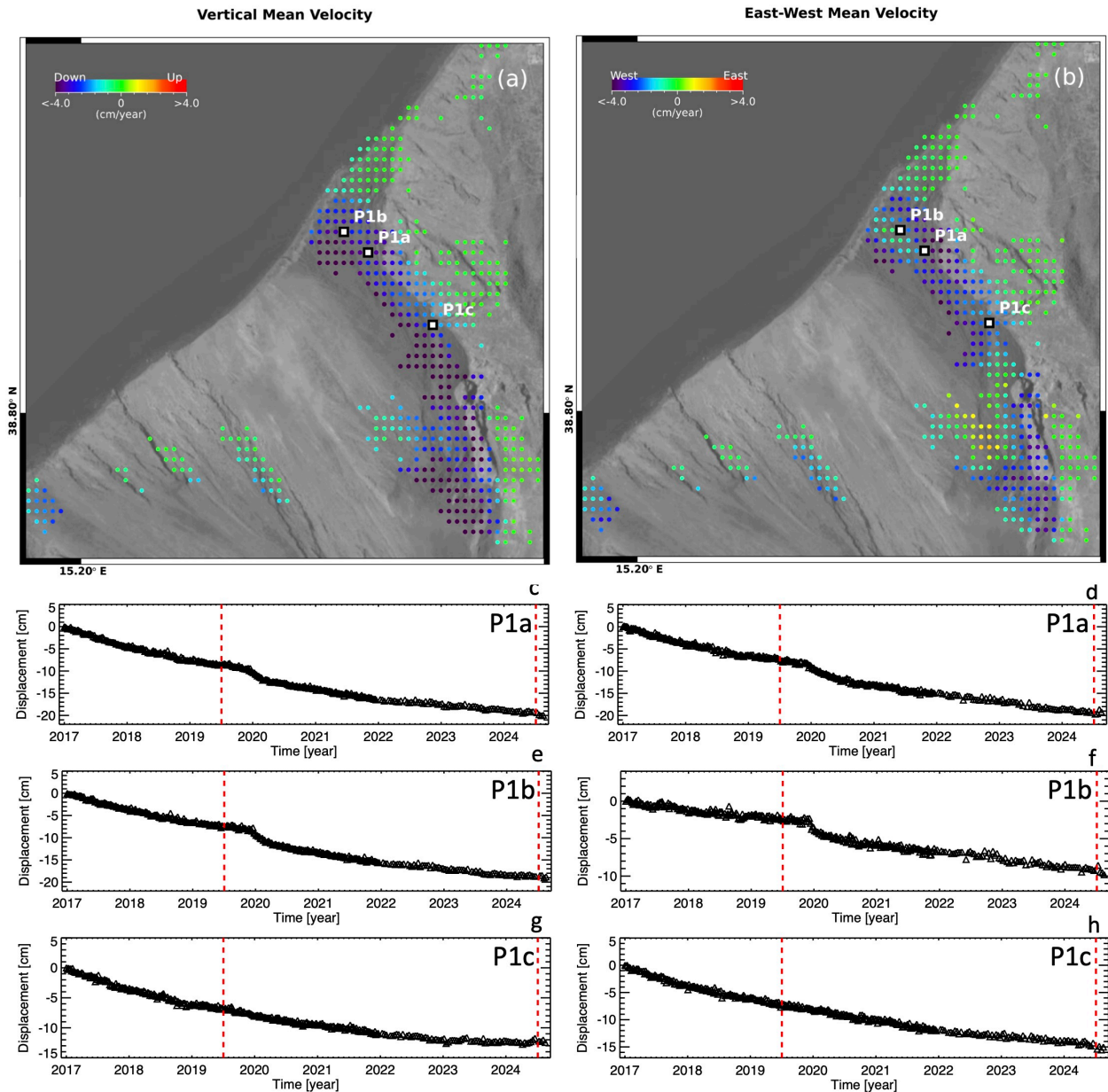


Figura 2. Mappe delle componenti Verticale ed Est-Ovest della velocità media di deformazione dell'area settentrionale della Sciara del Fuoco relative al periodo 24 aprile 2015 – 22 agosto 2024. a) Componente Verticale. b) Componente Est-Ovest. c-h) Andamento temporale della deformazione lungo la direzione Verticale (c)(e)(g) ed Est-Ovest (d)(f)(h) in corrispondenza di tre punti identificati come P1a, P1b e P1c in (a)-(b) nel periodo gennaio 2017 – 22 agosto 2024. Le linee rosse tratteggiate indicano il parossismo del 3 luglio 2019 e gli eventi di inizio luglio 2024.

tratteggiata nei grafici di Figura 1), come evidenziato dall'evoluzione temporale della deformazione, sia nella componente verticale (Figura 1c) sia est-ovest (Figura 1d).

Sempre nell'area costiera, nel periodo dicembre 2019 – febbraio 2020 è stato rilevato un incremento dei tassi di deformazione sia verticale (Figura 1c) sia est-ovest (Figura 1d). Dall'analisi di Figura 2 si nota che l'entità di tale tasso di spostamento (abbassamento) nel periodo dicembre 2019 – febbraio 2020 è di circa 1 cm/mese, mentre da marzo 2020 fino al 22 agosto 2024 il tasso è pressoché costante con valori della velocità verticale media di poco inferiori a 2 cm/anno. L'area della Sciara del Fuoco interessata da questo cambio di *trend* deformativo è confinata alla parte più vicina alla costa. A tal riguardo, infatti, in Figura 2g-h sono presentati due grafici che rivelano come l'andamento della deformazione non mostri variazioni significative per aree lontane dalla costa.

A quote intermedie (Punto P2 in Figura 1a-b), il segnale mostra sempre una componente di subsidenza (Figura 1e) ed una orizzontale verso occidente (Figura 1f). In quest'area tuttavia si nota una variazione del segnale in corrispondenza degli eventi di inizio luglio 2024 (indicati da una linea tratteggiata rossa al termine della serie temporale) accompagnato da un'elevata rumorosità. Si rimanda ai paragrafi successivi per alcune considerazioni su questo aspetto.

Per quanto riguarda l'area più vicina alla sommità (punto P3 in Figura 1a-b), come già evidenziato nelle relazioni precedenti, la stessa presenta, successivamente al 3 luglio 2019, un incremento del tasso di deformazione rispetto al periodo precedente. In particolare, la componente verticale (Figura 1g) mostra uno spostamento massimo verso il basso di circa 36 cm dal 3 luglio 2019 al 29 giugno 2024. La componente Est-Ovest (Figura 1h) è più rumorosa nei mesi immediatamente successivi al 3 luglio 2019 per poi tornare, entro la prima metà del 2020 e fino a ottobre 2022, a valori dei tassi simili al periodo precedente.

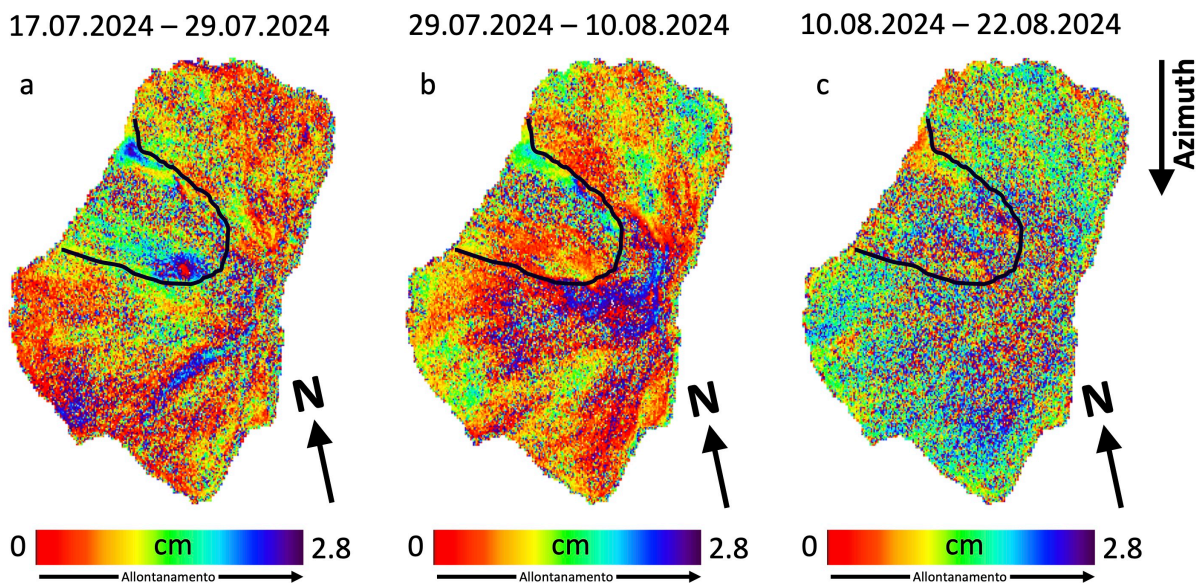
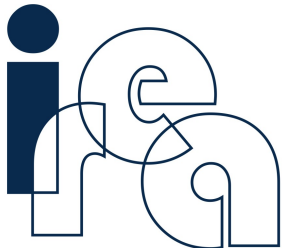


Figura 3. Interferogrammi differenziali, in geometria radar, generati a partire da dati acquisiti lungo orbite discendenti dai sensori Sentinel-1. Gli interferogrammi utilizzano i dati acquisiti a partire dal 17 luglio 2024 fino al 22 agosto 2024. In nero sono indicati i confini della Sciara del Fuoco, per riferimento.



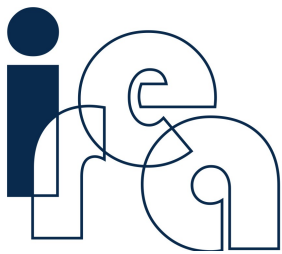
istituto per il rilevamento  
elettromagnetico  
dell'ambiente

Sempre nell'area più prossima alla sommità (punto P3 in Figura 1a-b, grafici in Figura 1g-h), a partire da ottobre del 2022 si registra un incremento dell'abbassamento e dello spostamento verso ovest. In particolare, dopo un'accelerazione iniziale, il tasso di spostamento verticale è pressoché costante da gennaio 2023 a giugno 2024 con un'entità di circa -5,5 cm/anno. In quest'area dal 1° ottobre 2022 al 29 giugno 2024 si misura un abbassamento massimo di circa 11 cm e uno spostamento verso ovest di circa 8 cm.

Inoltre, nell'area più prossima alla sommità, a seguito degli eventi di inizio luglio 2024, si riscontra un'elevata rumorosità delle serie temporali di spostamento (Figura 1g-h), come in precedenza evidenziato per i punti a quote intermedie (Figura 1e-f). Infatti, gli interferogrammi a cavallo di tale periodo mostrano un elevato rumore di decorrelazione su un'ampia porzione dell'isola, indicando in generale un cambiamento della scena dal punto di vista elettromagnetico. Di conseguenza, le serie temporali di spostamento a cavallo degli eventi di inizio luglio 2024 presentano un elevato grado di incertezza, rendendo quindi la misura poco accurata.

Di contro, negli interferogrammi che coinvolgono acquisizioni successive agli eventi di inizio luglio 2024 (Figura 3), si nota una riduzione del rumore e quindi un progressivo incremento della coerenza. Le serie temporali riacquistano quindi maggiore accuratezza successivamente al luglio 2024, ma saranno necessarie ulteriori acquisizioni per comprendere gli andamenti dello spostamento post-evento.

Infine, l'analisi dei singoli interferogrammi acquisiti lungo orbita discendente, relativi al periodo 17 luglio 2024 - 22 agosto 2024 (Figura 3a-c), mostra che non sono visibili segnali di fase chiaramente riconducibili a deformazione del suolo alla scala del vulcano.



## Appendice A

### Stato delle acquisizioni Sentinel-1 utilizzate e dettagli tecnici dell'elaborazione DInSAR

La deformazione superficiale dell'isola di Stromboli è stata studiata tramite i dati acquisiti dai sensori SAR della costellazione Sentinel-1. Dal 23 dicembre 2021 in poi il satellite Sentinel-1B non ha più acquisito a causa di un problema all'alimentazione del sistema radar. Di conseguenza, successivamente a questo evento, per generare le serie temporali delle componenti verticale ed est-ovest della deformazione, sono state utilizzate le acquisizioni del solo Sentinel-1A fino al 16 agosto 2024 per le orbite ascendenti, e al 22 agosto 2024 per quelle discendenti. Nello specifico sono state impiegate 431 immagini SAR acquisite da orbite ascendenti (*Track* 44) e 429 da quelle discendenti (*Track* 124). È stata inoltre considerata l'acquisizione del 22 agosto da orbite discendenti solamente per la generazione degli interferogrammi a cavallo degli eventi di inizio luglio 2024.

In Tabella A1 sono riassunte le principali caratteristiche dei dati Sentinel-1 utilizzati. In Figura A1 è mostrata la distribuzione delle acquisizioni nel piano Tempo/Baseline Perpendicolare nell'intervallo temporale 24 aprile 2015 – 22 agosto 2024. Da questi dati sono state generate, per ciascun'orbita, le relative serie temporali di deformazione e le mappe di velocità media nella linea di vista del sensore (LOS), sfruttando l'algoritmo di interferometria SAR differenziale denominato SBAS (Small Baseline Subset) [1]. Per l'elaborazione SBAS è stato impiegato un DEM SRTM dell'area con una risoluzione spaziale di 30 m. Sia gli interferogrammi differenziali sia le successive mappe e serie storiche di deformazione hanno una risoluzione spaziale di circa 30 m, ottenuta a valle di un'operazione di *multilooking*. La disponibilità di informazioni da entrambe le orbite (ascendente e discendente) ha permesso di scomporre lo spostamento in LOS osservabile dal SAR lungo le direzioni Verticale ed Est-Ovest, seguendo l'approccio presentato in [2] (si noti che la proiezione della componente Nord-Sud dello spostamento lungo la linea di vista del sensore è trascurabile, dal momento che i satelliti percorrono orbite polari). Essendo lo scarto temporale fra passaggi ascendenti e discendenti di circa 12 ore e assumendo che la variazione di deformazione sia trascurabile in un intervallo così breve, è stato possibile combinare le singole acquisizioni ascendenti e discendenti per generare le serie temporali delle componenti di deformazione Verticale ed Est-Ovest. Ciò è valido da settembre 2016 al 23 dicembre 2021, in concomitanza della piena operatività di Sentinel-1B. Per i periodi

Tabella A1		
Caratteristiche principali dei dati <b>S1</b> utilizzati per l'analisi interferometrica		
	Ascendente	Discendente
Lunghezza d'onda	5,5 cm	
Modalità di acquisizione	Terrain Observation by Progressive Scans	
Angolo di vista a centro scena	~39°	
Risoluzione spaziale dato interferometrico	~30 m x 30 m	
Track	44	124
Periodo di osservazione	30/04/2015 – 16/08/2024	24/04/2015 – 22/08/2024
Numero di acquisizioni	431	429

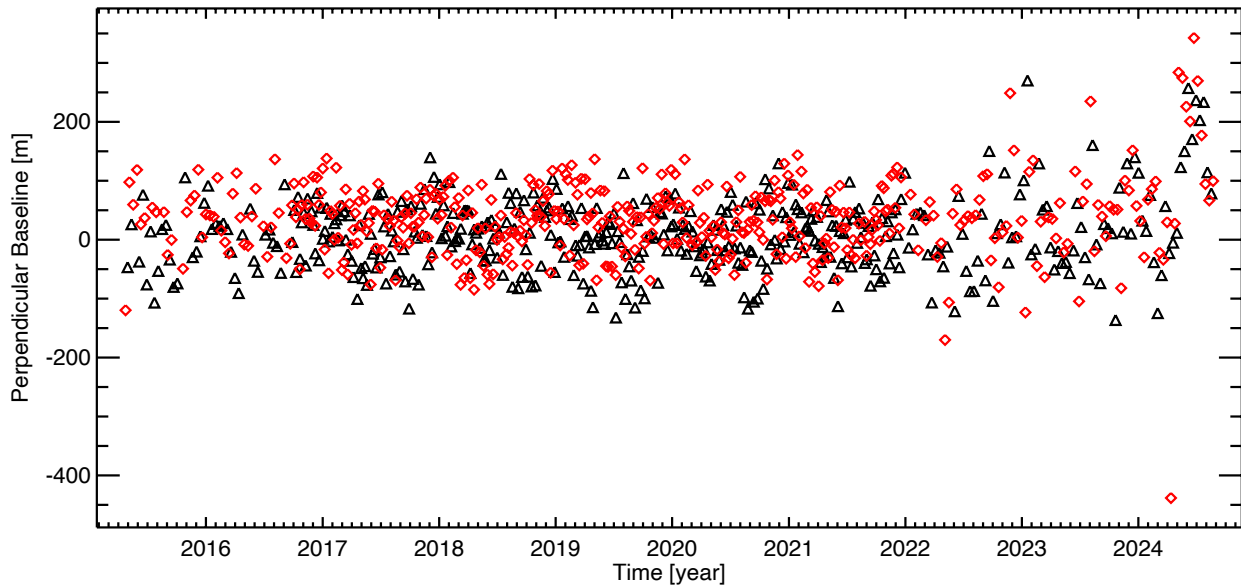


Figura A1. Distribuzione nel piano Tempo/Baseline Perpendicolare dei dati SAR Sentinel-1 utilizzati per l'analisi interferometrica SBAS. In nero e rosso sono rappresentati i dati acquisiti, rispettivamente, da orbite ascendenti e discendenti.

antecedente (aprile 2015 – settembre 2016) e successivo, per i quali si dispone di un unico sensore, si è assunto che la variazione di deformazione fra acquisizioni ascendenti e discendenti in 6 giorni fosse trascurabile. In generale, tali assunzioni sono valide nel momento in cui non avvengono deformazioni improvvise e di elevata entità (ad esempio terremoti di elevata magnitudo o eruzioni) nel periodo che intercorre fra i due passaggi, come nel caso in esame. Infine si rimarca che le misure sono riferite ad un punto individuato nell'abitato dell'isola.

### Riferimenti

- [1] P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 40, no. 11, pp. 2375–2383, Nov. 2002.
- [2] F. Casu and A. Manconi, "Four-dimensional surface evolution of active rifting from spaceborne SAR data", *Geosphere*, 2016, doi: 10.1130/GES01225.1.