



RAPPORTI TECNICI INGV

Installazione di una rete temporanea
per il monitoraggio della sismicità nei
dintorni dell'invaso idrico artificiale di
Monte Cotugno (Basilicata, Italia)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

472



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editor in Chief

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

Editorial Board

Laura ALFONSI (laura.alfonsi@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Daniele BRAVI (daniele.bravi@ingv.it)
Simona CARANNANTE (simona.carannante@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Luca COCCHI (luca.cocchi@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@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)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@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)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Pierangelo ROMANO (pierangelo.romano@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi@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)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
redazione.cen@ingv.it

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 una rete temporanea per il monitoraggio della sismicità nei dintorni dell'invaso idrico artificiale di Monte Cotugno (Basilicata, Italia)

Installation of a temporary network for monitoring the seismicity in the area of the Monte Cotugno water impoundment (Basilicata, Italy)

Rebecca Bruni^{1,2}, Damiano Biagini¹, Michele D'Ambrosio¹, Alexander Garcia², Luigi Improta³, Mario La Rocca⁴, Davide Piccinini¹, Gilberto Saccorotti¹, Luciano Zuccarello¹

¹INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

³INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

⁴UniCal | Università della Calabria, Dipartimento di Fisica, Cosenza

Accettato 7 giugno 2023 | Accepted 7 June 2023

Come citare | How to cite Bruni R., Biagini D., D'Ambrosio M., Garcia A., Improta L., La Rocca M., Piccinini D., Saccorotti G., Zuccarello L. (2023).

Installazione di una rete temporanea per il monitoraggio della sismicità nei dintorni dell'invaso idrico artificiale di Monte Cotugno (Basilicata, Italia). Rapp. Tec. INGV, 472: 1-34, <https://doi.org/10.13127/rpt/472>

In copertina Diga di Monte Cotugno vista dalla stazione MOC1 (Foto di Alexander Garcia) | Cover Monte Cotugno dam seen from the MOC1 station, (Photo Alexander Garcia).

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. Area di studio: assetto geologico e sismicità	8
2. La rete temporanea	9
2.1 Selezione dei siti	9
2.2 Installazione delle stazioni sismiche	10
2.3 Caratteristiche strumentali	10
3. Controllo qualità dei siti	12
4. Monitoraggio del funzionamento delle stazioni sismiche	12
5. Prestazioni della rete	13
6. Risultati	13
6.1 Discriminazione di eventi sismici	13
6.2 Risultati del picking manuale delle fasi e della localizzazione	14
6.3 Template Matching	18
7. Discussione e Conclusioni	19
Bibliografia	20
Appendice - Schede di stazione	23

Riassunto

Questo rapporto tecnico descrive i dettagli dell'installazione di una rete temporanea intorno al bacino artificiale di Monte Cotugno (Basilicata) e mostra i risultati delle prime analisi svolte sui segnali acquisiti.

Questo esperimento, svoltosi tra metà giugno 2021 e giugno 2022, è stato svolto con l'installazione di 6 stazioni temporanee a complemento delle reti di monitoraggio permanente attualmente operanti nell'area dell'invaso, si inserisce nell'ambito delle attività finalizzate alla ricerca in Italia di nuovi casi di sismicità con una possibile causa antropogenica (come e.g., sismicità stimolata da invasi idrici, dallo sfruttamento delle risorse geotermiche, dall'estrazione o iniezione di fluidi nella crosta, ecc.). L'obiettivo è di registrare micro-sismicità nei dintorni di siti con attività antropica che possano avere il potenziale di stimolare tali eventi, e di confrontare i dati registrati con possibili forzanti antropogeniche. In questa maniera, nei casi in cui sia possibile rilevare qualche indizio di possibile correlazione tra sismicità ed attività antropica, sarà possibile proporre nuovi episodi di sismicità potenzialmente indotta da integrare nella piattaforma EPISODES del TCS AH della infrastruttura di ricerca EPOS (European Plate Observing System). Il sito del bacino artificiale di Monte Cotugno è stato selezionato per tre motivi: 1) è l'invaso associato alla più grande diga in terra battuta d'Europa e presenta grandi variazioni stagionali e pluriennali del livello dell'acqua, 2) in quest'area la rete sismica nazionale ha una copertura strumentale molto limitata, per cui risulta necessario incrementarla per poter registrare eventi di bassa magnitudo potenzialmente indotti dall'invaso, 3) l'area presenta una pericolosità sismica moderata.

Abstract

This technical report describes the details of the installation of a temporary network around the Monte Cotugno dam (Basilicata) and shows the results of the first analyses carried out on the acquired signals.

This experiment, which took place between June 2021 and June 2022, has been performed by installing 6 temporary stations which have been integrated with local permanent stations from the national network. It is part of the activities aimed at researching new cases of seismicity in Italy with a possible anthropogenic cause (such as, for example, seismicity stimulated by reservoirs, exploitation of geothermal resources, extraction or injection of fluids into the crust, etc.). The objective is to record micro-seismicity around sites with human activity that may have the potential to stimulate such events, and to compare the recorded data with possible anthropogenic causes. In this way, in cases where it is possible to detect some indication of a possible correlation between seismicity and human activity, it will be possible to propose new episodes of potentially induced seismicity to be integrated into the EPISODES platform of the TCS AH of the EPOS (European Plate Observing System) research infrastructure. We selected the artificial basin of Monte Cotugno for three reasons: 1) it is the reservoir associated with the largest clay dam in Europe and presents large seasonal and multi-year variations in level of water, 2) in this area the national seismic network has a very limited coverage, therefore it was necessary to increase it in order to record low-magnitude events possibly induced by the reservoir, 3) the area presents a moderate seismic hazard.

Keywords Rete sismica temporanea; Bacino di Monte Cotugno; Esperimento sismico | Temporary seismic network; Monte Cotugno reservoir; Seismic field experiment

Introduzione

La diga di Monte Cotugno (Basilicata) è la più grande diga in terra battuta d'Europa e rappresenta il punto nodale del sistema idrico dell'Italia meridionale alimentando le regioni Basilicata, Puglia e Calabria [Loperte et al., 2016]. L'invaso presenta significative variazioni stagionali, nell'ordine di 80-120 milioni di m³. L'area di studio è attualmente monitorata da alcune stazioni sismiche permanenti della Rete Sismica Nazionale dell'INGV (RSN-INGV) con interdistanza di circa 30-40 km. Con l'obiettivo di aumentare la completezza e l'accuratezza del catalogo sismico sull'intera area intorno all'invaso, permettendo il successivo studio della sismicità di bassa energia e di verificare l'esistenza o meno di eventuali correlazioni con il livello del lago, è stato quindi pianificato un esperimento temporaneo finalizzato ad incrementare la copertura strumentale nell'area di studio. In questo rapporto tecnico descriviamo: (i) l'installazione di 6 stazioni sismiche temporanee, che vanno a integrare le stazioni permanenti della RSN-INGV, e (ii) le successive analisi di discriminazione, picking e localizzazione degli eventi registrati durante il periodo di funzionamento della rete.

1. Area di studio: assetto geologico e sismicità

La diga di Monte Cotugno si trova nel settore esterno dell'Appennino Lucano, nella parte meridionale della Basilicata. L'Appennino meridionale, la cui genesi inizia nell'Oligocene Superiore-Miocene Inferiore [Monaco e Tortorici, 1998], è un prisma di accrezione con vergenza orientale sviluppatosi al di sopra dello slab subdotto della litosfera Apulo-ionica immergente a ovest [Doglioni et al., 1996].

Le litologie presenti nell'area si riferiscono a diverse Unità tettono-stratigrafiche: le principali sono, da ovest verso est, le Unità Liguride-basale e le Unità Sicilide, separate dal complesso Postorogeno. L'Unità Liguride-basale, situato nel settore ovest e sud-ovest, è caratterizzata da sedimenti di mare profondo deformati e talvolta metamorfosati, contenenti frammenti di crosta continentale e oceanica (ofioliti), ricoperti in discordanza da depositi sintettonici silico-clastici di ambiente marino profondo rappresentati dal Flysch di Albidona e dalla Formazione del Saraceno. Il complesso Sicilide, situato a est e nord-est della diga, è composto da formazioni del Cretaceo superiore e Miocene inferiore, con alternanza di argille variegata, arenarie tuffiche, marne calcaree e calcari marnosi [Loperte et al., 2016]. Il complesso Postorogeno, situato nel settore centrale dell'area, nel bacino di S. Arcangelo, dove sorge la diga di Monte Cotugno, è costituito per lo più da depositi recenti di età pleistocenica e olocenica (Limi, Ghiaie e Alluvioni sia recenti che attuali), e da depositi pliocenici caratterizzati da formazioni argilloso-marnose (es. Argille Varicolori e Flysch arenaceo-marnosi) (Figura 1). Nell'area di studio, le Unità alloctone e terrigene raggiungono uno spessore di 4-5 km e sovrascorrono sul sistema di thrusts della Piattaforma Apula Interna [Nicolai e Gambini, 2007]. La sismicità della zona assiale di catena si concentra all'interno delle sequenze carbonatiche del Trias-Miocene della Piattaforma Apula, inclusi i due casi di microsismicità indotta associati al giacimento di idrocarburi della Val d'Agri ed all'invaso del Pertusillo localizzati circa 35 km a nord-ovest di Monte Cotugno [Valoroso et al., 2009; Improta et al., 2017].

L'area sottostante la fondazione della diga è costituita da depositi alluvionali di spessore massimo di 15 metri, che a sua volta ricopre le arenarie, sabbie e limi del pliocene medio e le argille marnose del pliocene superiore [Callari, Jappelli 2004, Burragato et al., 1988].

L'area di studio è ubicata ad est del settore assiale di catena caratterizzato da una elevata pericolosità sismica. I cataloghi di sismicità storica e strumentale evidenziano un livello di attività locale molto basso. Il catalogo CPTI15 [Rovida et al., 2022] include un solo terremoto locale (1910, M4.6). Nella banca dati INGV ISDe (Italian Seismological Instrumental and

Parametric Database; <https://doi.org/10.13127/ISIDE>) sono presenti 35 eventi superficiali (< 10 km) localizzati entro 20 km dalla diga nel periodo 2009-2021. La magnitudo massima è $M_L=3.2$. L'invaso di Monte Cotugno non compare tra i casi ipotizzati/documentati di sismicità indotta [ISPRA, 2014]. Tuttavia, in questo settore dell'Appennino la sismicità localizzata dalla RSN-INGV ha una magnitudo di completezza $M_c \approx 2.3$ [Schorlemmer et al., 2010]. In considerazione della geometria della RSN-INGV (la stazione più vicina, SCHR è distante 20 km), le risultanti completezza e qualità di localizzazione del catalogo ISIDE non permettono analisi di dettaglio necessarie per comprendere l'origine naturale o indotta della sismicità locale.

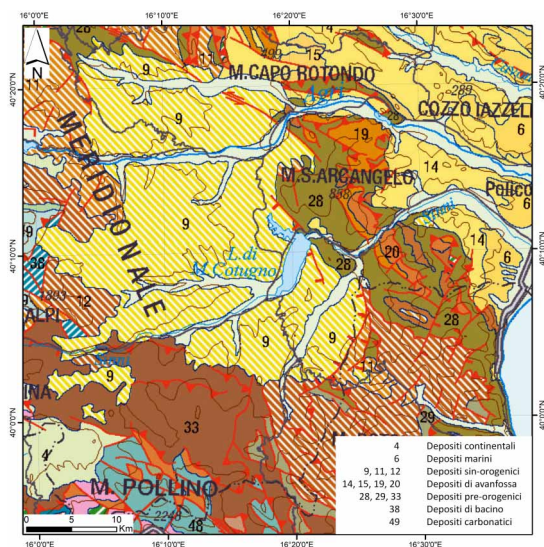


Figura 1 Carta geologica dell'area di studio (estratto dalla Carta Geologica d'Italia alla scala 1:1000000 edita dal Servizio Geologico d'Italia, anno 2011) [Compagnoni et al., 2011].

Figure 1 Geological map of the study area (from Carta Geologica d'Italia scale 1:1000000 published by Servizio Geologico d'Italia, 2011) [Compagnoni et al., 2011].

2. La rete temporanea

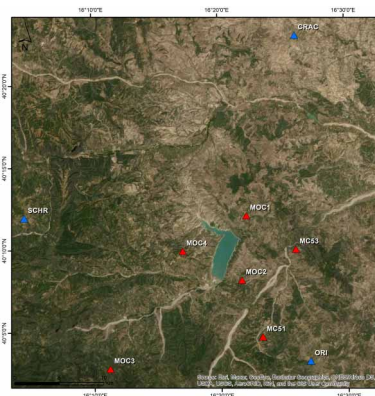
Nell'area di studio attualmente operano 3 stazioni permanenti della RSN-INGV (rete IV, stazioni ORI, CRAC e SCHR). Per completare il monitoraggio attorno al lago, è stata installata una rete temporanea di 6 stazioni sismiche. Nei paragrafi successivi si descrive la rete temporanea, dalla selezione dei siti, l'installazione, e le caratteristiche strumentali.

2.1 Selezione dei siti

Tenendo conto delle stazioni permanenti già in funzione, è stata definita una geometria provvisoria della rete temporanea al fine di ottenere una copertura azimutale adeguata attorno all'invaso. Definite le posizioni approssimative dei possibili siti, nei mesi di maggio e giugno 2021 abbiamo condotto le ricognizioni di dettaglio. Nella scelta dei siti di installazione abbiamo tenuto conto dei seguenti criteri: la lontananza da evidenti sorgenti di rumore antropico, la presenza in affioramento del substrato rigido, la facilità di accesso, la buona ricezione del segnale GPS, l'adeguata esposizione solare per consentire l'alimentazione degli strumenti tramite pannelli fotovoltaici, la possibilità di trasmissione dei dati tramite telemetria digitale LTE (Long Term Evolution). Inoltre, durante le ricognizioni sono stati valutati i livelli spettrali di rumore sismico ambientale dei siti. La Figura 2 mostra la distribuzione delle stazioni nell'intera area. Le stazioni della rete temporanea corrispondono ai simboli rossi. Le stazioni sismiche permanenti della RSN-INGV sono rappresentate con i simboli blu.

Figura 2 Configurazione della rete temporanea (triangoli rossi) e posizione delle stazioni della RSN-INGV (triangoli blu) nell'area di studio.

Figure 2 Configuration of the temporary network (red triangles) and position of RSN-INGV stations (blue triangles) in the study area.



2.2 Installazione delle stazioni sismiche

Tra il 22 e il 23 giugno 2021 sono state installate le 6 stazioni sismiche temporanee (denominate MOC1, MOC2, MOC3, MOC4, MC51 e MC53) nella zona intorno all'invaso artificiale di Monte Cotugno. La Figura 3 mostra i dettagli dell'installazione di una delle stazioni, simile alle altre: il sismometro è stato posizionato sul fondo di un foro profondo circa 40 cm; in una cassetta sono stati ospitati il digitalizzatore, le batterie, lo stabilizzatore di potenza e il router per la trasmissione digitale dei dati LTE; il pannello solare è stato ancorato a terra e sostenuto da picchetti metallici.

Figura 3 Esempio di installazione di una stazione sismica temporanea (MOC3).

Figure 3 Sample picture of the installation of a temporary seismic station (MOC3).



Tutte le stazioni, ad eccezione di MOC1, sono state equipaggiate con modem LTE per trasmettere i dati in tempo reale alla sede di Pisa dell'INGV, dove i segnali sono stati acquisiti da un server equipaggiato con il sistema SeiscompP [Helmholtz-Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH, 2008]. Per quanto riguarda la stazione MOC1, dopo la sua installazione è stato riscontrato un segnale LTE basso, quindi è stato deciso di acquisire i dati esclusivamente in locale (su compact flash), anche per diminuire il consumo di energia relativo all'impiego del router.

2.3 Caratteristiche strumentali

La strumentazione utilizzata in quattro siti (MOC1, MOC2, MOC3 e MOC4) è stata fornita dalla Rete Sismica Mobile dell'Osservatorio Nazionale Terremoti (COREMO). Ciascuna stazione consiste in un sensore broad-band Trillium Compact 120s della Nanometrics collegato ad un datalogger Reftek C130 (Figura 4). Il sistema di alimentazione è composto da un pannello solare da 60W e da

due batterie da 42Ah. Completano la strumentazione un apparato di trasmissione in telemetria LTE ed una antenna GPS per la sincronizzazione. I datalogger sono inoltre dotati di due compact flash da 8Gb, dove vengono memorizzate le registrazioni continue.

La strumentazione dei due rimanenti siti (MC51 e MC53) è stata fornita dall'Università della Calabria. In questo caso sono stati utilizzati i sensori velocimetrici a corto periodo SS10 della SARA Electronic Instruments e i datalogger Reftek 72A (Figura 5). Il sistema di alimentazione è composto da un pannello solare da 150W e due batterie.

La Tabella 1 mostra le informazioni relative alla posizione delle stazioni temporanee. In Appendice riportiamo la scheda tecnica di ciascuna stazione.

Stazione	Lat (WGS84)	Lon (WGS84)	Z (m.s.l.m)	Località	Comune
MOC1	40.199294	16.368407	452	Contrada Murge	Colobrarò (MT)
MOC2	40.13404	16.361631	475	Tenuta Marino	San Giorgio Lucano (MT)
MOC3	40.045743	16.186639	802	Villaneto	San Severino Lucano (PZ)
MOC4	40.164124	16.283555	438	Contrada Santa Lucia	Senise (PZ)
MC51	40.076196	16.38810	380	Sodano	San Giorgio Lucano (MT)
MC53	40.164506	16.435542	300	Valsinni	Valsinni (MT)

Tabella 1 Coordinate geografiche delle stazioni sismiche della rete temporanea.

Table 1 Configuration of the seismic stations from the temporary network.



Figura 4 Sensore Nanometrics Trillium Compact 120s (a sinistra) e acquisitore Reftek C130 (a destra).

Figure 4 Nanometrics Trillium Compact 120s sensor (left) and Reftek C130 datalogger (right).



Figura 5 Sensore SARA SS10 (a sinistra) e datalogger Reftek 72A (a destra).

Figure 5 SARA SS10 sensor (left) and Reftek 72A datalogger (right).

I datalogger sono stati impostati in modalità di registrazione continua con una frequenza di campionamento di 100 sps. La rete è stata operativa per circa un anno, da giugno 2021 a giugno 2022.

3. Controllo qualità dei siti

Per ciascun sito abbiamo valutato le Probabilistic Power Spectral Densities (PPSD) in funzione della frequenza [McNamara e Buland, 2004; McNamara e Boaz, 2005], confrontandole con i modelli di rumore sismico terrestre NLNM e NHNM (New Low - and High-Noise model, rispettivamente) di Peterson [1993]. Le PPCD sono state valutate da stime consecutive delle densità di potenza spettrale (PSD) effettuate su finestre di 600s sovrapposte del 50%, che coprono 10 giorni di registrazione continua.

Per valutare la possibile presenza di effetti di amplificazione locale sui siti, abbiamo utilizzato il metodo dei rapporti spettrali H/V (HVSr) sul rumore sismico ambientale [Nakamura, 1989], che consiste nel calcolare il rapporto tra la media degli spettri di Fourier delle due componenti orizzontali e il corrispondente spettro della componente verticale. Abbiamo valutato i rapporti H/V su finestre di rumore consecutive lunghe 60s che coprono un giorno di registrazione continua. La presenza di uno o più picchi di amplificazione nei HVSr è di norma indicativa di fenomeni di risonanza dovuti a forti contrasti di impedenza sismica sotto il sito di registrazione e che potrebbero generare effetti di amplificazione locale del moto sismico.

Le rappresentazioni delle PPCD e delle funzioni HVSr di ciascun sito sono riportati nell'Appendice. Come si vede dagli spettri di rumore ottenuti, per la banda di frequenze di interesse ($>1\text{Hz}$) il livello di rumore risulta accettabile per tutti i siti. Inoltre, dalle osservazioni delle curve HVSr si evince che non sono presenti significativi effetti di risonanza.

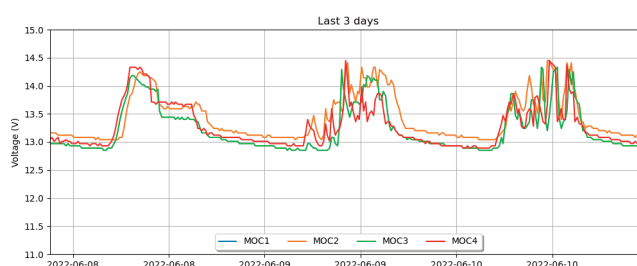
4. Monitoraggio del funzionamento delle stazioni sismiche

Per facilitare ed ottimizzare le operazioni di manutenzione delle stazioni sismiche, oltre alla costante verifica dell'archivio dei dati acquisiti, abbiamo utilizzato alcuni programmi in linguaggio Python con l'obiettivo di monitorare diversi parametri fondamentali per la definizione dello stato di funzionamento delle stazioni sismiche [Biagini et al., 2023]. I parametri, che abbiamo potuto raccogliere grazie al protocollo SNMP (Simple Network Management Protocol) con cui sono equipaggiati i router Advantech LR77 (presenti soltanto nelle stazioni MOC2, MOC3 e MOC4), sono: il livello di tensione delle batterie, la potenza del segnale EDGE/LTE e la latenza dei dati. Per semplificare la consultazione, le immagini venivano inviate ad un web server su piattaforma WordPress connesso ad un dominio utilizzato per le attività di monitoraggio della Sezione di Pisa (Figura 6).

Grazie a questa procedura di monitoraggio, siamo stati in grado di intervenire prontamente sulle stazioni con problemi di funzionamento durante l'esperimento. Un esempio è rappresentato dalla stazione MOC2 (Figura 7) in cui un intervento di manutenzione è stato eseguito successivamente al decadimento dei valori di tensione delle batterie evidenziato dal monitoraggio in tempo reale. Dal sopralluogo è emerso che il problema era causato dalla compromissione del cavo di collegamento tra il pannello solare e il regolatore di carica.

Figura 6 Esempio di grafico di monitoraggio dello stato di carica delle batterie su una finestra temporale delle ultime 72 ore.

Figure 6 Example of battery charge status monitoring graph, representing the details of the last 72 hours.



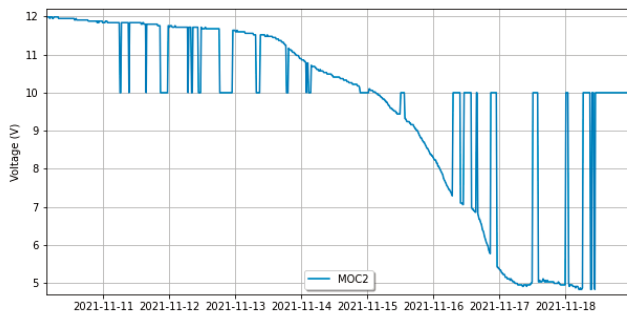


Figura 7 Decadimento del valore di tensione delle batterie riscontrato sulla stazione MOC2.

Figure 7 Decay of the voltage value of the batteries of the MOC2 station.

5. Prestazioni della rete

La prestazione della rete nel suo complesso, in termini di continuità nell'acquisizione dei dati, è stata discreta. Gap nell'acquisizione dei dati sono stati causati principalmente da problemi di alimentazione, soprattutto nei periodi autunnale e invernale, quando le condizioni meteorologiche sfavorevoli hanno peggiorato l'esposizione dei pannelli solari. Le stazioni con gap maggiori sono risultate MC51 e MC53 che hanno funzionato senza interruzioni rispettivamente per il 60.3% e per il 52.6% della durata dell'esperimento (Figura 8). Il resto delle stazioni ha lavorato correttamente per oltre il 95% dell'intero intervallo temporale, ad eccezione della stazione MOC2, che, per il problema menzionato nel paragrafo precedente, ha avuto l'85.1% di continuità dei dati (Figura 8).

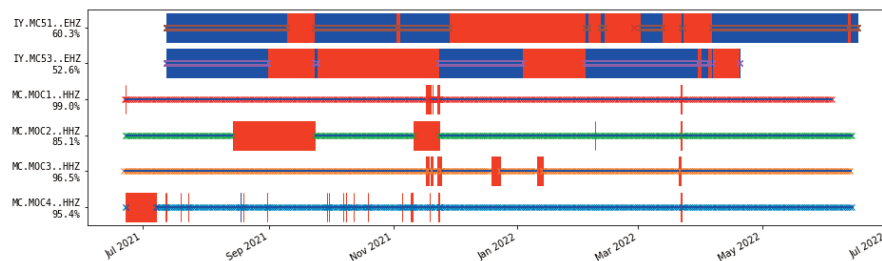


Figura 8 Prestazioni delle stazioni sismiche in termini di dati registrati durante il periodo dell'esperimento. Le aree in rosso corrispondono a gap nei dati, anche di breve durata.

Figure 8 Performance of seismic stations in terms of data recorded during the period of the experiment. Areas in red correspond to data gaps, even of short duration.

6. Risultati

In questo capitolo vengono descritte le analisi sismologiche di routine condotte sui dati registrati durante l'esperimento, ovvero: detezione mediante triggering automatico di potenziali eventi sismici, riconoscimento visuale di eventi sismici reali, picking manuale delle fasi e successiva localizzazione degli eventi. Inoltre, per arricchire il catalogo è stata utilizzata una procedura di template matching.

6.1 Discriminazione di eventi sismici

Per individuare all'interno delle registrazioni continue la presenza di segnali sismici, abbiamo utilizzato una procedura automatica standard di detezione (triggering), basata sull'algoritmo

STA/LTA (Short-Term-Average /Long-Term-Average) applicato alle componenti verticali delle serie temporali registrate dalle stazioni sismiche. La procedura è stata applicata ai dati di tutte le stazioni della rete temporanea ed alle stazioni ORI, CRAC e SCHR della Rete Sismica Nazionale. L'algoritmo calcola il rapporto tra la media del valore assoluto dell'ampiezza del segnale eseguita su una finestra temporale di breve durata (STA) e su una finestra temporale di lunga durata (LTA). I valori utilizzati per le due finestre sono 0.9 secondi per STA e 5 secondi per LTA, con soglia di attivazione (trigger) e disattivazione (detrigger) eguali a 3 e 1.5, rispettivamente.

Lo script utilizzato è basato sulla funzione coincidence_trigger del software Obspy [Beyreuther et al., 2010; Megies et al., 2011; Krischer et al., 2015]. Prima dell'analisi vera e propria viene applicata alle tracce una rimozione del trend lineare e un filtro passa-banda per esaltare le frequenze tipiche degli eventi sismici e ridurre gli effetti del rumore sismico ambientale. Nel nostro caso il filtro passa-banda ha frequenze di taglio pari a 4 e 20 Hz. Il numero minimo di trigger simultanei richiesti per dichiarare il possibile accadimento di un evento sismico (parametro thr_coincidence_sum) è stato impostato uguale a 4, tenendo conto del ridotto numero di stazioni disponibili.

Alla fine della procedura di triggering sono stati ottenuti 537 segnali transienti che sono stati successivamente estratti dalla registrazione giornaliera e salvati separatamente.

6.2 Risultati del picking manuale delle fasi e della localizzazione

L'insieme dei transienti individuati è stato poi soggetto ad una ispezione visiva, che ha permesso di identificare 328 eventi associabili a terremoti. Per questi eventi sono stati determinati i tempi di primo arrivo delle onde P e S, successivamente utilizzati per la localizzazione.

	SPESSORE (km)	VELOCITÀ P (km/s)	VELOCITÀ S (km/s)
Crosta superiore	11.1	5.00	2.89
Crosta inferiore	26.9	6.50	3.75
Mantello	semispazio	8.05	4.65

Tabella 2 Il modello di velocità delle onde P ed S è costituito da due strati crostali a velocità costante e un semispazio. Il rapporto V_p/V_s è 1.732 per tutti gli strati.

Table 2 P and S velocity model used in the location procedures for the Bollettino Sismico Italiano. Two crustal layers are superimposed to and half-space. The V_p/V_s ratio is 1.732.

La procedura di localizzazione è stata effettuata utilizzando il metodo probabilistico non lineare codificato nel software NonLinLoc (NLLoc) [Lomax et al., 2009]. Questo algoritmo si basa su una ricerca globale dei parametri ipocentrali (coordinate spaziali e tempo origine) ottenendo una stima della funzione di densità di probabilità a posteriori (pdf) dell'ipocentro, secondo il formalismo inizialmente proposto da Tarantola et Valette [1982]. In questo approccio, gli errori di localizzazione a posteriori dipendono non solo dalle incertezze dei dati, ovvero dall'errore nella stima dei tempi di arrivo delle diverse fasi sismiche alle differenti stazioni, ma anche dagli errori del modello, ovvero dalle incertezze nella previsione dei tempi di tragitto come conseguenza di una conoscenza incompleta del modello di velocità. Questi ultimi errori sono implementati utilizzando la relazione: $C_{ij} = \sigma_T(-0.5(D_{ij}^2)/R^2)$, dove C_{ij} è l'elemento della matrice di covarianza dei modelli associato alle incertezze nelle stime dei tempi di tragitto alla i-esima e j-esima stazione,

separate dalla distanza D_{ij} ; σ_T è un errore caratteristico nelle previsioni del tempo di percorrenza; R è la lunghezza di correlazione degli errori tra stazioni, legata alla dimensione caratteristica delle eterogeneità laterali del mezzo. Nella presente applicazione, si sono utilizzati i valori $\sigma_T = 0.1s$ e $R = 1\text{ km}$.

Nel calcolo delle localizzazioni, i tempi di tragitto teorici sono stati calcolati in geometria reciproca utilizzando uno schema alle differenze finite [Podvin e Lecomte, 1990], applicato ad un semplice modello 1-D di velocità a 2 strati e un semispazio, con rapporto $V_p/V_s = 1.73$ [Mele F. et al., 2010; Tabella 2]. L'esplorazione dello spazio dei modelli è stata effettuata con il metodo Octet Tree, applicato ad una griglia di nodi equispaziati di 1 km, ed estesa 200 x 200 km attorno all'invaso, sino ad una profondità di 50 km.

Dei 328 eventi riconosciuti, 298 presentavano il numero minimo di 4 letture dei tempi di arrivo per poter essere localizzati. Di questi, 10 si trovano in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago (latitudine=[39.90°- 40.40°], longitudine=[16.00° - 16.65°]) e riportati in Tabella 3.

evento	latitudine	longitudine	profondità (Km)	errore orizzontale (km)	errore verticale (km)	ML
2021-08-24 13:11:04	40.0095	16.2280	25.0	1.3	1.9	1.10
2021-09-08 05:40:08	40.0683	16.0521	19.5	1.2	1.2	0.93
2021-09-08 14:19:40	40.1388	16.1031	21.5	3	1.7	0.47
2021-09-08 15:08:26	40.0810	16.0942	17.7	1.4	1.5	1.27
2021-09-25 22:24:07	40.0679	16.0553	18.5	1.1	0.8	0.65
2021-09-28 21:25:35	40.1487	16.1673	17.5	1.5	4.2	0.61
2022-03-13 03:51:40	40.3320	16.0170	12.6	12.6	6	0.72
2022-04-20 11:59:20	40.1737	16.0113	9.5	1.4	0.4	1.49
2022-04-20 12:39:25	40.1642	16.0155	8.5	1.3	0.74	0.78
2022-05-10 22:49:29	40.0074	16.3314	10.0	1.5	1.7	0.62

Tabella 3 Localizzazione, errori di localizzazione e ML dei terremoti presenti in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago.

Table 3 Localization, localization errors and ML of the earthquakes in an area of 60 x 60 km around the lake.

In Figura 9 sono mostrati i 10 eventi identificati nell'area di studio, rappresentati da cerchi con colore dipendente dalla profondità; la Figura 9 mostra inoltre la sismicità registrata dalla rete RSN-INGV da gennaio 2000 a giugno 2022 (simboli di colore grigio). Come si vede dalla mappa, la sismicità registrata dalla RSN risulta essere scarsa nell'area del lago, escludendo la zona a Sud Ovest, dove nel maggio del 2013 è avvenuta una piccola sequenza nelle vicinanze di Francavilla in Sinni. Il basso tasso di sismicità registrato negli anni potrebbe essere dovuto sia ad una effettiva scarsa sismicità della zona sia ad una copertura strumentale molto limitata. Tuttavia, si rimarca come durante l'anno di operatività della rete temporanea, siano stati registrati effettivamente pochi eventi.

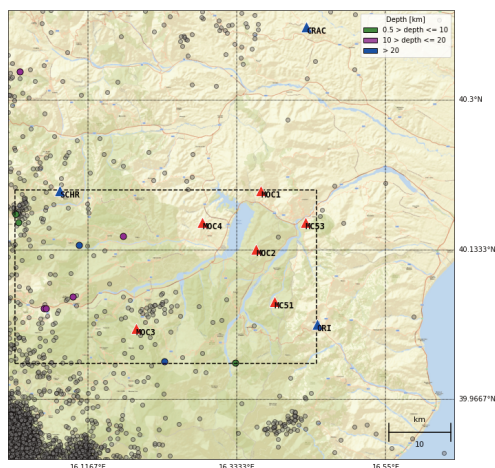


Figura 9 I 10 eventi identificati tra il 23/06/2021 ed il 14/06/2022 utilizzando la rete temporanea (triangoli rossi) e le stazioni CRAC, ORI e SCHR della rete nazionale (triangoli blu), in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago. Il colore degli eventi dipende dalla profondità: verde profondità compresa tra 0.5 e 10 km, rosso tra 10 e 20 km, blu superiori a 20 km. La sismicità localizzata dalla RSN-INGV durante il periodo gennaio 2000 e giugno 2022 è rappresentata con i cerchi in grigio.

Figure 9 The 10 events registered by the temporary network (red triangles) and the stations CRAC, ORI and SCHR of the national network (blue triangles), during the period 23/06/2021 and 14/06/2022, in an area of 60 x 60 km around the lake. The color of the events depends on the depth: green for depths between 0.5 and 10 km, red between 10 and 20 km, blue above 20 km. The seismicity localized by the RSN-INGV network during the period January 2000 and June 2022 is represented with the gray circles.

I parametri utilizzati per valutare la qualità delle localizzazioni sono: la radice quadratica media dei residui (RMS) in secondi, il numero di fasi utilizzate per le localizzazioni (NPHS), gli errori orizzontali e verticali in km, il gap azimutale in gradi. L'RMS è definito come $\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(r_i)^2}{n}}$ dove r è il residuo (cioè la differenza tra i tempi di arrivo osservati e previsti per la i -esima fase) ed n è il numero di osservazioni.

Per quanto riguarda i 10 terremoti localizzati in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago, nel pannello superiore della Figura 10 è possibile notare che l'80% dei terremoti ha un $RMS \leq 0.2$ secondi; occorre notare, tuttavia, che questo parametro è fortemente dipendente dal numero effettivo di fasi (NPHS) utilizzato per la localizzazione. Un basso valore di RMS non è necessariamente correlato ad una localizzazione di alta qualità. Utilizzando un numero esiguo di fasi, potrebbe risultare basso il valore di RMS, ma non gli errori di localizzazione (Figura 11). Infatti, molti eventi presentano rilevanti errori di localizzazione, come illustrato nella Figura 12. Gli errori di localizzazione orizzontali sono definiti con la formula $\sqrt{(\epsilon_{lat})^2 + (\epsilon_{lon})^2}$ (dove ϵ_{lat} e ϵ_{lon} sono rispettivamente gli errori sulla latitudine e sulla longitudine).

Il calcolo della magnitudo locale per ciascun evento è stato effettuato utilizzando la relazione di Bakun and Joyner [1984]: $M_L = \log A + \log R + 0.00301R + 0.70$, dove A è la massima ampiezza del segnale, R è la distanza epicentrale. L'algoritmo per il calcolo della magnitudo comprendeva la correzione per la risposta dello strumento originale e la convoluzione con la risposta del sismometro Wood-Anderson.

Il numero ridotto di eventi non permette di definire una magnitudo di completezza; nelle nostre localizzazioni, la minima magnitudo osservata è stata $M_L \sim 0.5$.

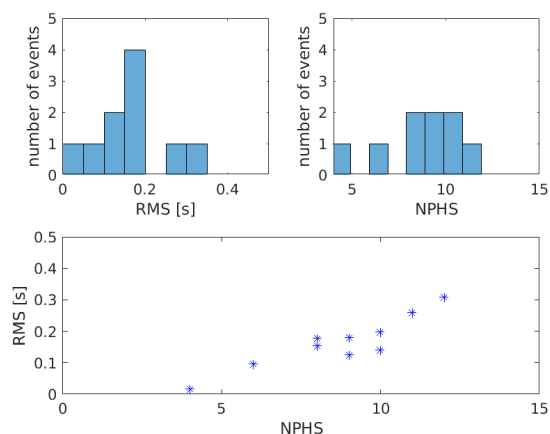


Figura 10 Istogramma del numero di terremoti rispetto a RMS (in alto) e il numero di tempi di arrivo utilizzati per la localizzazione (in basso) per gli eventi presenti in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago.

Figure 10 Histogram of the number of earthquakes versus RMS (top) and the number of arrival times used for localization (bottom) for events that occurred in an area of 60 x 60 km centered on the lake.

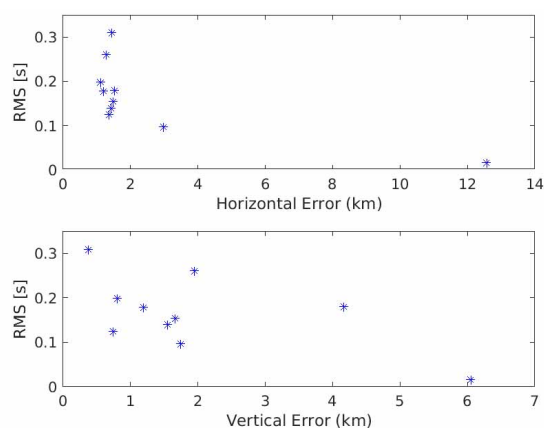


Figura 11 Valori di RMS rispetto agli errori di localizzazione: errori orizzontali (in alto), errori verticali (in basso), per gli eventi presenti in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago.

Figure 11 RMS values related to localization errors: horizontal errors (top), vertical error (bottom), for events that occurred in an area of 60 x 60 km centered on the lake.

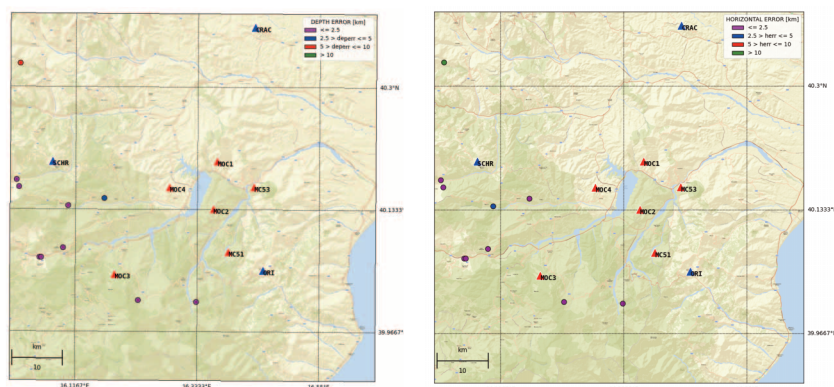


Figura 12 Mappa raffigurante gli eventi presenti in un'area di 60 x 60 km centrata sul lago. Il colore dei punti dipende dall'errore di localizzazione orizzontale (a sinistra) e verticale (a destra) come riportato in legenda.

Figure 12 Map showing the events localized in an area of 60 x 60 km centered on the lake. The color of the dots depends on the horizontal (left) and vertical (right) localization error, as shown in the legend.

6.3 Template Matching

Il catalogo è stato poi utilizzato per una procedura di Template matching, mirata ad individuare possibili altri eventi non discriminati nella fase iniziale di analisi. Il template matching è un metodo di rilevazione di terremoti basato sulla cross-correlazione (CC) di forme d'onda per identificare repliche di un segnale noto, template, in una serie temporale continua [e.g., Gibbons e Ringdal, 2006]. Imponendo una soglia arbitraria sul valore del massimo della cross-correlazione, la tecnica consente la rilevazione di nuovi eventi anche di basso rapporto segnale-rumore, con una sensibilità decisamente migliore rispetto a quanto offerto dalle tecniche convenzionali di discriminazione quali la STA/LTA [e.g., Gibbons & Ringdal, 2006; Schaff, 2008].

Come template sono stati utilizzati i 10 terremoti riportati nel paragrafo precedente. Le stazioni utilizzate per il template matching sono MOC1, MOC2, MOC3, MOC4 e SCHR. Sia i template che la serie dei dati continui sono filtrati per la banda di frequenza [4–15] Hz. In tutte le stazioni il numero di corrispondenze (matches) diminuisce all'aumentare della soglia nel valore massimo di CC; il tasso di decremento, tuttavia, non è costante, mostrando un evidente cambiamento di pendenza a $CC_{max} \sim 0,55$ (Figura 13). Pertanto, abbiamo scelto $CC_{max} = 0,55$ come soglia per selezionare le fasi da ispezionare visivamente. In questo modo sono stati ispezionati tra 20 e 40 possibili corrispondenze (a seconda della stazione, come si vede in Figura 13). Gli eventi effettivi sono risultati 2: il primo (del 2021/09/08, 22:23:41), la cui localizzazione è riportata nella Tabella 4 e risulta essere un foreshock di uno degli eventi usati come template; ed il secondo (del 2022-04-23, 02:27:31) con un basso rapporto segnale rumore per il quale non è stato possibile ottenere un numero di fasi sufficienti per la sua localizzazione.

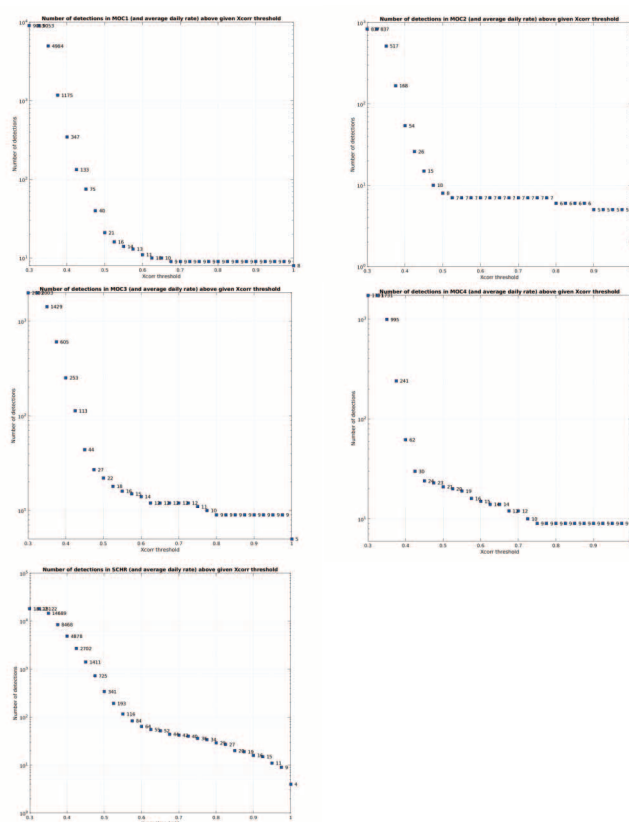


Figura 13 Numero di detezioni per le stazioni MOC1, MOC2, MOC3, MOC4 e SCHR e il rispettivo valore di cross-correlazione.

Figure 13 Number of detections for MOC1, MOC2, MOC3, MOC4 e SCHR station and the respective cross-correlation value.

evento	latitudine	longitudine	profondità (Km)	errore orizzontale (km)	errore verticale (km)
2021-09-08 22:23:41	40.063356	16.053025	15	3.3	3.3

Tabella 4 Localizzazione, errori di localizzazione dell’evento rilevato tramite la tecnica del template matching.
Table 4 Localization, localization errors of the earthquake detected by the template matching method.

7. Discussione e Conclusioni

In questo rapporto tecnico si è descritta l'installazione di una rete sismica temporanea nell'area circostante la diga di Monte Cotugno. L'obiettivo dell'esperimento è quello di integrare le stazioni permanenti attive nella zona, al fine di aumentare il livello di detezone e l'accuratezza delle localizzazioni ipocentrali, in modo da identificare una possibile influenza dell'invaso sulla microsismicità di fondo dell'area.

La rete è stata operativa per circa un anno, da giugno 2021 a giugno 2022, funzionando in modo abbastanza costante e continuativo; i gap nell'acquisizione dei dati sono stati principalmente dovuti a problemi di alimentazione, soprattutto nei periodi autunnale e invernale. La rete temporanea è stata registrata su International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN). I dati registrati in formato miniseed sono messi a disposizione con richiesta agli autori e saranno accessibili alla comunità scientifica tramite web service pubblici EIDA.

Sui dati è stata eseguita una procedura automatica di triggering, che ha portato all'individuazione di 537 eventi potenziali, di cui 328 sono stati riconosciuti come terremoti attraverso un'analisi visiva. Su questi ultimi è stato effettuato il picking manuale dei tempi di arrivo delle fasi P ed S. Il catalogo finale comprende 298 eventi localizzati utilizzando NonLinLoc e il modello di velocità usato per il Bollettino Sismico Italiano [Mele F. et al., 2010]. Di questi eventi, 10 hanno coordinate ipocentrali comprese entro un'area di 60 x 60 km circostante il lago. Le localizzazioni dei 10 eventi presentano per l'80% dei terremoti un RMS inferiore o uguale a 0.2s ed errori orizzontali e verticali inferiori a circa 2 km.

Utilizzando la tecnica del template matching è stato possibile individuare un solo nuovo evento nella zona. Il numero ridotto di eventi non permette di definire una magnitudo di completezza; la minima magnitudo osservata corrisponde a $M_L \sim 0.5$. Se, quindi, esiste una relazione tra sismicità e livello di riempimento dell'invaso, presumibilmente questa vale per magnitudo ancora inferiori. Considerando il basso numero di eventi registrati, una valutazione statistica di eventuali correlazioni tra tassi di sismicità ed il livello del lago non è fattibile. Tuttavia, per completezza, in Figura 14 si presentano i dati del livello della diga (disponibili tramite il sito web dell'autorità di Bacino della Basilicata, raggiungibile all'indirizzo <http://www.adb.basilicata.it>, con dati forniti dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia) confrontati con la sismicità localizzata all'interno del rettangolo che si mostra nella mappa in Figura 9 (localizzazioni tra il 2000 e 2022 della RSN in grigio e nuovi eventi identificati in questo lavoro in rosso).

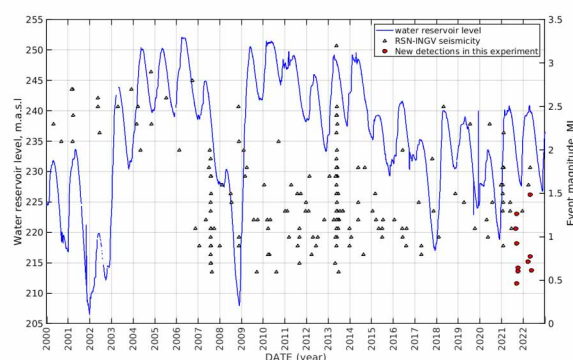


Figura 14 Dati del livello dell'invaso (linea blu, dati da forniti dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia, tramite il sito <http://www.adb.basilicata.it>) confrontati con la sismicità localizzata nel rettangolo riportato in Figura 9: eventi registrati dalla rete RSN-INGV dal 2000 al 2022 in triangoli di colore grigio; eventi identificati in questo lavoro in cerchi di colore rosso.

Figure 14 Water reservoir level data (blue line, data provided by Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia, via <http://www.adb.basilicata.it>) compared with the seismicity localized in the rectangle shown in Figure 9: events recorded by the RSN-INGV network from 2000 to 2022 in grey triangles; events identified in this work in red circles.

Gli elementi forniti da questo rapporto tecnico possono essere di supporto all'individuazione di nuovi siti nell'ambito di un possibile sviluppo futuro della Rete Sismica Nazionale nell'area. Sia il catalogo strumentale della Rete Sismica Nazionale per gli ultimi venti anni, che i risultati del nostro esperimento temporaneo, indicano che l'area di studio è caratterizzata da un tasso di sismicità estremamente ridotto. Un eventuale, futuro approfondimento delle possibili relazioni tra sismicità e livello dell'invaso dovrà quindi prevedere l'impiego di una rete sismica molto più densa, da mantenersi in operatività per un periodo più esteso.

Bibliografia

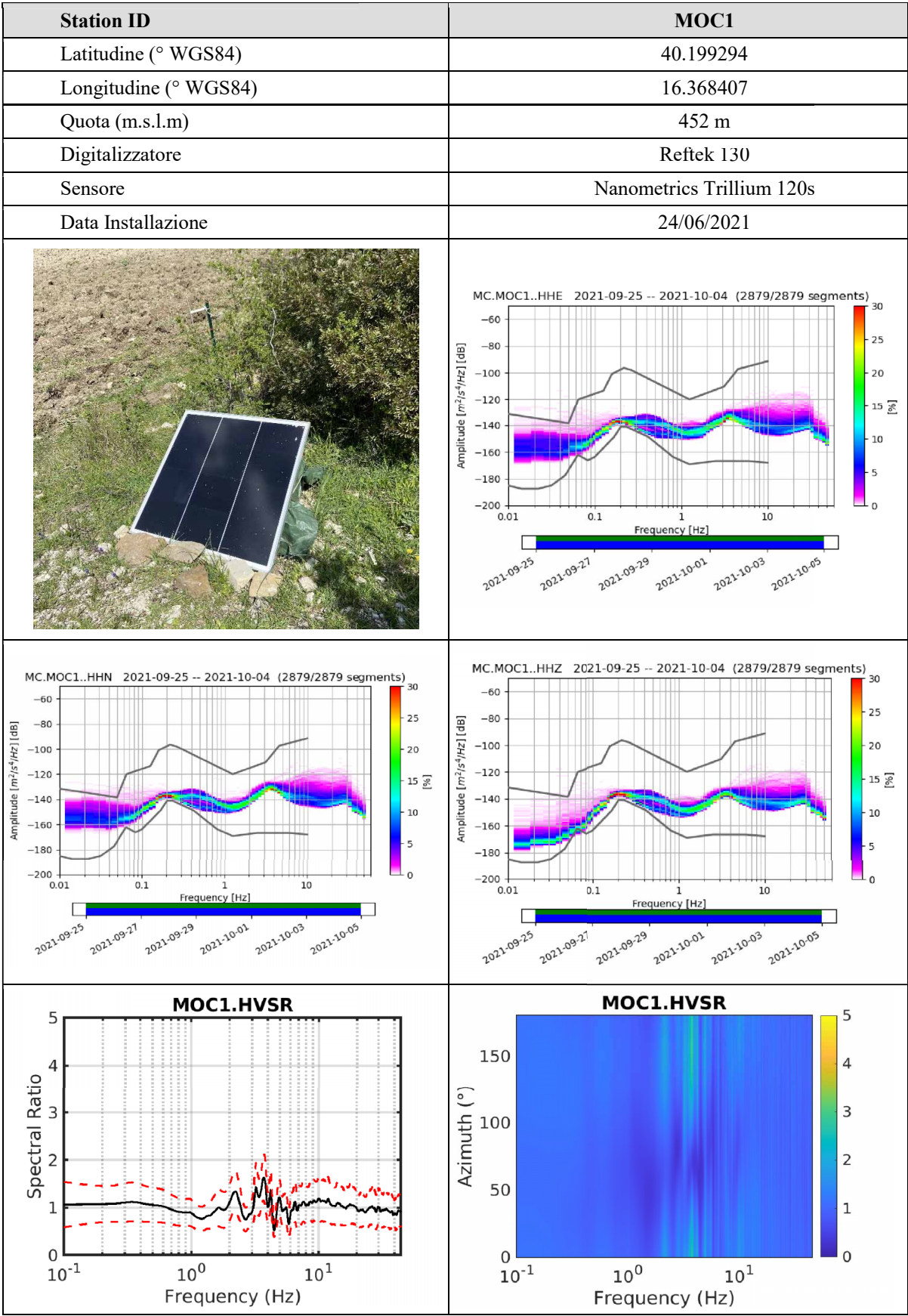
- Bakun W. H. and Joyner W. B., (1984). *The M_L scale in central California*. Bulletin of the Seismological Society of America, 74, 5, 1827-1843, <https://doi.org/10.1785/BSSA0740051827>
- Biagini D., D'Ambrosio M., Capello M., Bruni R., Giunchi C., Piccinini D., Saccorotti G., Zuccarello L., (2023). *Progettazione e realizzazione di infrastrutture a basso costo per stazioni sismiche semi-permanenti*. Rapp. Tec. INGV, 463, 1-30, <https://doi.org/10.13127/rpt/463>
- Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Megies T., Behr Y., Wassermann J., (2010). *ObsPy: A Python Toolbox for Seismology*. Seismological Research Letters, 81, 3, 530-533, <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530>
- Burrigato F., Mattias P., Barrese E., Moriconi C., and Farabollini P., (1988). *Le Argille azzurre dei versanti dell'invaso di Monte Cotugno, Valle del Fiume Sinni (F° 211-S. Arcangelo). Criteri di correlazione e di differenziazione mineralogica, chimica et geotecnica*. Geologia applicata e idrogeologia, 23, 1-28.
- Callari, C., Jappelli, R., (2004). *Comportamento a breve e a lungo termine della diga di Monte Cotugno sul fiume Sinni*. XXII Convegno Nazionale Geotecnica - Palermo 22-24 Settembre.
- Compagnoni B., Galluzzo F., Bonomo R., Capotorti F., D'Ambrogio C., Di Stefano R., Graziano R., Martarelli L., Pampaloni M.L., Pantaloni M., Ricci V., Tacchia D., Masella G., Pannuti V., Ventura R., Vitale V., (2011). *Carta Geologica d'Italia. Servizio Geologico d'Italia ISPRA*,

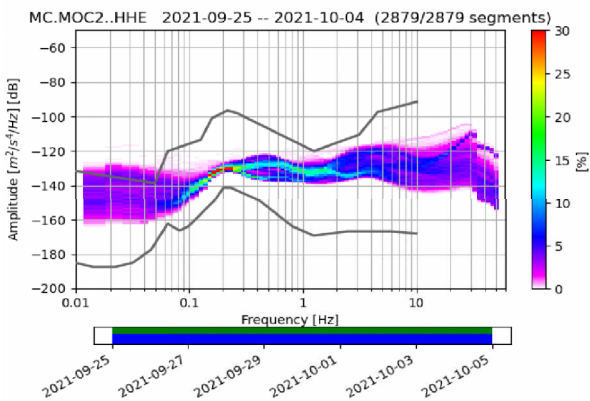
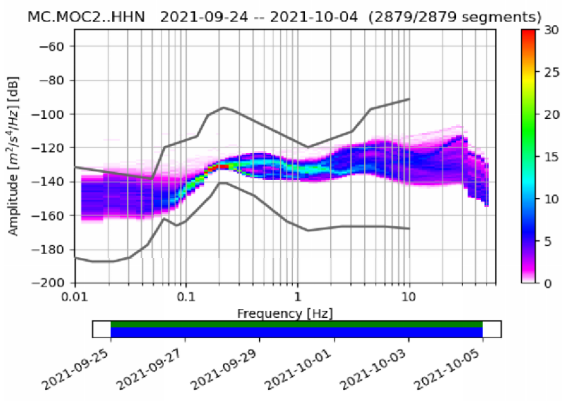
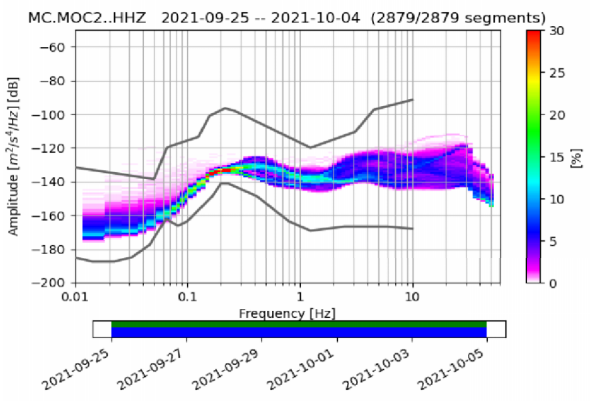
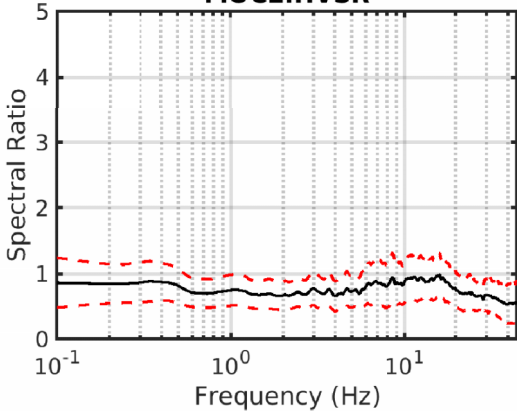
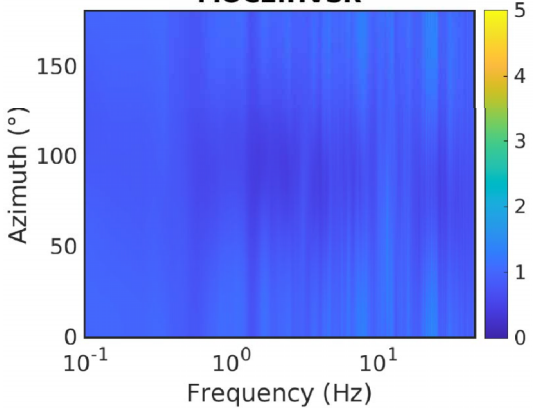
- <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/cartografia/carte-geologiche-a-piccola-scala/carta-geologica-alla-scala-1-a-1000000>
- Doglioni C., Harabaglia P., Martinelli G., Mongelli F. and Zito G., (1996). *A geodynamic model of the Southern Apennines accretionary prism*. Terra Nova, 8, 540-547, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1996.tb00783.x>
- Gibbons S. J. and Ringdal F., (2006). *The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation*. Geophysical Journal International, 165, 1, 149– 166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x>
- Helmholtz-Centre Potsdam - GFZ German Research Centre for Geosciences and gempa GmbH, (2008). *The SeisComP seismological software package*. GFZ Data Services, doi: 10.5880/GFZ.2.4.2020.003.
- Improta L., Bagh S., De Gori P., Valoroso L., Pastori M., Piccinini D., Chiarabba C., Anselmi M. and Buttinelli, M., (2017). *Reservoir structure and wastewater-induced seismicity at the Val d'Agri Oilfield (Italy) shown by three-dimensional Vp and Vp/Vs local earthquake tomography*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(11), 9050-9082, <https://doi.org/10.1002/2017JB014725>
- ISPRA, (2014). https://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/rapporto-sismicita-indotta-innescata-in-italia/Rapporto_sismicita_indotta_innescata_in_italia.pdf
- Krischer L., Megies T., Barsch R., Beyreuther M., Lecocq T., Caudron C., Wassermann J., (2015). *ObsPy: a bridge for seismology into the scientific Python ecosystem*. Computational Science & Discovery, 8,1, 014003, doi: 10.1088/1749-4699/8/1/014003
- Loperte A., Soldovieri F., Palombo A., Santini F. and Lapenna V., (2016). *An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy)*. Engineering Geology, 211, 162-170, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.07.005>
- Lomax A., Michelini A., Curtis A., (2009). *Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods, in Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science*, Part 5, Springer, New York, 2449-2473, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3>
- McNamara D. E. and Buland R. P., (2004). *Ambient noise levels in the continental United States*. Bulletin of the seismological society of America 94, 4, 1517-1527. <https://doi.org/10.1785/012003001>
- McNamara D. E. and Boaz R. I., (2006). *Seismic noise analysis system using power spectral density probability density functions: A stand-alone software package*. US Geological Survey, Open-File Report. 2005-1438. <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1438/pdf/OFR-1438.pdf>
- Megies T., Beyreuther M., Barsch R., Krischer L., Wassermann J., (2011). *ObsPy – What can it do for data centers and observatories?* Annals of Geophysics, 54, 1, 47-58, doi: 10.4401/ag-4838
- Mele F., Arcoraci L., Battelli P., Berardi M., Castellano C., Lozzi G., Marchetti A., Nardi A., Pirro M. and Rossi A., (2010). *Bollettino Sismico Italiano 2008*. Quaderni di Geofisica, 85, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://editoria.ingv.it/archivio_pdf/qdg/85/pdf/qdg_85.pdf](https://editoria.ingv.it/archivio_pdf/qdg/85/pdf/qdg_85.pdf)
- Monaco C., Tortorici L. and Paltrinieri W., (1998). *Structural evolution of the Lucanian Apennines, southern Italy*. Journal of Structural Geology, 20, 5, 617-638, [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(97\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(97)00105-3)
- Nakamura Y., (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30, 25-33, [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf](https://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf)
- Nicolai C. and Gambini R., (2007). *Structural architecture of the Adria platform-and-basin system*. Bollettino della Società Geologica Italiana, 7, 21-37, https://www.researchgate.net/publication/277015552_Structural_architecture_of_the_Adria_platform-and-basin_system

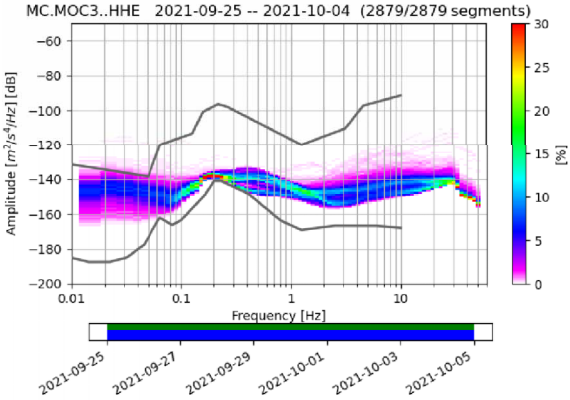
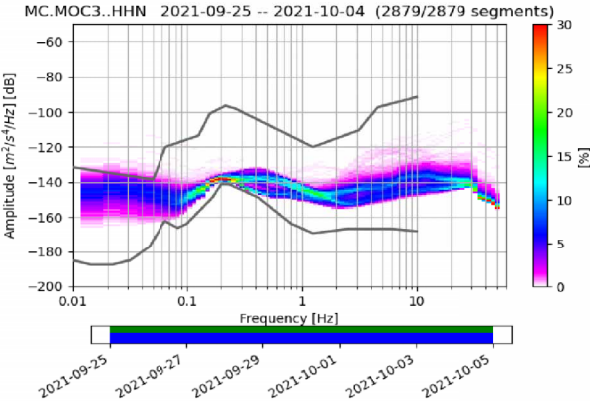
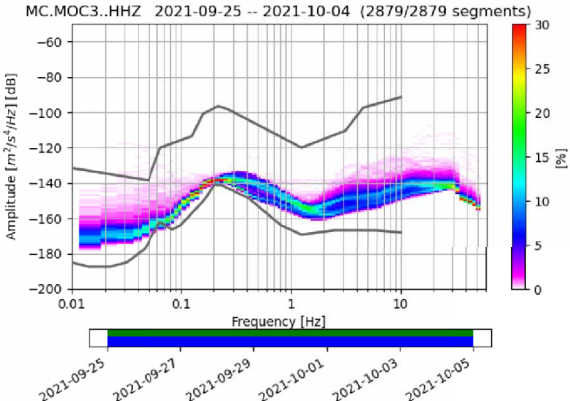
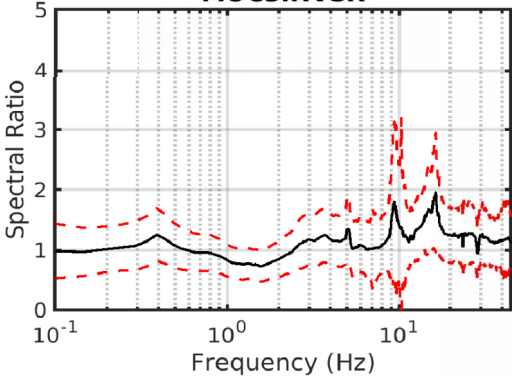
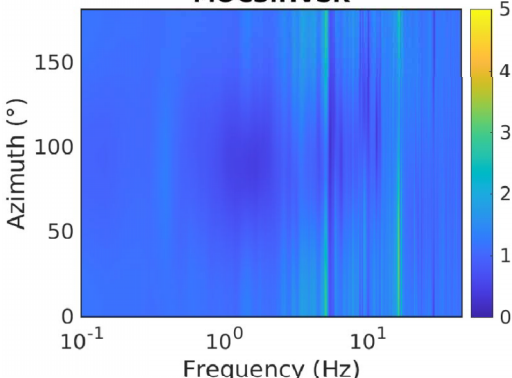
- Peterson J., (1993). *Observation and modeling of seismic background noise*. U.S. Geol. Surv. Tech. Rept., 93-322, 1-95, 1993, <https://doi.org/10.3133/ofr93322>
- Podvin P. and Lecomte I., (1991). *Finite difference computation of traveltimes in very contrasted velocity models: a massively parallel approach and its associated tools*. Geophysical Journal International, 105, 1, 271-284, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03461.x>
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. & Antonucci A., (2022). *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI15*, versione 4.0.,
chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/data/CPTI15_v4.0_descrizione.pdf
- Schaff D. P., (2008). *Semiempirical statistics of correlation-detector performance*. Bulletin of the Seismological Society of America, 98, 3, 1495– 1507, <https://doi.org/10.1785/0120060263>
- Schorlemmer D., Zechar J. D., Werner M. J., Field E. H., Jackson D. D., Jordan T. H. & RELM Working Group., (2010). *First results of the regional earthquake likelihood models experiment*. In Seismogenesis and Earthquake Forecasting: The Frank Evison, 2, 5-22, https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0500-7_2
- Tarantola A. and Valette B., (1982). *Inverse problems= quest for information*. Journal of geophysics, 50, 1, 159-170, <https://n2t.net/ark:/88439/y048722>
- Valoroso L., Improta L., Chiaraluce L., Di Stefano R., Ferranti L., Govoni A., Chiarabba C., (2009). *Active faults and induced seismicity in the Val d'Agri area (Southern Apennines, Italy)*, Geophysical Journal International, 178, 1, 488–502, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04166.x>

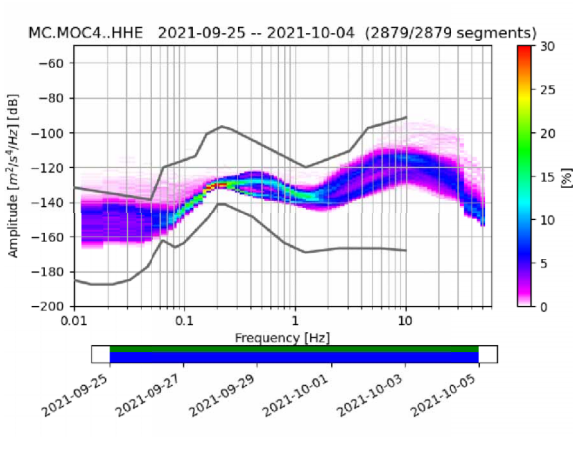
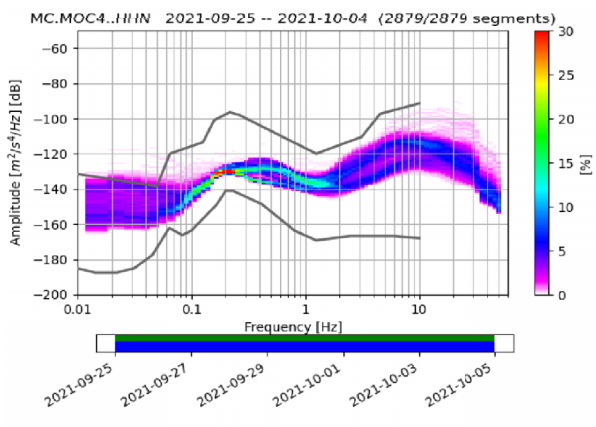
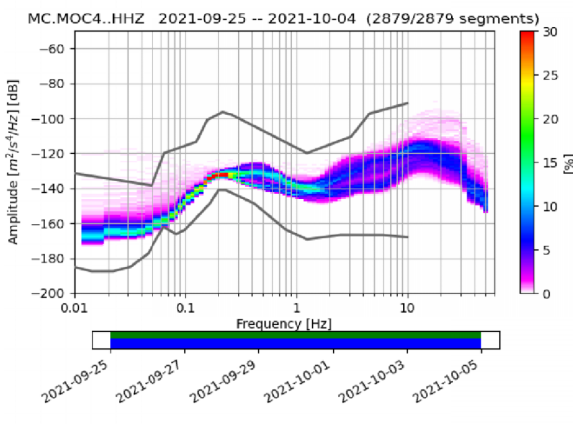
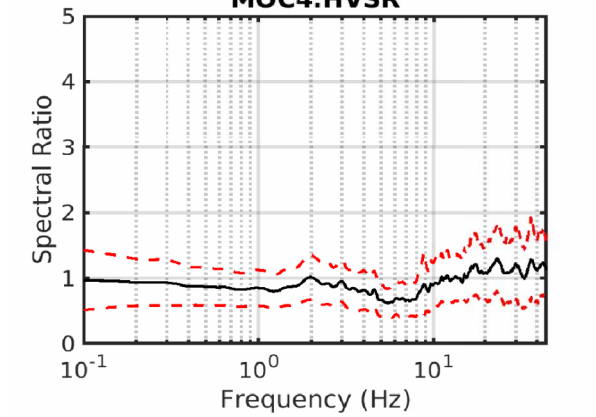
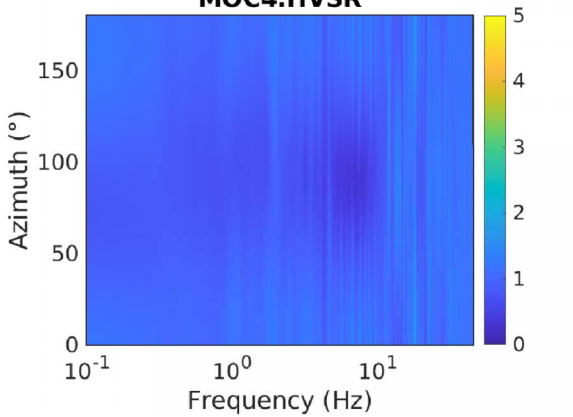
APPENDICE

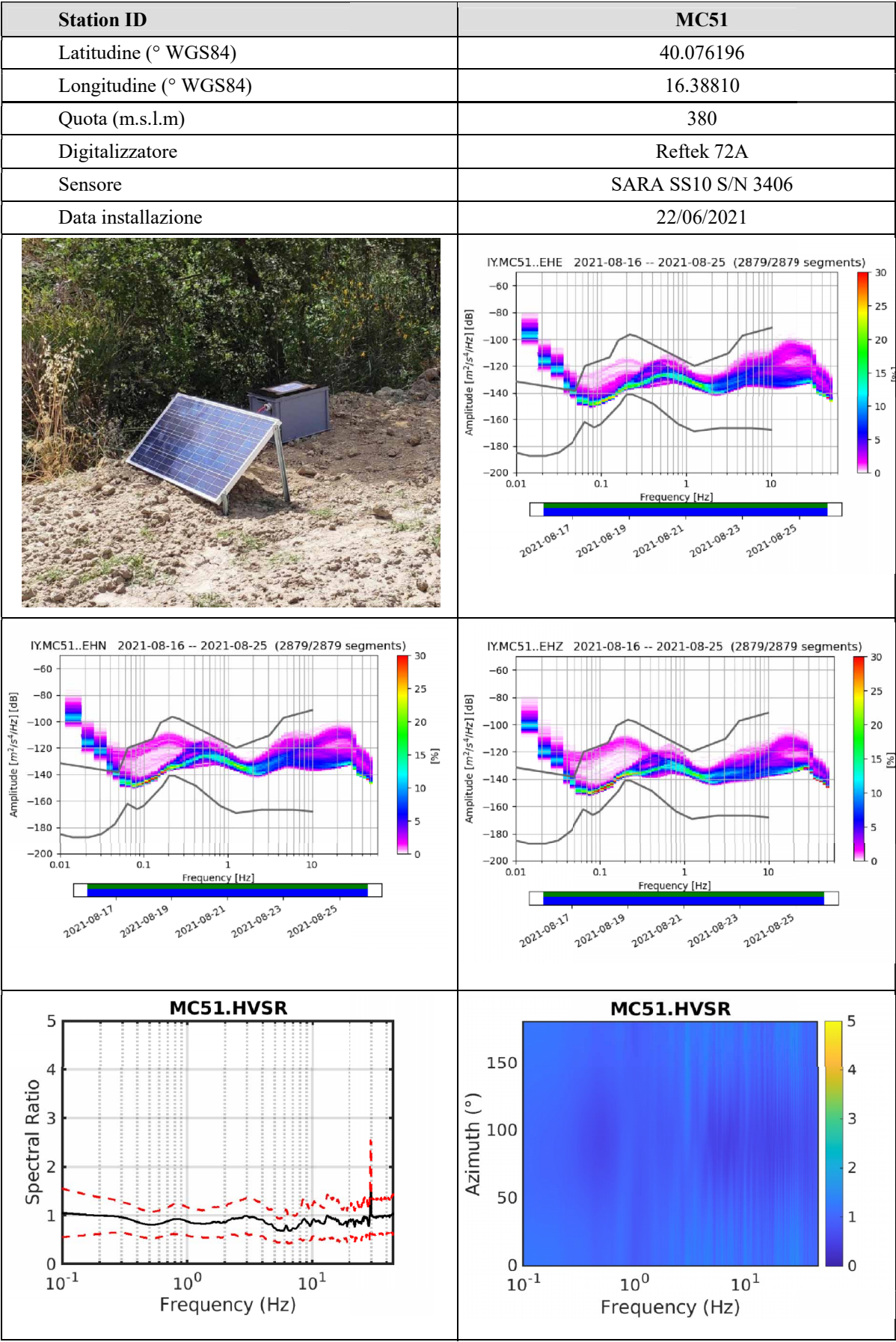
SCHEDE DI STAZIONE

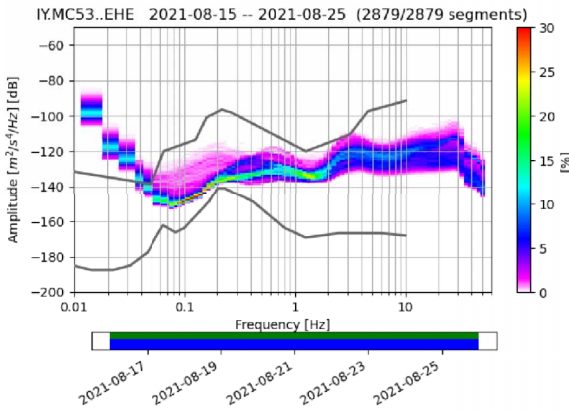
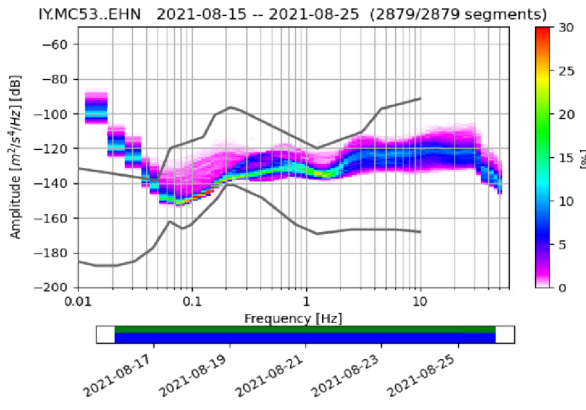
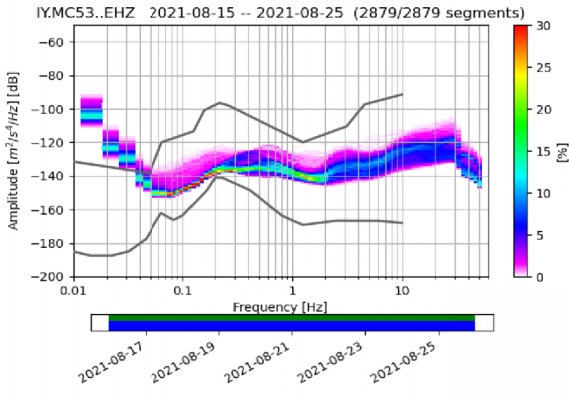
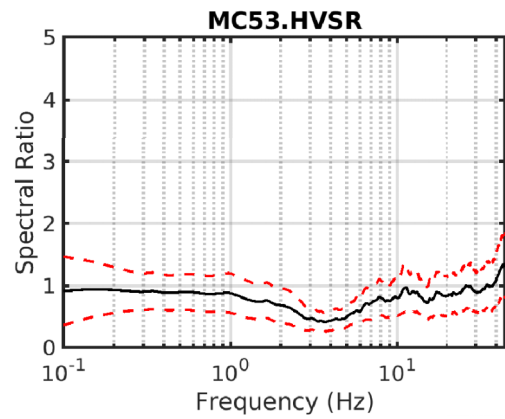
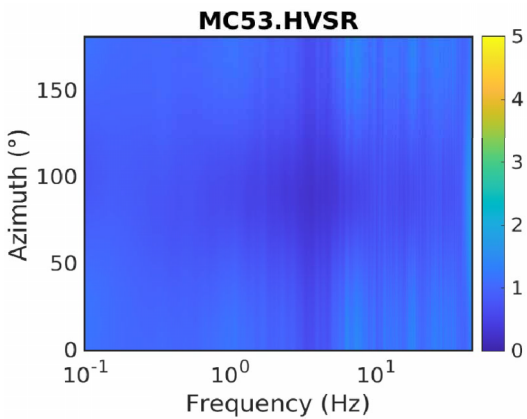


Station ID	MOC2
Latitudine (° WGS84)	40.13404
Longitudine (° WGS84)	16.361631
Quota (m.s.l.m)	475 m
Digitalizzatore	Reftek 130
Sensore	Nanometrics Trillium 120s
Data installazione	24/06/2021
	
	
	

Station ID	MOC3
Latitudine (° WGS84)	40.045743
Longitudine (° WGS84)	16.186639
Quota (m.s.l.m)	802 m
Digitalizzatore	Reftek 130
Sensore	Nanometrics Trillium 120s
Data installazione	23/06/2021
	
	
	

Station ID	MOC4
Latitudine (° WGS84)	40.164124
Longitudine (° WGS84)	16.283555
Quota (m.s.l.m)	438 m
Digitalizzatore	Reftek 130
Sensore	Nanometrics Trillium 120s
Data installazione	24/06/2021
	MC.MOC4...HHE 2021-09-25 -- 2021-10-04 (2879/2879 segments) 
MC.MOC4...HHN 2021-09-25 -- 2021-10-04 (2879/2879 segments) 	MC.MOC4...HHZ 2021-09-25 -- 2021-10-04 (2879/2879 segments) 
MOC4.HVSR 	MOC4.HVSR 



Station ID	MC53
Latitudine (° WGS84)	40.164506
Longitudine (° WGS84)	16.435542
Quota (m.s.l.m)	300
Digitalizzatore	Reftek 72 A
Sensore	SARA SS10 S/N 3407
Data installazione	23/06/2021
	
	
	

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.) raccolgono 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

©2023

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



ISTITUTO NAZIONALE
DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA