

RAPPORTI TECNICI INGV

Installazione di dispositivi DAS per
il potenziamento del monitoraggio
dei Campi Flegrei



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

489

Direttore Responsabile

Daniela VERSACE

Editor in Chief

Milena MORETTI (editorinchief.collane-editoriali@ingv.it)

Editorial Board

Laura ALFONSI (laura.alfonsi@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Simona CARANNANTE (simona.carannante@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Luca COCCHI (luca.cocchi@ingv.it)
Luigi CUCCI (luigi.cucci@ingv.it)
Lorenzo CUGLIARI (lorenzo.cugliari@ingv.it)
Alessia DI CAPRIO (alessia.dicaprio@ingv.it)
Roberto DI MARTINO (roberto.dimartino@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Domenico DORONZO (domenico.doronzio@ingv.it)
Filippo GRECO (filippo.greco@ingv.it)
Alessandro IAROCCI (alessandro.iarocci@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Daniele MELINI (daniele.melini@ingv.it)
Anna NARDI (anna.nardi@ingv.it)
Lucia NARDONE (lucia.nardone@ingv.it)
Marco OLIVIERI (marco.olivieri@ingv.it)
Pierangelo ROMANO (pierangelo.romano@ingv.it)
Maurizio SOLDANI (maurizio.soldani@ingv.it)
Sara STOPPONI (sara.stopponi@ingv.it)
Umberto TAMMARO (umberto.tammaro@ingv.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)
Stefano URBINI (stefano.urbini@ingv.it)

Ufficio Editoriale

Francesca DI STEFANO - Coordinatore - Segreteria di Redazione

Produzione e grafica-redazionale

Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia | Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Installazione di dispositivi DAS per il potenziamento del monitoraggio dei Campi Flegrei

Distributed Strain Sensing devices to enhance monitoring of the Campi Flegrei area

Gilda Currenti^{*1}, Daniele Pellegrino¹, Mario Pulvirenti¹, Michele Prestifilippo¹,
Martina Allegra^{1,2}, Flavio Cannavò¹, Miriana Corsaro^{1,2}, Marcello D'Agostino¹, Philippe Jousset³

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo

²Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Catania, Catania

³GFZ | German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

**Corresponding author*

Accettato 30 ottobre 2024 | Accepted 30 October 2024

Come citare | How to cite Currenti G., Pellegrino D., Pulvirenti M., Prestifilippo M., Allegra M., Cannavò F., Corsaro M., D'Agostino M., Jousset P., (2025). Installazione di dispositivi DAS per il potenziamento del monitoraggio dei Campi Flegrei. Rapp. Tec. INGV, 489: 1-20, <https://doi.org/10.13127/rpt/489>

In copertina Particolare tratto da dati DAS durante lo sciame sismico del 11 febbraio 2024 | Cover Detail from DAS data during the seismic swarm on 11 February 2024

489

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Misure distribuite in fibra ottica ai Campi Flegrei	9
1.1 Individuazione cavi in fibra ottica	9
1.2 Installazione della strumentazione	9
1.3 Acquisizione delle misure	10
1.4 Georeferenziazione dei punti di misura DAS	12
2. Trasmissione ed Archiviazione dei Dati	12
3. Analisi Preliminari	13
4. Discussioni e conclusione	15
Bibliografia	16

Riassunto

Misure distribuite di strain su fibre ottiche hanno dimostrato la loro efficacia per la registrazione e la localizzazione di terremoti, soprattutto su reti esistenti in fibra ottica usate per le telecomunicazioni. In aree urbane, dove l'impiego di sismometri convenzionali è particolarmente impegnativo, sia per la ricerca di siti adeguati e sia per le condizioni di elevato rumore antropico, l'uso di questa metodologia di misura è particolarmente interessante per trasformare rapidamente le dense reti di telecomunicazioni in fibra ottica in array di sensori. In questo lavoro sono descritte le attività di installazione dei dispositivi, dell'acquisizione dei dati e dell'analisi dei segnali nell'area vulcanica napoletana di Napoli e Campi Flegrei, Italia. Per contribuire al potenziamento del monitoraggio della nuova crisi (aumento dell'attività sismica e della deformazione) osservata dal 2005, sono stati interrogati due cavi in fibra ottica per telecomunicazioni che attraversavano l'area sismica attiva dei Campi Flegrei utilizzando due interrogatori DAS (Distributed Acoustic Sensing) per 4 mesi (ottobre 2023 - febbraio 2024). È stato collegato un interrogatore A1 (Febus) a Bagnoli Centrale Telecom ad un cavo ottico per le telecomunicazioni di ~20 km che attraversa la caldera dei Campi Flegrei e un interrogatore iDAS (Silixa) a Napoli Centrale ad un cavo lungo ~430 km in parte via terra da Napoli fino alla zona costiera (~23 km) ed in ambiente sottomarino verso Salerno e il Sud Italia. È stato progettato un protocollo per scaricare automaticamente i file corrispondenti agli orari dei terremoti registrati nel catalogo dell'INGV-OV per l'analisi dei dati DAS. Grazie alla fitta copertura spaziale delle registrazioni, si è osservato che le misure distribuite di strain sulle fibre interrogate sono idonee a rilevare gli eventi sismici con una buona prestazione, rilevando 537 eventi sui 567 riportati nel catalogo dell'INGV. Inoltre, durante gli sciami sismici sui dati DAS è stato possibile osservare il rapido susseguirsi di un numero maggiore di eventi che sono difficili da individuare singolarmente sulle tracce sismiche. Il protocollo implementato è il primo passo verso l'utilizzo di misure distribuite di strain su fibre ottiche per il monitoraggio in tempo reale di aree sismiche attive e per il suo potenziamento durante crisi sismiche.

Abstract

Distributed dynamic strain sensing has been demonstrated to be useful to record and locate earthquakes, in particular using existing Telecom fibre optic networks. In urban areas, as the deployment of conventional seismometers is particularly challenging, mainly because of high noise conditions and difficulties in finding adequate locations, the existence of fibre optic telecom network to be repurposed as array of seismic sensors makes DFOS (Distributed Fiber Optic Sensing) attractive. Here we report observations in the Napolitean volcanic area of Napoli and Campi Flegrei, Italy. In order to enhance the monitoring of the current unrest (increased seismic activity and deformation) observed since 2005, we interrogated two telecom fibre optic cables crossing the Campi Flegrei active seismic area using two DAS (Distributed Acoustic Sensing) interrogators for 4 months (October 2023 - February 2024). We connected an A1 (Febus) interrogator in Bagnoli Centrale Telecom to a ~20 km telecom cable crossing Campi Flegrei caldera and an iDAS (Silixa) interrogator in Napoli Centrale to a ~430 km long cable partly on-land from Napoli until the coastal area (~23 km) and in submarine environment toward Salerno and Southern Italy. We designed a protocol to automatically download files corresponding to the earthquake times provided by the INGV-OV catalog for further analysis in Catania. Thanks to the dense spatial coverage of the records, we show that the cables are suitable to detect earthquakes (537 events) over those reported in the INGV catalog (567 events). We find that swarms of events occur, where single events are better detected on the DAS data with respect to conventional seismic records.

Our protocol is the first step demonstrating that fibre optic sensing can be used in real time to help monitoring of increased seismic activity.

Keywords Potenzamento del monitoraggio sismico; Misure distribuite in fibra ottica; Crisi sismiche | Enhancement of seismic monitoring; Distributed fiber optic sensing; Seismic crises

Introduzione

Il monitoraggio e la caratterizzazione della sismicità è spesso limitato dall'impossibilità di installare un elevato numero di sensori per coprire adeguatamente le aree di indagine. Attualmente, questa limitazione può essere superata mediante l'applicazione di tecniche di misura basate sul Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS), che trasforma la fibra ottica in un sensore sismico distribuito [Miah and Potter, 2017]. Mediante dispositivi optoelettronici è possibile misurare variazioni di strain dinamico lungo ogni punto della fibra attraverso l'invio di un impulso laser e la ricezione del segnale retrodiffuso [Hartog, 2017]. Dall'analisi del segnale retrodiffuso (frequenza, fase e ampiezza) i dispositivi DFOS consentono di misurare variazioni di strain dinamico prodotte da sorgenti sismo-acustiche lungo la fibra e fornire misure ad elevata risoluzione spaziale (fino a decine di centimetri) e temporale in un'ampia banda di frequenza (dai 1 mHz fino ai kHz). La distanza massima di indagine della maggior parte dei dispositivi varia attualmente da decine a centinaia di km. In particolare, i dispositivi DFOS ad oggi disponibili interrogano fibre spente ("dark fibers"), ovvero non utilizzate per la trasmissione dati. Questa tecnologia è stata ampiamente utilizzata per l'esplorazione e il monitoraggio di giacimenti petroliferi e di gas, e recenti sono gli esperimenti pilota in ambito sismologico [Lindsey et al., 2017; Jousset et al., 2018], vulcanologico [Currenti et al., 2021; 2023; Jousset et al., 2022] e in ambiente sottomarino [Sladen et al., 2019; Williams et al., 2018; Lindsey et al., 2019; Currenti et al., 2023].

Grazie alla natura distribuita della tecnica di misura, è possibile intensificare rapidamente il numero di misure con l'installazione di un dispositivo DFOS che interroghi più fibre spente nell'area di indagine, trasformando la rete in fibra ottica, già esistente sul territorio nazionale, in una rete distribuita di sensori per il monitoraggio delle deformazioni del suolo. Le recenti collaborazioni tra INGV e i gestori di rete in fibra ottica hanno comprovato la fattibilità e l'efficienza nella realizzazione in tempi rapidi di misure DFOS su diverse fibre ottiche della rete nazionale italiana [Napoli et al., 2021; Krawczyk et al., 2021; Currenti et al., 2023]. Questi risultati hanno dimostrato l'importanza dell'uso di questa tecnologia soprattutto per il potenziamento del monitoraggio durante crisi sismiche e vulcaniche, dove un rapido intervento è di fondamentale importanza [Li et al., 2021].

Questo rapporto descrive le attività eseguite per l'installazione di dispositivi DAS (Distributed Acoustic Sensing, una tipologia di sensori DFOS) presso le centrali TELECOM al fine di potenziare il monitoraggio sismico dell'area dei Campi Flegrei. È stata utilizzata la rete in fibra ottica esistente nell'area per implementare rapidamente un esteso array sismico. I dispositivi DAS, comunemente chiamati anche solo DAS, hanno interrogato due fibre ottiche per misurare le vibrazioni del suolo lungo il loro percorso ad una elevata risoluzione spaziale. I dati acquisiti permettono di valutare il contributo che questa nuova tecnologia offre nel migliorare la rilevazione della sismicità nell'area flegrea e l'accuratezza delle localizzazioni. I dati contribuiranno inoltre a definire meglio la struttura crostale e i relativi sistemi di faglie nell'area.

1. Misure distribuite in fibra ottica ai Campi Flegrei

L'acquisizione di misure con dispositivi DAS nell'area flegrea ha richiesto: (i) l'esplorazione e l'individuazione di cavi in fibra ottica presenti nell'area di interesse, (ii) l'installazione dei dispositivi, (iii) la definizione dei parametri di misura, (iv) la georeferenziazione dei punti di misura lungo la fibra.

1.1 Individuazione cavi in fibra ottica

Per l'individuazione dei cavi in fibra ottica, si è deciso di contattare TELECOM, che gestisce un'ampia rete sul territorio italiano. A TELECOM è stata fornita una mappa della sismicità registrata dalla rete sismica permanente INGV nei mesi di settembre – ottobre 2023 (<https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei/index.html>) al fine di esplorare la presenza di cavi nell'area di interesse. Considerata la disponibilità di fibra ottica spenta utilizzabile per misure DAS, TELECOM ha offerto la possibilità di interrogare due cavi in fibra ottica (Figura 1). La prima (F1) è accessibile presso la centrale di Bagnoli, costeggia la Solfatara, attraversa il centro abitato di Pozzuoli e raggiunge Bacoli per una lunghezza totale di 19.9 km. La seconda (F2), intestata presso la centrale storica di Napoli-Tupputi, raggiunge Pozzuoli dove transita sullo stesso percorso della prima fibra, costeggia il lago d'Averno, raggiunge la costa e prosegue in mare verso Salerno. Il tratto terrestre è lungo circa 22.8 km, mentre quello sottomarino è lungo 434 km.

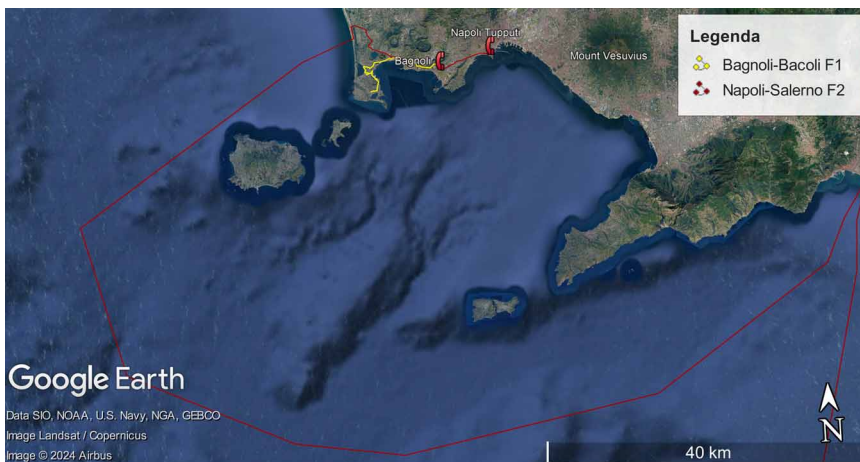


Figura 1 Mappa dell'area di studio e cavi in fibra ottica della rete Telecom nelle tratte Bagnoli-Bacoli (F1) e Napoli-Salerno (F2).

Figure 1 Map of the study area and fiber optic cables of the Telecom network along the paths Bagnoli-Bacoli (F1) and Napoli-Salerno (F2).

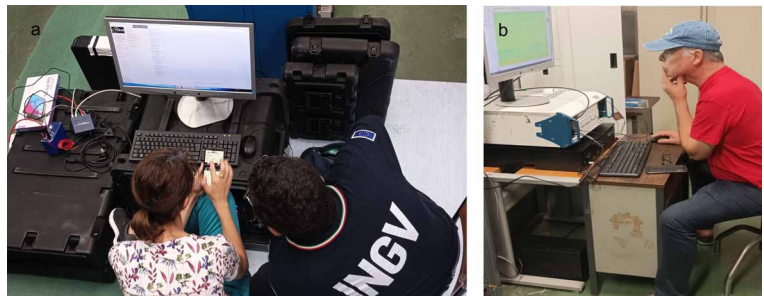
1.2 Installazione della strumentazione

A seguito della concessione da parte di TELECOM dell'autorizzazione all'utilizzo di queste due fibre ottiche per eseguire le misure DAS, si è proceduto alla pianificazione e realizzazione dell'esperimento. Il primo interrogatore DAS, un Febus A1 in dotazione all'INGV, è stato installato presso la centrale TELECOM di Bagnoli il 19 ottobre 2023, mentre il secondo, un iDAS (Silixa), messo a disposizione dal GFZ-Potsdam, è stato installato presso la centrale di Napoli-Tupputi il 20 ottobre 2023. Prima dell'installazione TELECOM ha provveduto a bonificare giunzioni e connettori lungo le due tratte per ridurre possibili riflessioni e attenuazioni del segnale. I DAS sono stati connessi alla fibra ottica tramite un *pigtail* con connettore E2000/APC lato DAS e una giunzione a fusione lato rete. Sono state eseguite ulteriori misure OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) per verificare la qualità del segnale e l'assenza di attenuazioni e riflessioni.

Presso entrambe le centrali sono stati installati un'antenna GPS per la sincronizzazione delle misure e un modem per la gestione da remoto del dispositivo e la trasmissione dati. Data la grande mole di dati prodotta dai sistemi di misura DAS (vedi 1.3), per garantire un lungo periodo di acquisizione sono stati collegati al Febus e all'iDAS due NAS (Network Attached Storage) della capienza di 100 TB e di 80 TB, rispettivamente. L'installazione dei dispositivi presso le Centrali TELECOM ha garantito la massima sicurezza per la strumentazione oltre alla possibilità di avere dei referenti locali che, in caso di malfunzionamenti rilevabili da remoto, potessero intervenire.

Figura 2 Installazione dei DAS Febus A1 (a) e iDAS (b) presso le centrali Telecom Bagnoli e Napoli-Tupputi.

Figure 2 Installation of the DAS Febus A1 (a) and iDAS (b) at the Bagnoli and Napoli-Tupputi Telecom telephone exchanges.



1.3 Acquisizione delle misure

I parametri di acquisizione dei dispositivi DAS sono stati determinati al fine di ottimizzare la qualità del segnale ed evitare riflessioni. Sebbene i due DAS siano differenti, entrambi sfruttano la tecnica del phase-OTDR (Optical Time Domain Reflectometry; Hartog [2017]).

Il principio di funzionamento si basa sulla retrodiffusione – i.e. scattering di Rayleigh - di un impulso di luce. Il dispositivo optoelettronico – chiamato *interrogator* - emette continuamente impulsi laser che si propagano lungo la fibra e che vengono, in parte, retrodiffusi dalle eterogeneità casuali all'interno del suo nucleo. Un'onda acustica o una vibrazione induce una deformazione longitudinale locale della fibra rispetto al suo asse principale. Lo spostamento dei centri di diffusione dovuto alla deformazione del cavo produce un ritardo o un anticipo – i.e. *delay* - dell'impulso retrodiffuso.

I sistemi DAS tipicamente convertono la differenza di fase tra l'impulso precedente e quello successivo alla deformazione in strain o strain rate (derivata nel tempo dello strain). È infatti possibile dimostrare che la variazione di fase del segnale retrodiffuso è proporzionale alla variazione di strain assiale, ovvero lungo la direzione del cavo. Se si considera la deformazione di una porzione di fibra di lunghezza G , chiamata *Gauge Length*, la relazione tra strain e differenza di fase è espressa come [Lindsey et al., 2020]:

$$\varepsilon = \frac{\lambda \Delta\phi}{4\pi n G \xi} \quad (1)$$

dove ε è lo strain della porzione di fibra, λ la lunghezza d'onda dell'impulso ottico, $\Delta\phi$ la differenza di fase, n è l'indice di rifrazione effettivo della fibra ottica (tipicamente 1.46), e ξ è un fattore di correzione [SEAFOM, 2018].

Diversi sono i parametri di misura che devono essere definiti per ottenere un buon rapporto segnale-rumore e un campionamento spaziale e temporale adeguato alla dinamica dei segnali attesi. Durante l'acquisizione, il segnale è campionato nel tempo e nello spazio sulla base di due parametri chiave: la frequenza di invio degli impulsi (PRF: *Pulse Rate Frequency*) e il campionamento

spaziale lungo la fibra (SS: *Spatial Sampling*). Il PRF è fortemente limitato dalla lunghezza della fibra (L); infatti, per evitare la sovrapposizione di due impulsi consecutivi, è necessario attendere che il segnale retrodiffuso ritorni al *detector* prima di inviare il successivo. Tenuto conto della velocità di propagazione della luce nella fibra ottica (c/n , dove c è la velocità di propagazione della luce nel vuoto), il valore massimo per la PRF è determinato dalla seguente formula:

$$PRF_{max} = \frac{c}{2Ln} \approx \frac{10^8}{L} \text{ Hz} \quad (2)$$

A causa dello scattering di Rayleigh, l'impulso iniettato è costantemente retro-diffuso lungo la fibra, generando una graduale attenuazione della sua energia iniziale. Quindi, è importante anche stabilire la potenza dell'impulso e la sua durata per garantire un buon rapporto segnale-rumore. Inoltre, è consigliabile utilizzare valori di *Gauge Length* ampi, senza eccedere la lunghezza d'onda del segnale da rilevare, ma comunque superiori alla lunghezza (durata) dell'impulso stesso. A causa della natura ciclica della fase interferometrica ottica misurata dal DAS, occorre uno srotolamento (unwrapping) temporale della fase. L'unwrapping è limitata a variazioni di fase inferiori a π . Segnali ad elevata frequenza, che generano significative variazioni di fase ottica, richiedono PRF maggiori. Pertanto, è importante utilizzare il massimo PRF consentito dalla lunghezza della fibra per massimizzare il range dinamico [Diaz et al., 2023].

La scelta dello *Spatial Sampling* (SS) dipende invece dal compromesso tra lunghezza d'onda del segnale da rilevare, la risoluzione spaziale e la capacità di gestire grandi moli di dati. SS più piccoli richiedono più risorse di elaborazione e archiviazione, mentre SS più grandi riducono i dati generati ma diminuiscono la capacità di osservare variazioni spaziali localizzate. Il campionamento spaziale lungo la fibra definisce la spaziatura delle misure e il numero di "canali" di misura dello strain. Ogni segmento della fibra diventa, quindi, un canale di acquisizione in grado di rilevare variazioni di strain lungo tutta la fibra.

La fibra F1 è lunga circa 22 km, imponendo una massima PRF di 4.7 kHz. A causa della maggiore lunghezza totale della fibra F2, la PRF massima è di 500 Hz. Il PRF più basso nella fibra F2 limita anche il range dinamico di ben 8 volte. I dati acquisiti su F1 sono infine sotto-campionati a 200 Hz. Per quanto riguarda il campionamento spaziale, è stato scelto un SS di 4.8 m per la fibra F1 e di 4 m per la fibra F2. In entrambe le acquisizioni è stata utilizzata una GL di 10 m, fissa per l'iDAS ma variabile per il Febus A1. Queste scelte consentono di avere una buona campionatura spaziale per rilevare eventi sismici con frequenza e lunghezza d'onda tipiche dell'area di studio. Sulla base di tutti i parametri di acquisizione (Tabella 1), il data rate è di 3.85 MB/s per l'acquisizione di 4584 canali a 200 Hz sulla fibra F1, ed è di 6.4 MB/s per l'acquisizione di 6656 canali di misura a 500 Hz sulla fibra F2. Pertanto, giornalmente si sono acquisiti 333 e 553 GB per l'interrogazione di F1 e F2.

Parametro	Febus A1	iDAS
Pulse Rate Frequency (PRF)	1 Hz - 400 kHz 4000 Hz	1-100 kHz 500 Hz
Gauge Length (GL)	> 1 m 10 m	fixed 10 m
Spatial Sampling (SS)	0.2 m < SS < GL 4.8 m	0.25 m < SS < 32 m 4 m

Tabella 1 Range dei parametri di acquisizione dei dispositivi DAS e loro valori per l'esperimento. I range si riferiscono ai valori riportati nei manuali.

Table 1 Range and acquisition parameters of the DAS devices. The ranges refer to the confidential User's manuals.

1.4 Georeferenziazione dei punti di misura DAS

Ad ogni canale DAS occorre assegnare una coordinata geografica. Compilate le fasi di installazione della strumentazione e avviata l'acquisizione, sono stati eseguiti dei *tap tests* lungo le fibre F1 e F2 per la georeferenziazione dei punti di misura DAS. Per questa operazione sono stati utilizzati una mazza, un GPS portatile e un tablet, connesso al DAS per visualizzare in tempo reale i segnali acquisiti. Il *tap test* eseguito in prossimità della fibra genera una vibrazione locale del suolo. Tramite il GPS portatile, sono state misurate le coordinate del punto in cui è stato effettuato il *tap test*. Analizzando il segnale DAS sul tablet, tra tutti i canali DAS, si individua quello in cui si registra il primo arrivo del *tap test* e gli si assegnano le coordinate GPS misurate. Utilizzando le mappe delle tracce del cavo (in formato .kmz; Figura 2) fornite da TELECOM, sono stati eseguiti 51 e 21 *tap tests* sulle fibre F1 e F2, rispettivamente. È stato realizzato un foglio di lavoro dove ad ogni esecuzione del *tap tests*, sono stati annotati l'orario, le coordinate GPS, il canale DAS assegnato e delle note. Conclusa questa operazione, i dati contenuti nel foglio di lavoro sono stati processati insieme alle coordinate della traccia del cavo (file .kmz) per interpolare i restanti canali DAS e assegnargli le coordinate geografiche.

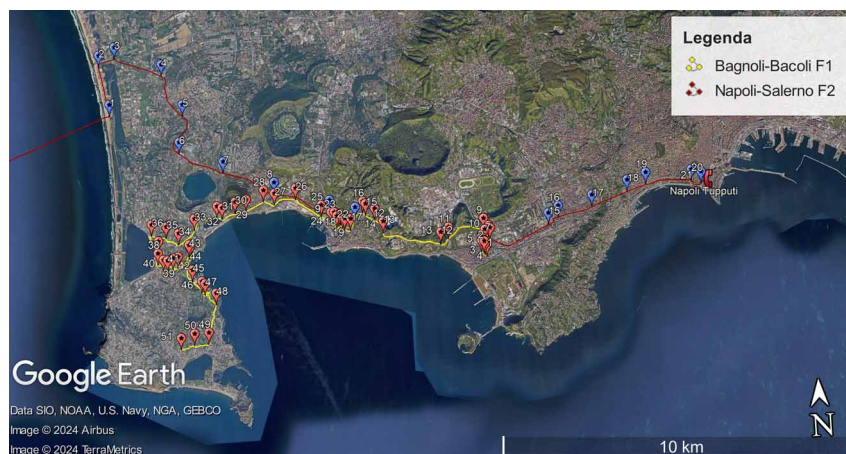


Figura 3 Tracce dei cavi in fibra ottica interrogati dai DAS Febus A1 (traccia F1; linea gialla) e iDAS (traccia F2; linea rossa). I pin blu e arancioni rappresentano la posizione dei *tap tests*, rispettivamente per la fibra Napoli-Salerno e Bagnoli-Bacoli.

Figure 3 Traces of fiber optic cables interrogated by the Febus A1 (trace F1; yellow line) and the iDAS (trace F2; red line). The blue and orange pins represent the position of the *tap tests*, respectively for the Naples-Salerno and Bagnoli-Bacoli fiber.

2. Trasmissione ed Archiviazione dei Dati

Per i dati acquisiti dal Febus A1 è stato approntato un software di semplice funzionamento, come spiegato nel seguito, che monitora l'acquisizione e trasferisce costantemente i dati acquisiti sul NAS collegato direttamente al server di acquisizione. Il software organizza i file dati in cartelle giornaliere al fine di semplificare e rendere immediata la ricerca temporale. L'operazione viene svolta lasciando gli ultimi 3 file acquisiti all'interno del server di acquisizione. Questa opzione consente di non interferire con l'acquisizione.

Il rate complessivo di acquisizione, pur mantenendo sample rate non elevati (200 Hz per Febus A1 e 500 Hz per iDAS), rende difficoltoso il trasferimento di tutti i dati ad una stazione remota di monitoraggio. Il server di acquisizione genera file da 220 MiB/min (1 MiB = 2^{20} bytes) e il

trasferimento richiederebbe una banda garantita di circa 31 Mbps. Tenendo conto di possibili ammanchi di connettività, la banda garantita dovrebbe essere almeno di 50 Mbps in upload e lo storage remoto dovrebbe garantire lo stoccaggio di 10 TiB al mese.

Al sistema di acquisizione installato a Bagnoli è stato associato un router UMTS con SIM a piano dati flat. Il router è stato configurato in modo da consentire l'accesso al NAS mediante protocollo SFTP. Al fine di ottimizzare la quantità di informazione trasferita alla sede dell'INGV-OE si è deciso di effettuare il trasferimento dei soli dati associati agli eventi sismici registrati dall'INGV-OV. Per automatizzare il tutto è stato sviluppato un software che esegue periodicamente le seguenti attività:

- download degli eventi sismici registrati dall'INGV-OV. Gli eventi vengono acquisiti mediante il catalogo CSV (<https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei/2024/events.csv>) elaborato dall'Osservatorio Vesuviano;
- il file viene letto e confrontato con il file CSV scaricato precedentemente ogni 5 minuti;
- i nuovi eventi vengono accodati per il download che avviene parallelamente al check dei nuovi eventi;
- per ogni evento sismico riportato nel catalogo INGV-OV, 3 minuti di dati DAS che coprono l'evento vengono scaricati via SFTP e archiviati in un repository locale dell'INGV-OE;
- i dati così trasferiti (in formato .h5) sono convertiti in immagine 2D (asse x: tempo; asse y: distanza lungo la fibra/canali), che viene salvata in formato .png per successive e rapide visualizzazioni (Figura 4).

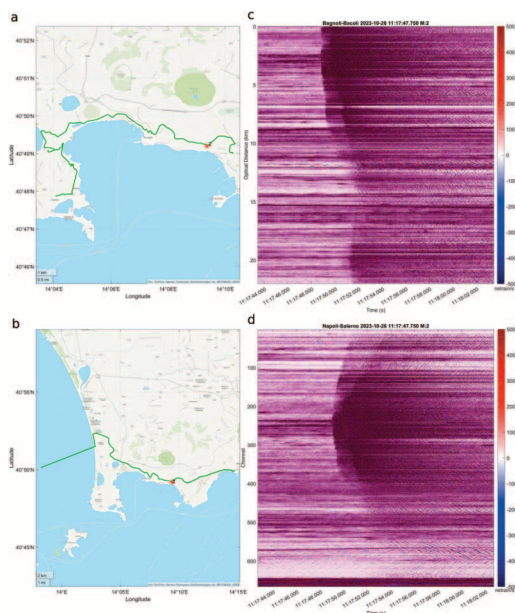


Figura 4 Esempio di evento sismico registrato sulle fibre F1 ed F2 dai dispositivi Febus A1 (a, c) e iDAS (b, d). I dati DAS sono filtrati con un filtro passa basso a 30 Hz. Le mappe (a, b) riportano l'evento localizzato dal sistema di monitoraggio sismico INGV-OV.

<https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei/2024/events.csv>

Figure 4 Example of a seismic event recorded on F1 and F2 fibers by Febus A1 (a, c) and iDAS (b, d) devices. The DAS data are filtered with a 30 Hz low pass filter. The maps (a, b) show the event localized by the INGV-OV seismic monitoring system. <https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei/2024/events.csv>

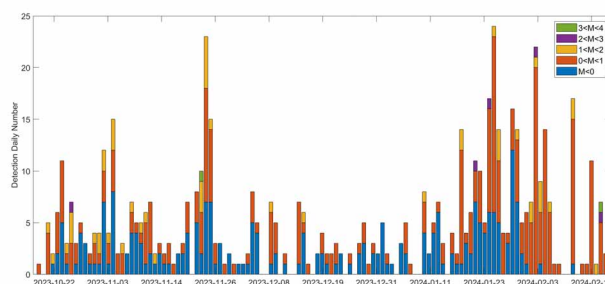
3. Analisi Preliminari

I due dispositivi DAS hanno registrato con continuità dal 19 ottobre 2023 fino al 18 febbraio 2024. Ad eccezione di brevi pause legate a momentanee interruzioni di energia elettrica o manutenzione, entrambi i dispositivi hanno registrato ininterrottamente. In totale sono stati acquisiti circa 39 TB con il DAS Febus A1 e circa 60 TB con il dispositivo iDAS.

Utilizzando il catalogo degli eventi (<https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei/>) scaricato alla data di fine esperimento (19 febbraio 2024), durante il periodo di acquisizione la rete sismica permanente dell'INGV-OV ha registrato un numero totale di 602 eventi di magnitudo compresa tra -0.8 e 3.0. La distribuzione giornaliera della magnitudo degli eventi sismici è riportata in Figura 5.

Figura 5 Distribuzione giornaliera degli eventi sismici registrati dalla rete INGV-OV. L'evento minore ha magnitudo -0.8.

Figure 5 Daily distribution of seismic events recorded by the INGV-OV network. The smallest seismic event has magnitude -0.8.

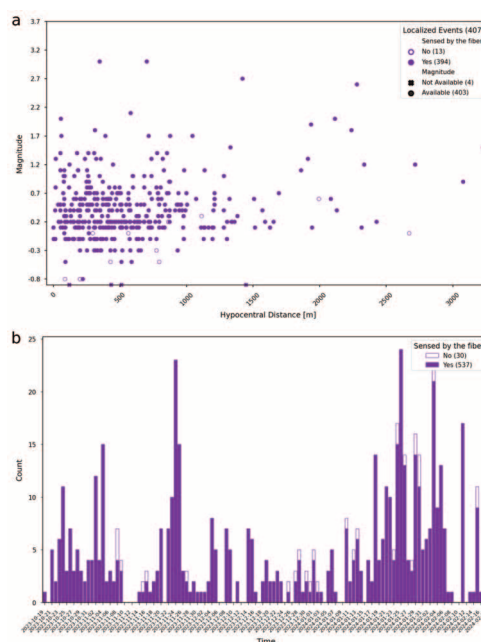


Al netto dei 35 eventi verificatisi durante la manutenzione del DAS nel mese di novembre 2023, durante l'acquisizione dei dati DAS, il catalogo elenca 567 eventi, di questi 407 sono stati localizzati dal sistema di monitoraggio sismico dell'INGV-OV. Per 32 eventi il catalogo non riporta la magnitudo. Da un operatore, è stata condotta una prima analisi visuale sui dati DAS acquisiti sulla fibra F1 per valutare quanti di questi eventi sismici hanno generato variazioni di strain rilevabili sui dati DAS. I segnali sono stati preliminarmente filtrati con un filtro passa basso a 30 Hz per ridurre l'effetto del rumore ad alta frequenza. La Figura 6 mostra gli eventi rilevati, e non, sulla fibra in funzione del tempo e della magnitudo. Da questa semplice analisi visuale sono stati rilevati 537 eventi su un totale di 567, il che rappresenta una corrispondenza del 95% circa. In particolare, sono state osservate variazioni significative anche per piccoli eventi per i quali la magnitudo non era disponibile nel catalogo INGV-OV. Tutti gli eventi con magnitudo superiore a 0.3 hanno generato variazioni di strain rilevabili sulla fibra (Figura 7a), a meno di un evento molto distante ed isolato rispetto al grosso della sismicità.

Figura 6 a) Cerchi: magnitudo degli eventi sismici rilevati (simboli pieni) e non (simboli vuoti) sul cavo in fibra ottica F1 (Figura 3); Crocette: eventi sismici rilevati (simboli pieni) e non (simboli vuoti) la cui magnitudo non è disponibile.

b) Numero di eventi rilevati e non per giorno sui dati DAS.

Figure 6 a) Circles: magnitude of seismic events detected (filled symbols) and not (empty symbols) on the F1 fiber optic cable (Figure 3); Crosses: seismic events detected (filled symbols) and not (empty symbols) whose magnitude is not available.
b) Number of detected and non-detected events per day on DAS data.



L'entità delle variazioni di strain indotte sulla fibra è dipendente non solo dalla magnitudo ma anche dalla distanza ipocentrale tra l'evento e la fibra. Pertanto, gli eventi localizzati dalla rete INGV-OV sono stati analizzati anche in funzione della loro magnitudo e della distanza rispetto alla fibra, calcolata come il punto più vicino di tutta la traccia dall'ipocentro. Il grafico magnitudo-distanza sui 407 eventi localizzati mostra una ripartizione non netta tra gli eventi rilevati e non rilevati sui dati DAS (Figura 7b). A parità di magnitudo alcuni eventi distanti sono rilevabili mentre eventi più vicini non lo sono. Questo risultato evidenzia che altri fattori noti per la determinazione della risposta della fibra, quali per esempio le condizioni locali di accoppiamento del cavo col terreno e del suo orientamento, possono influire sulla rilevazione degli eventi.

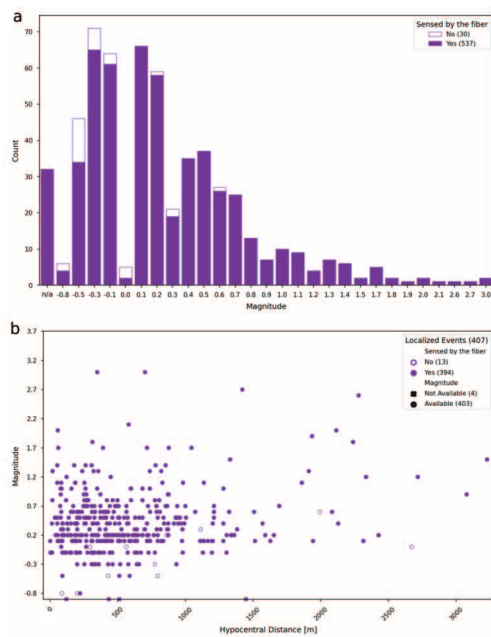


Figura 7 a) Numero di eventi sismici rilevati e non sui dati DAS della fibra F1 in funzione della magnitudo. b) Magnitudo versus distanza ipocentrale per gli eventi sismici localizzati del catalogo INGV-OV. Cerchi: magnitudo degli eventi sismici localizzati, rilevati (simboli pieni) e non (simboli vuoti) sul cavo, in funzione della distanza ipocentrale. Crocette: eventi sismici localizzati in funzione della distanza ipocentrale, rilevati (simboli pieni) e non (simboli vuoti), la cui magnitudo non è disponibile.

Figure 7 a) Number of detected and undetected seismic events on F1 fiber DAS data as a function of magnitude. b) Magnitude versus hypocentral distance for localized seismic events from the INGV-OV catalog. Circles: magnitude of localized seismic events, detected (filled symbols) and not (empty symbols) on the cable, as a function of the hypocentral distance. Crosses: seismic events localized as a function of the hypocentral distance, detected (filled symbols) and not (empty symbols), whose magnitude is not available.

La Figura 8 mostra una sequenza di dati DAS registrati durante lo sciame sismico del 11 febbraio 2024. Durante i 3 minuti di registrazione presentati, la rete INGV-OV dell'area dei Campi Flegrei ha registrato 6 eventi (<https://terremoti.ov.ingv.it/gossip/flegrei>). Da un'analisi visuale dei dati DAS si evidenzia l'occorrenza di almeno altri 15 distinti eventi di minore intensità, potenzialmente simili agli eventi maggiori. L'elevato numero di misure DAS permette di riconoscere più facilmente l'impronta degli eventi sismici nonostante gli elevati disturbi antropici e il maggiore rumore dei dispositivi DAS rispetto ai sismometri tradizionali.

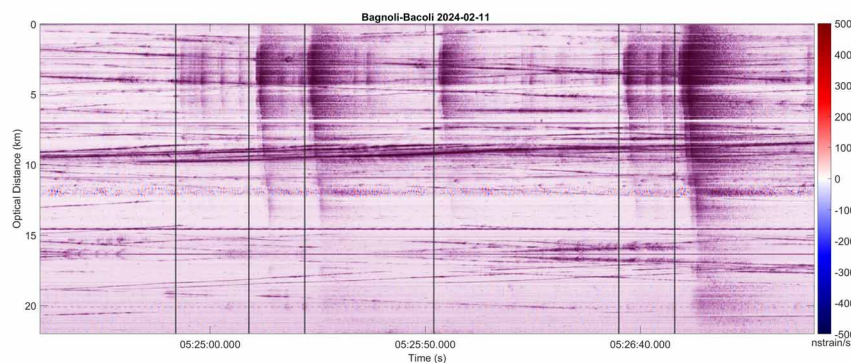


Figura 8 Dati DAS durante lo sciame sismico del 11 febbraio 2024. Le linee nere verticali sono in corrispondenza dei tempi origine dei 6 eventi registrati dalla rete INGV-OV nell'intervallo temporale analizzato.

Figure 8 DAS data during the seismic swarm on 11th February 2024. The vertical black line are in correspondence of the origin time of the 6 seismic events recorded by the INGV-OV network in the analyzed time interval.

4. Discussioni e conclusione

L'esperimento per l'esecuzione di misure DAS ai Campi Flegrei ha permesso di validare e ottimizzare le procedure di installazione della strumentazione DAS e di gestione e archiviazione dei dati acquisiti. Sulla base dell'esperienza maturata in altre campagne di misura [Napoli et al., 2021; Krawczyk et al., 2021; Currenti et al., 2023], sono state perfezionate alcune operazioni

che hanno facilitato l'installazione e l'accesso al dato. In particolare, a differenza delle altre campagne, dove i dati sono stati disponibili per l'analisi solo ad esperimento concluso, in questa è stato realizzato un sistema per il trasferimento parziale e mirato dei dati al fine di consentirne un accesso immediato.

A differenza di un sismometro tradizionale, diversi sono i fattori che influenzano l'ampiezza e la qualità del segnale di strain misurato dai DAS su tutta la lunghezza della fibra. Tra questi, l'orientamento locale del cavo rispetto alla sorgente sismica, il tipo di onda sismica, l'accoppiamento del cavo con il terreno [Kennett, 2022]. Poiché il DAS misura lo strain rate longitudinale, l'ampiezza del segnale DAS su ciascun canale è controllato dall'angolo relativo tra la direzione locale del cavo e il fronte d'onda sismica. Nel caso dei Campi Flegrei, molti eventi hanno un angolo di incidenza quasi normale al cavo e quindi lo strain indotto sulla fibra è fortemente attenuato. La geometria della rete in fibra ottica, essendo tangenziale rispetto al fronte d'onda non è ottimale. In particolare, come atteso, si osserva una maggiore attenuazione delle fasi P rispetto alle fasi S (Figura 4). Le diverse condizioni di installazione del cavo in fibra ottica lungo il suo percorso sono un ulteriore fattore di variabilità del segnale. Nonostante queste limitazioni, l'analisi preliminare dei dati ha dimostrato una buona soglia di rilevazione con circa il 95% degli eventi sismici che generano variazioni significative sui dati DAS. Questa percentuale può sicuramente migliorare con l'uso di analisi più raffinate e adatte a sfruttare il rilevamento quasi-continuo nello spazio dato dall'elevato numero di canali. La soglia di magnitudo per la rilevazione è di circa 0.3, ma è attesa una dipendenza dalla posizione dell'evento rispetto alla fibra.

Le diverse condizioni di installazione del cavo in fibra ottica, il suo accoppiamento col terreno, l'intenso traffico veicolare e l'alto rumore antropico di questa area rendono i dati DAS altamente rumorosi e difficili da analizzare usando tecniche di processing tradizionali. Sono, pertanto, in corso l'implementazione e l'applicazione di algoritmi di Intelligenza Artificiale per migliorare e velocizzare la rivelazione degli eventi e il picking delle fasi sull'enorme dataset generato dall'elevato numero di canali dei dati DAS [Corsaro et al., 2024].

Bibliografia

- Allegra M., Currenti G., Cannavò F., Jousset P., Prestifilippo M., Napoli R., Sciotto M., Di Grazia G., Privitera E., Palazzo S., and Krawczyk C., (2023). *Deep learning approach for detecting low frequency events on DAS data at Vulcano Island, Italy*. EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 23–28 Apr 2023, EGU23-16459. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16459>
- Corsaro M., Allegra M., Cannavò F., Currenti G., Festa G., Jousset P., Pellegrino D., Palazzo S., Prestifilippo M., Privitera E., Pulvirenti M., Ricciolino P., Spampinato C., Scotto di Uccio F., and Tramelli A., (2024). *Distributed Fiber Optic Sensing and Artificial Intelligence: preliminary results on the Campi Flegrei caldera unrest*, EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-16414. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-16414>
- Currenti G., Jousset P., Napoli R., Krawczyk C., Weber M., (2021). *On the comparison of strain measurements from fibre optics with a dense seismometer array at Etna volcano (Italy)*, Solid Earth, 12, 993–1003, 2021. <https://doi.org/10.5194/se-12-993>
- Currenti G. et al., (2023). *Distributed Dynamic Strain Sensing of Very Long Period and Long Period Events on Telecom fiber-optic cables at Vulcano, Italy*. Scientific Reports. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31779-2>
- Diaz-Meza S., Jousset P., Currenti G., Wollin C., Krawczyk C., Clarke A., Chalari A., (2023). *On the Comparison of Records from Standard and Engineered Fiber Optic Cables at Etna Volcano (Italy)*. Sensors 2023, 23, 3735. <https://doi.org/10.3390/s23073735>
- Hartog A.H., (2017). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. Series in Fiber Optic Sensors.

- Lindsey N.J., Rademacher H., and Ajo-Franklin J.B., (2020). *On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol.125, no. 2.
- Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., Hersir G.P., Henningses J., Weber M., and Krawczyk C.M., (2020). *Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features*. Nature Communications, 9, 1–11, <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y>
- Jousset P., Currenti G., Schwarz B., Chalari A., Tilmann F., Reinsch T., Zuccarello L., Privitera E., Krawczyk C.M., (2022). *Fibre optic distributed acoustic sensing of volcanic events*. Nature Communicartions. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29184-w>
- Kennett B.L.N., (2022). *The seismic wavefield as seen by distributed acoustic sensing arrays: local, regional and teleseismic sources*. Proc.R.Soc.A478:20210812. <https://doi.org/10.1098/rspa.2021.0812>
- Krawczyk C., Jousset P., Currenti G., Weber M., Napoli R., Reinsch T., Riccobene G., Zuccarello L., Chalari A., and Clarke A., (2020). *Monitoring volcanic and seismic activity with multiple fibre-optic Distributed Acoustic Sensing units at Etna volcano*. EGU2020-15252, 3–8 May 2020, Wien. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-15252>
- Li Z.R. et al., (2021). *Ridgecrest earthquake with distributed acoustic sensing*. AGU Adv. <https://doi.org/10.1029/2021AV000395>
- Lindsey N.J., Dawe T.C., and Ajo-Franklin J.B., (2019). *Illuminating seafloor faults and ocean dynamics with dark fiber distributed acoustic sensing*. <https://doi.org/10.1126/science.aay5881>
- Miah K., and Potter D.K., (2017). *A Review of Hybrid Fiber-Optic Distributed Simultaneous Vibration and Temperature Sensing Technology and Its Geophysical Applications*. Sensors 2017, 17, 2511. <https://doi.org/10.3390/s17112511>
- Napoli R., Currenti G., Chalari A., Jestin C., Contrafatto D., Jousset P., Larocca G., Pellegrino D., Pulvirenti M., and Sicali A., (2020). *Challenges of DAS measurements in seismic urban areas: case study at Etna volcano eastern flank*. EGU2020-11000, 3–8 May 2020, Wien. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11000>
- SEAFOM, (2018). *Measuring Sensor Performance – DAS Parameter Definitions and Tests*. Document-02 SEAFOM MSP-02, 2018.
- Sladen A., Rivet D., Ampuero J.P., De Barros L., Hello Y., Calbris G., and Lamare P., (2019). *Distributed sensing of earthquakes and ocean-solid Earth interactions on seafloor telecom cables*. Nature Communicartions. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13793-z>
- Williams E.F., Fernández-Ruiz M.R., Magalhaes R., Vanthillo R., Zhan Z., González-Herráez M. and Martins H.F., (2019). *Distributed sensing of microseisms and teleseisms with submarine dark fibers*. Nature Communications. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13262-7>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<https://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<https://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

<https://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html>

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2025

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA