

QUADERNI di GEOFISICA

La sismicità dell'area etnea nel
periodo Gennaio – Dicembre 2021



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

192

Direttore Responsabile

Daniela VERSACE

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)
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)
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
Rossella CELI - Segreteria di Redazione

Produzione e grafica-redazionale

Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Rossella CELI
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

QUADERNI di GEOFISICA

La sismicità dell'area etnea
nel periodo Gennaio – Dicembre 2021

*The seismicity at Etna volcano
in the period January – December 2021*

Ferruccio Ferrari, Elisabetta Giampiccolo, Carla Musumeci, Giuseppina Tusa, Tiziana Tuvè*,
Giuseppe Di Grazia, Antonino Mostaccio, Mariangela Sciotto

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania – Osservatorio Etneo

*Corresponding author

Accettato 7 giugno 2024 | Accepted 7 June 2024

Come citare | How to cite Ferrari F., Giampiccolo E., Musumeci C., Tusa G., Tuvè T., Di Grazia G., Mostaccio A., Sciotto M., (2024). La sismicità dell'area etnea nel periodo Gennaio – Dicembre 2021. Quad. Geofis., 192: 1-32, <https://doi.org/10.13127/qdg/192>

In copertina | Mappa e meccanismi focali degli eventi con $ML \geq 2.5$ | Cover Map and focal mechanisms of the earthquakes with $ML \geq 2.5$

192

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. La rete sismica dell'Osservatorio Etneo nel 2021	8
2. Sismicità etnea	9
3. Sequenze sismiche	14
4. Confronto tra attività sismica e vulcanica	23
5. Meccanismi focali	24
6. Note conclusive	26
Ringraziamenti	28
Bibliografia	28

Riassunto

Questo lavoro descrive le principali caratteristiche della sismicità legata agli eventi vulcano-tettonici registrati nell'area etnea durante il 2021 dalla Rete Sismica dell'Osservatorio Etneo, Sezione di Catania (INGV-OE).

I terremoti localizzati sono 1763, su un totale di 2315 eventi registrati. Poco meno del 40% di essi appartiene alle 27 sequenze sismiche individuate nel corso dell'anno, la più importante delle quali, sia per numero di eventi (circa un centinaio) che per rilascio di energia, è quella registrata tra il 24 e il 25 gennaio, 1.5 km ad est da M. Fontane (versante nord orientale del vulcano) ad una profondità superiore ai 10 km. Per quanto riguarda la sola energia sismica rilasciata, sono invece due le sequenze sismiche più significative, entrambe formate da eventi superficiali. La prima è stata registrata tra il 14 e il 17 gennaio nell'area dei Crateri Centrali, mentre la seconda è stata registrata il 24 dicembre, 2 km a nord da Zafferana Etnea.

Gli eventi localizzati (<http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc>) hanno complessivamente valori di magnitudo locale compresi tra 0 e 3.6, mentre le profondità focali sono tra 1.6 km al di sopra del livello del mare e 35 km sotto il livello del mare. Sono 8 gli eventi che hanno raggiunto e superato $M_L = 3.0$, quasi tutti appartenenti alle sequenze sismiche registrate.

La magnitudo di completezza (M_C) degli eventi registrati nel 2021 è pari a $1.4 (\pm 0.05)$, leggermente più alta di quella stimata per l'anno precedente ($M_C = 1.2 \pm 0.01$), mentre il b -value è rimasto praticamente costante ($b = 1.22 \pm 0.06$).

La sismicità nel suo complesso ha interessato i settori centro-orientale e meridionale del vulcano. Si evidenzia una tendenza della sismicità più profonda (al di sotto di 10 km) a formare dei *cluster*, ovvero gruppi di eventi concentrati nello spazio e nel tempo. Viceversa, la sismicità più superficiale appare più sparsa, concentrata soprattutto nel versante orientale e, in minor misura, in quello meridionale.

La cinematica associata ai terremoti con $M_L \geq 2.5$, per i quali è stato possibile calcolare i meccanismi focali, evidenzia una prevalenza di meccanismi sorgente di tipo trascorrente (59%), seguiti da soluzioni di tipo diretto (26%) e più raramente di tipo inverso (15%). Tali soluzioni focali sono in accordo con i meccanismi di sorgente che tipicamente caratterizzano l'area etnea, coerentemente con il contesto strutturale nel quale il vulcano è inserito.

Da un confronto tra l'attività sismica e quella vulcanica è emerso che nel 2021 ad un aumento dell'attività esplosiva parossistica sia corrisposto un generale decremento nel tasso di occorrenza dei terremoti, soprattutto quelli più superficiali localizzati nell'area dei crateri centrali.

Abstract

This paper describes the main characteristics of the seismicity linked to the volcano-tectonic events recorded at Mount Etna during 2021 by the Seismic Network of the INGV - Etnean Observatory (OE). Out of a total of 2315 events recorded at Mount Etna, 1763 are the ones located. About 40% of these events belong to the 27 seismic sequences identified during the year. The most important sequence, both in terms of number of events (about a hundred) and of seismic energy release, occurred on January 24 and 25, 1.5 km east of Mt. Fontane (northeastern flank) at a depth greater than 10 km b.s.l.

As regards the seismic energy alone released, two significant seismic sequences can be distinguished, both characterized by shallow events. The first one was recorded between 14 and 17 January in the Central Craters area, while the second one was recorded on December 24, 2 km north of Zafferana Etnea. Localized seismic events (<http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc>) have overall local magnitude values between 0 and 3.6, while the focal depths are between 1.6 km above sea level and 35 km below sea

level. Eight events reached and exceeded $M_L = 3.0$, almost all belonging to the recorded seismic sequences. The completeness magnitude (M_C) of the events recorded in 2021 is equal to $1.4 (\pm 0.05)$, slightly higher than that one estimated for the previous year ($M_C = 1.2 \pm 0.01$), while the b -value remained practically constant ($b = 1.22 \pm 0.06$).

The seismicity, as a whole, affects the central-eastern and southern sectors of the volcano. The deeper earthquakes (below 10 km) tend to form clusters, i.e. groups of events concentrated in space and time. Conversely, the shallow seismicity appears more scattered, but mainly concentrated in the eastern side and, to a lesser extent, in the southern one.

The kinematics associated with the most energetic earthquakes ($M_L \geq 2.5$), for which it was possible to calculate the focal mechanisms, highlights a prevalence of strike-slip focal mechanisms (59%), followed by direct-type solutions (26%). Reverse type solutions are rare (15%), in agreement with the source mechanisms that typically characterize the Etna area and consistently with the regional structural setting.

From a comparison between seismic and volcanic activity that occurred in 2021, it was observed that an increase in the paroxysmal explosive activity corresponded to a general decrease in the rate of occurrence of earthquakes, especially the shallower earthquakes.

Keywords Rete Sismica INGV-OE; Sismicità etnea; Meccanismi focali | Permanent Seismic Network INGV-OE; Etna seismicity; Focal mechanisms

Introduzione

I terremoti registrati dalle Reti Sismiche dell'Osservatorio Etneo (OE), elaborati in via preliminare da un sistema di localizzazione automatica e tempestivamente riviste dal personale di turno in Sala Operativa, sono disponibili sul sito web dell'INGV (<http://terremoti.ingv.it/>) e sul portale della sezione di Catania (<https://www.ct.ingv.it/>).

Le localizzazioni di sala operativa sono successivamente riviste ed integrate dal Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici dell'OE (GLAOE). Le localizzazioni ottenute vengono quindi archiviate all'interno di un database e pubblicate, dal giorno lavorativo successivo all'accadimento dell'evento, nella sezione Banche Dati Terremoti del portale web della sezione <http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc>, così da mettere a disposizione dell'intera comunità scientifica un prodotto affidabile, interrogabile in base alle esigenze dell'utente.

Nel presente lavoro viene descritta l'attività sismica vulcano-tettonica localizzata nell'area etnea nel 2021, delineandone le caratteristiche in termini di parametri ipocentrali, magnitudo, meccanismi focali e *strain release*. Tale sismicità è stata quindi correlata con le fenomenologie vulcaniche di maggiore rilevanza verificatesi nel 2021.

1. La rete sismica dell'Osservatorio Etneo nel 2021

Nel corso del 2021, nell'area etnea sono state operative mediamente 34 stazioni sismiche di cui 30 appartenenti alla Rete Permanente (RSP) e 4 alla rete mobile (RSM). Queste ultime rappresentano un'importante fonte di integrazione della RSP poiché concorrono al miglioramento della geometria di rete aumentando la capacità di rilevamento dei terremoti, soprattutto in occasione di importanti fasi sismiche. Esse rappresentano inoltre una risorsa utile in caso di sostituzione temporanea di stazioni permanenti soggette a malfunzionamento. Le stazioni sismiche della RSP (Figura 1) sono equipaggiate con sensori velocimetrici a larga

banda, prevalentemente Trillium 40s in progressiva sostituzione con Guralp CMG-3EX 120s, mentre la rete mobile adotta quasi esclusivamente sensori Trillium Compact 120s. Tutte le stazioni, sia permanenti che temporanee, sono in acquisizione continua, in *real time* e sono campionate ad una frequenza di 100 Hz.

Il continuo processo di rinnovamento tecnologico e il potenziamento della Rete Sismica Permanente (RSP) condotto dall'INGV-OE negli ultimi vent'anni ha determinato una capacità di deteazione sempre più elevata, permettendo di raggiungere in alcune aree una soglia di magnitudo minima pari a circa 0.2 (<https://www.ct.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-sorveglianza/reti-di-monitoraggio/rete-sismica/rete-sismica-permanente>).

I dettagli tecnici e la configurazione delle stazioni sismiche installate sull'Etna durante il 2021 sono consultabili alla pagina web <http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc>.

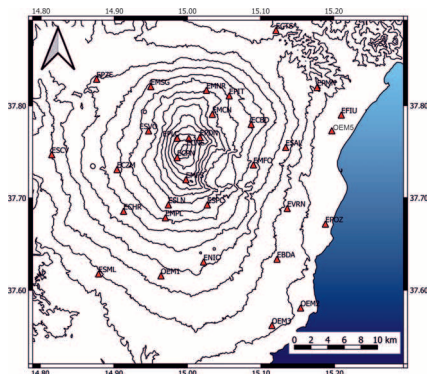


Figura 1 Mappa delle stazioni della Rete Sismica Permanente dell'INGV-OE operanti nel corso del 2021 nell'area Etna.

Figure 1 Map of stations belonging to the Permanent Seismic Network of INGV-OE operating during 2021 in the Etna area.

2. Sismicità etnea

Durante il 2021 i terremoti localizzati nell'area etnea sono stati 1763, su un totale di 2315 eventi registrati. I restanti 552 terremoti non sono stati localizzati perché caratterizzati da un numero di letture dei primi arrivi P inferiore a 4.

Il software utilizzato per l'analisi dei terremoti è *SeismPicker* [Montalto et al., 2013], che a sua volta utilizza il programma di localizzazione *Hypoellipse* [Lahr, 1989] e un modello di velocità 1D [Hirn et al., 1991]. Tutti i parametri ipocentrali dei terremoti localizzati sono riportati nel database <http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc>.

L'attività sismica del 2021 ha visto una modesta diminuzione del tasso di occorrenza degli eventi rispetto a quello che ha caratterizzato il 2020 (2287 eventi localizzati), mentre l'intervallo di magnitudo locale (M_L), tra 0.0 e 3.6, risulta essere del tutto confrontabile con quello stimato per l'anno precedente ($0.2 \leq M_L \leq 3.7$ nel 2020) [Barberi et al., 2022].

Il 33% del totale degli eventi localizzati nel 2021 ha una $M_L \geq 1.5$ (Figura 2a), mentre lo 0.5% del totale dei terremoti localizzati (9 eventi) ha raggiunto e superato il valore di M_L pari a 3.0 (Figura 2c). Il terremoto più energetico ($M_L = 3.6$) si è verificato il 24 dicembre alle ore 09:19 (UTC), 1.7 km a nord di Zafferana Etnea, sul versante orientale del vulcano, ad una profondità di 3.8 km sotto il livello del mare (s.l.m.). In Figura 3(a-e) viene mostrata la distribuzione spaziale degli epicentri di tutti gli eventi localizzati, rappresentata sia in funzione della profondità che della magnitudo. È possibile notare che tutti i settori del complesso vulcanico etneo hanno contribuito al rilascio di energia sismica, sebbene una maggiore concentrazione di eventi appare evidente in corrispondenza dei versanti centro orientale e centro meridionale (Figura 3a). La sismicità risulta maggiormente concentrata nei livelli crostali più superficiali. Infatti, il 35% del totale degli eventi è localizzato a profondità inferiori a 5 km ed il 31% nell'intervallo di profondità tra 5 e 10 km (Figure 2b e 3b-c). La sismicità ha interessato in misura decisamente inferiore i livelli intermedi

(12% del totale nell'intervallo tra 10 e 15 km) e profondi (22% del totale ha profondità >15 km) della crosta Etnea (Figure 2b e 3d-e).

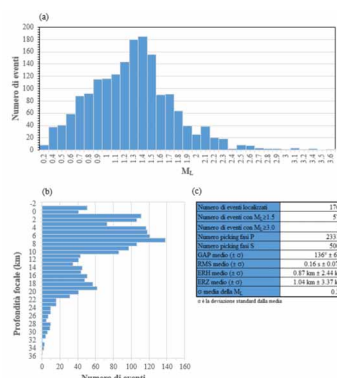


Figura 2 (a) Distribuzione del numero di eventi localizzati in funzione della magnitudo locale presenti nel catalogo (ultimo accesso 1 luglio 2023), il cui picco massimo ha $M_L = 1.4$. (b) Distribuzione del numero di eventi in funzione della profondità focale. (c) Parametri ipocentrali dei terremoti localizzati nell'area etnea.

Figure 2 (a) Number of localised events versus local magnitude reported in the catalogue (last access: July 1, 2023), whose maximum peak has $M_L = 1.4$. (b) Frequency distribution of earthquakes with respect to focal depth. (c) Hypocentral parameters of the localised earthquakes recorded in the Etna area.

La sismicità superficiale e intermedia ($z < 15$ km) ha interessato nel suo complesso tutto l'edificio etneo. Una maggiore concentrazione dei fuochi è stata osservata nell'area centrale ed orientale (Figura 3b-c). La sismicità localizzata a profondità maggiori ($z \geq 15$ km) ha interessato prevalentemente i settori settentrionale e centro-orientale del vulcano (Figura 3d-e), e si è manifestata principalmente in forma di *cluster* di eventi. Il settore occidentale dell'edificio vulcanico appare sismicamente meno attivo e sede di una sismicità più profonda (fino a 35 km nel settore nord-occidentale), che rappresenta la risposta fragile all'attività tettonica connessa ai sistemi strutturali regionali, legati al regime compressivo della Catena Appennino-Maghrebide [Alparone et al., 2014].

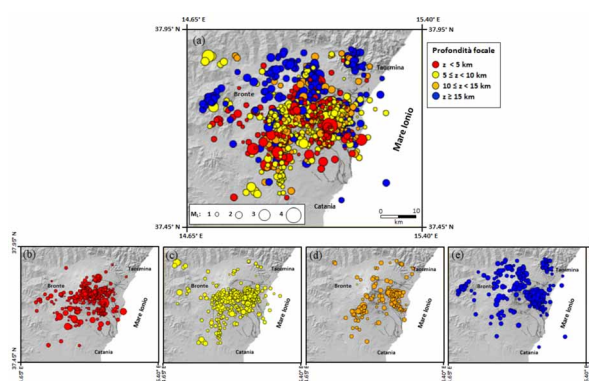


Figura 3 (a) Mappa epicentrale degli eventi etnei localizzati (ultimo accesso al catalogo 1 luglio 2023). La dimensione dei cerchi è proporzionale alla magnitudo. Mappe della stessa sismicità suddivise in profondità: (b) $z < 5$ km, (c) $5 \text{ km} \leq z < 10$ km, (d) $10 \text{ km} \leq z < 15$ km ed (e) $z \geq 15$ km sotto il livello del mare.

Figure 3 (a) Epicentral map of Mount Etna seismicity (last access at the catalogue: July 1, 2023). Circle dimension is proportional to the magnitude. Epicentral maps for different depth levels: (b) $z < 5$ km, (c) $5 \text{ km} \leq z < 10$ km, (d) $10 \text{ km} \leq z < 15$ km, and (e) $z \geq 15$ km below sea level.

La Figura 4 mostra la distribuzione temporale della sismicità durante il 2021 e suggerisce che il 75% di essa è stata registrata durante la prima metà dell'anno; è evidente il contributo più importante dei terremoti localizzati entro i primi 10 km di profondità sulla sismicità totale dell'area.

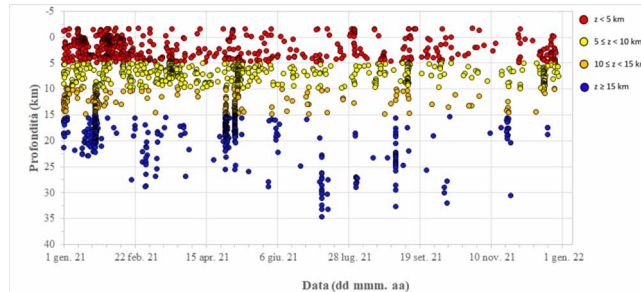


Figura 4 Distribuzione temporale delle profondità focali degli eventi etnei localizzati nel periodo gennaio–dicembre 2021. La dimensioni dei pallini è proporzionale alla magnitudo locale suddivisa in quattro classi, come riportato in Figura 3.

Figure 4 Earthquake depth distribution vs time from January to December 2021. The size of circles is proportional to the local magnitude according to four different classes, as reported in Figure 3.

In Figura 5 viene mostrata la somma cumulata nel tempo della radice quadrata dell'energia, ovvero la curva che descrive il “Cumulative Benioff strain-release (CBS)” (da qui in poi definito semplicemente “strain release”) in funzione del tempo [i.e. Bath and Duda, 1963]. L'energia è stata stimata attraverso la relazione (1) [Gutenberg and Richter, 1956] ed è stata convertita in Joule per uniformità con il SI di misura.

$$E = 10^{(9.9+1.9M_L - 0.024M_L^2)} \text{ (erg)} \quad (1)$$

In eq. (1) M_L è la magnitudo locale. Nella stessa figura viene, inoltre, mostrato il numero giornaliero degli eventi sismici localizzati durante lo stesso anno. In Figura 5 è possibile evidenziare tre differenti andamenti nella curva che descrive lo *strain release*, sottolineati da segmenti di colore diverso che corrispondono al verificarsi di sequenze sismiche, alcune delle quali tra le più significative nell'anno considerato o per numero di eventi o per valori di magnitudo. Nel dettaglio, la curva suggerisce che i gradienti più significativi dello *strain release* hanno caratterizzato i primi due mesi del 2021 (Tabella 1), legati al verificarsi di quattro importanti sequenze sismiche che hanno interessato diversi settori dell'edificio vulcanico etneo, ossia il medio versante sud occidentale, il versante orientale e l'area dei crateri centrali. Seguono, quindi, due fasi attraverso le quali il gradiente dello *strain release* appare diminuire progressivamente: la prima fino a circa la prima metà di maggio (linea tratteggiata verde) e la seconda che invece si protrae fino a dicembre (linea tratteggiata nera).

Pronunciati aumenti nel gradiente dello *strain release* si registrano in concomitanza del verificarsi delle sequenze sismiche di maggiore rilevanza del 2021, per lo più date da eventi con profondità focali medio-profonde (volumi crostali coinvolti tra 10-25 km), che hanno interessato principalmente il medio versante orientale etneo. La variazione positiva maggiore è da correlarsi alla sequenza sismica più importante di tutto il 2021, sia in termini di numero di eventi che la compongono (95 eventi sismici) e sia in termini di *strain release* (circa $1.7 \times 10^5 \text{ J}^{1/2}$), avvenuta tra il 24 e il 25 gennaio (la numero 3 in Figura 5) proprio nel medio versante orientale etneo (si veda il Capitolo 3 per maggiori dettagli).

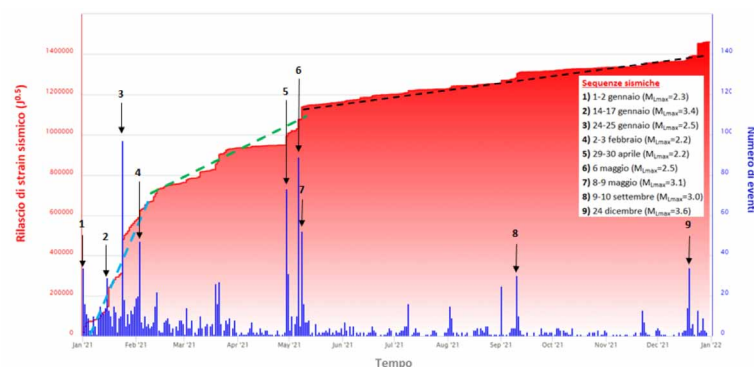


Figura 5 Numero giornaliero di terremoti e “Cumulative Benioff strain-release (CBS)” nel periodo 1 gennaio - 31 dicembre 2021. Le linee tratteggiate ciano, verde e nera evidenziano le principali variazioni nel tempo dell'andamento dello *strain release*. L'inset a destra elenca le sequenze sismiche più significative del 2021, per le quali viene riportato il valore della magnitudo locale dell'evento più energetico (M_{Lmax}).

Figure 5 Daily number of earthquakes and “Cumulative Benioff strain release (CBS)” from January 1 to December 31, 2021. The cyan, green, and black dashed lines underline the main change in the trend of the CBS with time. The inset on the right shows the list of the main seismic sequences recorded in 2021, with their maximum local magnitude recorded.

Un ulteriore evidente gradino nella curva si osserva tra la fine di aprile e la prima metà di maggio, generato dal verificarsi di tre sequenze sismiche (5, 6 e 7 in Figura 5), si veda il Capitolo 3 per maggiori dettagli.

Da metà maggio l'attività sismica da fratturazione appare diminuire. Il tasso di occorrenza dei terremoti e lo *strain release* sono tendenzialmente più bassi rispetto a quelli osservati nel periodo precedente. Il trend sembra mantenersi approssimativamente costante fino alla fine dell'anno. Emerge solo un ultimo gradino nella curva associato al verificarsi, il 24 dicembre, di una sequenza sismica di cui fa parte il terremoto con la più alta magnitudo locale durante il periodo analizzato (9 in Figura 5). Nel Capitolo 3 è riportata una descrizione di tutte le sequenze registrate durante il 2021.

Dal confronto con quanto avvenuto a partire dal 2017 (Figura 6), appare evidente che l'andamento della curva di *strain release* appena descritto sembra differire rispetto a quello che ha caratterizzato gli anni precedenti, per il quale la curva cumulativa mette in evidenza un trend caratterizzato da un gradiente tendenzialmente costante durante tutto l'anno. Notiamo, inoltre, che lo *strain release* complessivo nel 2021 (linea rossa) è più basso rispetto a quello che è stato stimato per il 2020 (linea blu scura).



Figura 6 Confronto tra le curve CBS relative agli anni 2017, 2018, 2019, 2020 e 2021.

Figure 6 Comparison among the CBS curves for the years 2017, 2018, 2019, 2020, and 2021.

Un altro elemento che ci aiuta a caratterizzare la sismicità etnea durante il 2021, può essere ricavato dalla distribuzione del numero dei terremoti in funzione della magnitudo, calcolata attraverso la legge empirica di Gutenberg-Richter (G-R) [Gutenberg and Richter, 1944] espressa come:

$$\text{Log}_{10}N(M) = a - bM \quad (2)$$

dove N indica il numero cumulativo degli eventi con magnitudo maggiore o uguale a M e i parametri a e b sono costanti. In particolare, a corrisponde al numero di terremoti $N(M)$ che per $M \geq 0$ avvengono in una data regione, in un dato intervallo di tempo e quindi, essendo funzione delle dimensioni dell'area, fornisce una misura approssimativa del tasso di sismicità totale [Bayrak et al., 2002]; b , che graficamente rappresenta la pendenza della retta indica il rapporto tra il numero di piccoli e grandi terremoti. Più semplicemente, il numero di terremoti che caratterizza una regione in un dato intervallo di tempo aumenta in maniera esponenziale al diminuire della magnitudo. In genere, b è prossimo a 1, cioè il numero di terremoti aumenta di circa 10 volte al diminuire di una unità di magnitudo.

Per analizzare statisticamente la relazione frequenza-magnitudo che caratterizza il catalogo è stato usato il software ZMAP [Wiemer, 2001]. Quest'ultimo ha permesso di stimare la magnitudo di completezza (M_C) e la relativa incertezza attraverso il metodo della massima curvatura [Wiemer and Wyss, 2000]. In particolare, M_C per l'intero anno considerato è risultata essere pari a 1.4 con una incertezza di ± 0.05 , quest'ultima stimata attraverso la tecnica del bootstrap applicando una variabilità alla magnitudo di ± 0.1 (Figura 7). I coefficienti a e b della legge empirica di Gutenberg-Richter (G-R) sono stati ottenuti sia con il metodo della massima verosimiglianza (ML, *Maximum Log-Likelihood*) [Utsu, 1965; Aki, 1965], attraverso l'utilizzo del software ZMAP, e sia con il metodo dei minimi quadrati (LS, *Least Squares*), ciò al fine di valutare l'influenza del metodo di analisi adottato sul valore dei coefficienti stessi e sulla loro incertezza.

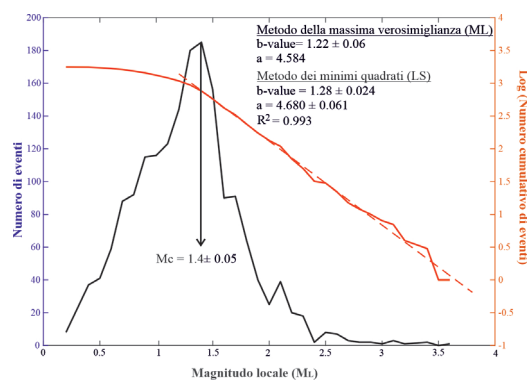


Figura 7 Distribuzione del numero di eventi in funzione della magnitudo (linea nera) e relazione di Gutenberg-Richter (linea rossa) calcolata utilizzando i dati del catalogo di sismicità dell'area etnea nel 2021. La magnitudo di completezza (M_C) è pari a 1.4 ± 0.05 . La linea rossa tratteggiata rappresenta la retta di regressione lineare derivata a partire dalla M_C .

Figure 7 Number of events vs. local magnitude (black line) and cumulative Gutenberg-Richter distribution (red line) of the whole 2021 Etna seismicity catalog. The magnitude of completeness (M_C) is 1.4 ± 0.05 . The red dashed line represents the best-fit (least square method) through the data points with magnitude greater than or equal to M_C .

La legge empirica G-R ottenuta per il catalogo 2021 riflette la somma della sismicità prodotta dall'insieme delle sorgenti sismiche, sia superficiali e sia profonde, che si sono attivate durante l'anno considerato e distribuite sull'intero edificio vulcanico. Come mostrato in Figura 7, il valore

del parametro b è stato stimato, con entrambi i metodi adottati, di poco superiore all'unità. Tale valore rispecchia le caratteristiche del volume campionato nel suo complesso che, come ben noto, include porzioni crostali tra loro molto eterogenee dal punto di vista del comportamento reologico, tipicamente presenti nelle aree vulcaniche attive.

L'evoluzione temporale del parametro b rappresenta un aspetto importante al fine di caratterizzare la sismicità dell'area investigata, poiché, come evidenziato dalla letteratura sismologica, esso risulta essere correlato allo *stress* locale o allo stato di frammentazione delle rocce [Amitrano, 2003; Schorlemmer and Wiemer, 2005]. Confrontando il valore di b ottenuto per il 2021 con i valori stimati negli anni precedenti (2017-2020) e tenendo conto delle incertezze associate a tale valore, riteniamo che il rilascio dell'energia sismica risulta pressoché confrontabile (Figura 8). Inoltre, sebbene la magnitudo di completezza nel 2021 possa sembrare leggermente più alta rispetto a quelle stimate negli anni precedenti, l'incertezza associata alle stime di magnitudo, che in media si attestano intorno a 0.1 - 0.2 unità di magnitudo, è sufficientemente grande da considerare questa differenza non significativa dal punto di vista statistico.

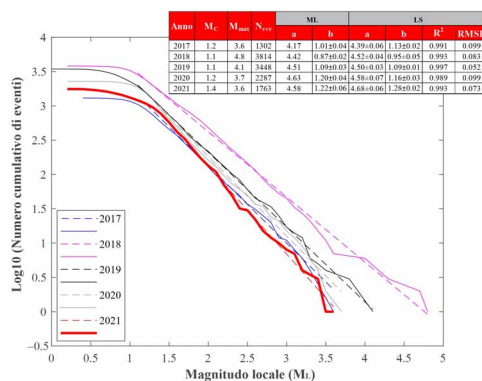


Figura 8 Confronto tra il logaritmo del numero cumulativo di eventi con magnitudo locale (M_L) maggiore o uguale a M relativo al 2021 e ai 4 anni precedenti (2017-2020). Le linee tratteggiate rappresentano le rette di *best-fit* lineare ricavate attraverso il metodo dei minimi quadrati (LS) ed i cui coefficienti, con i relativi parametri statistici, sono elencati nella tabella all'interno del grafico (in alto a destra). ML sta per metodo della massima verosimiglianza (si veda il testo per maggiori dettagli). N_{eve} indica il numero totale di eventi che compongono i singoli set di dati.

Figure 8 Comparison of logarithm of cumulative number of events with local magnitude (M_L) $\geq M$ for the years from 2017 to 2020 (solid lines). Dashed lines are the lines of best-fit obtained using a least-squares method (LS) through the data points (Gutenberg-Richter distribution) relative to each single year. The inset table in the upper right corner lists the coefficients and statistical parameters of G-R laws obtained through the LS and ML (maximum likelihood estimation) methods (see text for details). N_{eve} indicates the total number of seismic events forming the single data sets.

3. Sequenze sismiche

Durante il 2021 sono state localizzate 27 sequenze sismiche, la maggior parte delle quali ha interessato la parte centro-orientale dell'area etnea. In Tabella 1 per ciascuna sequenza vengono riportate le informazioni principali quali l'area epicentrale, l'intervallo temporale, il numero di terremoti e la data dell'evento più energetico (*master*). È importante sottolineare che con il termine generale di sequenza sismica qui si intende un raggruppamento spazio-temporale di terremoti (*cluster*) identificato tramite l'applicazione di un algoritmo proposto da Reasenber

[1985], ovvero dalla formulazione matematica alquanto complessa, che esplicita le dimensioni caratteristiche di una sorgente in funzione della magnitudo e di altri parametri fisici. In modo semplicistico, adottando un modello di sorgente sismica circolare [Kanamori and Anderson, 1975], dati due eventi di magnitudo M_1 e M_2 , i cui rispettivi raggi alla sorgente sono r_1 e r_2 , i due eventi sono associati allo stesso *cluster* se la distanza tra i rispettivi ipocentri è inferiore alla somma dei rispettivi raggi.

ID	N° ev	Data Inizio (gg/mm/aa hh.mm.ss)	Data Master (gg/mm/aa hh.mm.ss)	Data Fine (gg/mm/aa hh.mm.ss)	M_L max	Area epicentrale
1	9	01/01/21 16.37.02	02/01/21 07.44.41	02/01/21 19.03.03	2.3	1.5 km O da M. Parmentelli
2	5	08/01/21 12.16.33	08/01/21 17.54.32	08/01/21 21.19.27	1.9	1.0 km E dai Crateri Centrali
3	7	12/01/21 03.31.25	12/01/21 03.31.25	12/01/21 16.11.30	2.3	1.0 km E dai Crateri Centrali
4	7	13/01/21 09.35.32	13/01/21 14.27.48	13/01/21 17.28.16	2.0	1.0 km E dai Crateri Centrali
5	39	14/01/21 09.53.24	16/01/21 17.47.37	17/01/21 06.30.08	3.4	Crateri Centrali
6	7	19/01/21 22.02.59	19/01/21 23.44.25	20/01/21 01.37.04	1.8	1.0 km N da M. Minardo
7	95	24/01/21 00.03.28	24/01/21 12.06.18	25/01/21 07.56.38	2.5	1.5 km E da M. Fontane
8	8	25/01/21 02.14.36	25/01/21 03.15.13	25/01/21 13.02.18	2.1	1.0 km NE da Sant'Alfio
9	5	29/01/21 03.15.46	29/01/21 10.04.43	29/01/21 12.11.11	1.8	1.0 km E dai Crateri Centrali
10	10	31/01/21 09.16.58	31/01/21 18.27.15	01/02/21 06.31.16	1.8	1.0 km E dai Crateri Centrali
11	44	02/02/21 17.46.26	03/02/21 05.23.35	03/02/21 18.46.31	2.2	1.0 km E dai Crateri Centrali
12	14	12/02/21 14.01.58	12/02/21 15.25.12	14/02/21 00.54.57	2.5	0.5 km E dai Crateri Centrali
13	25	19/03/21 14.30.01	19/03/21 17.56.17	20/03/21 01.05.58	2.5	2.0 km O da Sant'Alfio
14	13	20/03/21 17.19.46	20/03/21 17.42.11	20/03/21 19.27.16	2.2	1.0 km SE da Pietrafucile
15	22	21/03/21 07.59.14	21/03/21 09.22.02	21/03/21 15.40.04	2.8	1.0 km SE da Pietrafucile
16	75	29/04/21 15.57.37	29/04/21 20.43.10	30/04/21 08.00.40	2.2	0.5 km NO da Sant'Alfio
17	80	06/05/21 08.42.44	06/05/21 14.55.23	06/05/21 23.41.46	2.5	0.5 km NO da Milo
18	61	08/05/21 18.07.59	08/05/21 18.13.25	09/05/21 13.08.32	3.1	2.0 km O da Pietrafucile
19	10	09/07/21 06.43.44	09/07/21 09.45.17	09/07/21 09.57.46	2.0	3.0 km NO da M. Spagnolo
20	7	01/08/21 19.26.33	02/08/21 01.14.16	02/08/21 08.37.43	1.0	1.0 km SE da Crateri Centrali
21	5	03/08/21 16.05.42	03/08/21 16.05.42	03/08/21 17.48.56	2.0	3.5 km E da Randazzo
22	13	01/09/21 15.58.09	01/09/21 16.36.33	01/09/21 17.59.04	1.9	8.0 km S da Cesarò
23	18	09/09/21 23.37.21	10/09/21 17.21.11	10/09/21 20.32.52	3.0	1.0 km SO da Sant'Alfio
24	15	21/11/21 22.01.19	23/11/21 02.23.04	23/11/21 04.41.50	1.8	3.0 km SE da Motta Camastra
25	33	18/12/21 21.41.52	19/12/21 02.38.35	20/12/21 04.36.10	1.5	2.5 km O da Belpasso
26	10	19/12/21 12.20.47	19/12/21 13.43.09	19/12/21 22.44.41	1.4	2.0 km NO da Milo
27	13	24/12/21 08.23.45	24/12/21 09.19.53	24/12/21 15.14.50	3.6	2.0 km N da Zafferana Etnea

Tabella 1 Elenco delle sequenze sismiche registrate nell'area etnea durante il 2021. La tabella riporta il numero della sequenza (ID), il numero dei terremoti associati alla sequenza (N° ev.), il tempo origine del primo evento (Data Inizio), il terremoto registrato con la magnitudo massima osservata (Data Master) e il tempo origine dell'ultimo evento della sequenza (Data Fine), la magnitudo massima (M_L max) e l'area interessata dalla sequenza (Area epicentrale). Evidenziati in azzurro le 9 sequenze sismiche ritenute maggiormente significative (si veda il testo per maggiori dettagli).

Table 1 List of the seismic sequences recorded in the Etna area during 2021. The table reports the identification number (ID); the number of earthquakes belonging to the sequence (N° ev.); the origin time of the first event (Start Data); the earthquake with maximum magnitude observed (Master Data), and the origin time of the last event of the sequence (Last Data); the maximum magnitude (M_L max) of each seismic sequence and the toponym of the area struck by the sequence. Highlighted in blue are the 9 seismic sequences considered to be of major importance (see the text for more details).

In tale contesto, il raggio viene interpretato in termini di soglia spaziale o distanza di influenza di un terremoto, il cui valore cresce al crescere della magnitudo. In accordo con Reasenbergs [1985], per terremoti di magnitudo M_L pari a 3, 4 e 5 le distanze di influenza saranno 1.7 km,

4.7 km e 11 km, rispettivamente. Tali valori possono essere ricondotti ad una legge di potenza del tipo:

$$r = nM^m \tag{3}$$

con i coefficienti n e m pari a 0.03 e 3.65, rispettivamente.

Nella Tabella 2 vengono riportate le distanze di influenza, nelle tre dimensioni, calcolate attraverso la (3) per tutte le coppie di eventi con magnitudo nell'intervallo tra $1.0 \leq M_L \leq 5.0$. Infine, con riferimento all'intervallo temporale di associabilità, in questo studio è stata fissata una distanza temporale massima di 12 ore tra due eventi appartenenti alla stessa sequenza a prescindere dal valore della magnitudo.

	1	2	3	4	5
1	0.1	0.4	1.7	4.8	10.8
2	0.4	0.8	2.1	5.2	11.2
3	1.7	2.1	3.4	6.5	12.5
4	4.8	5.2	6.5	9.6	15.7
5	10.8	11.2	12.5	15.7	21.7

Tabella 2 Distanze massime, espresse in km, tra coppie di eventi con magnitudo comprese tra 1.0 e 5.0.
Table 2 Maximum distances, in km, between pairs of events with magnitude in the range 1.0 and 5.0.

Qui di seguito vengono descritte, in ordine cronologico, le 9 sequenze sismiche ritenute maggiormente significative. Tali sequenze sono state selezionate quando almeno uno dei seguenti criteri viene soddisfatto: i) essere associate a importanti fasi di rilascio di energia; ii) essere formate da un numero significativo di eventi (più di 50 eventi); iii) contenere gli eventi sismici più energetici del periodo investigato ($M_L \geq 3.0$); iv) contenere eventi sismici che possono fornire informazioni importanti sulla dinamica del vulcano e sui processi che lo influenzano (Tabella 1, Figure 5 e 9).

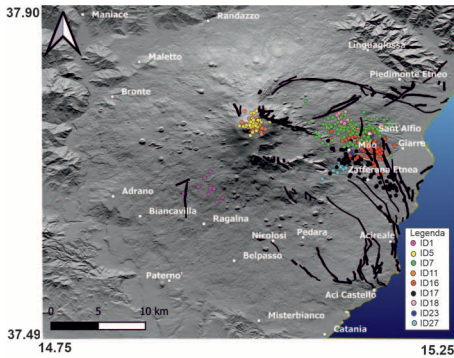


Figura 9 Mappa epicentrale delle principali sequenze sismiche verificatesi nel corso del 2021. ID identifica la sequenza, conformemente a quanto riportato in Tabella 1.

Figure 9 Epicentral map of the main seismic sequences occurring in 2021. The ID numbers refer to the sequence, as reported in Table 1.

Nelle Figure 10-18 vengono riportati tutti i terremoti che appartengono alle 9 sequenze sismiche, colorati in funzione della profondità; i cerchi in grigio identificano gli eventi che pur rispettando il criterio temporale non soddisfano quello spaziale (vedi Tabella 2).

È proprio ad una di queste sequenze che appartiene il terremoto più energetico registrato il 24 dicembre 2021 ($M_L = 3.6$), distante poco meno di 2 km da Zafferana Etnea (Tabella 1). Inoltre, in funzione dell'andamento temporale delle magnitudo e laddove possibile, sono state riconosciute *foreshocks-mainshock-aftershocks* e *swarm-like seismic sequence* [Gambino et al., 2004].

ID1 – Monte Parmentelli

La sequenza qui descritta, iniziata l'1 gennaio 2021, ha accompagnato la fase di graduale incremento nel tasso di occorrenza dei terremoti che era già iniziata alla fine del 2020, ed in particolare il 31 dicembre 2020. Quest'ultima è stata la sequenza sismica numericamente più importante del 2020.

La sequenza ID1 ha interessato il medio-basso versante occidentale dell'Etna (Figura 10a), ed include nove eventi che sono stati registrati in poco più di 24 ore nei pressi di Monte Parmentelli. La magnitudo locale massima della sequenza è 2.3 e ha coinvolto un volume focale la cui profondità media è di circa 12 km sotto il livello del mare (s.l.m.). Osservando la Figura 10b, appare evidente l'assenza di un *mainshock* e l'intera sequenza appare riconducibile ad una "*swarm-like seismic sequence*".

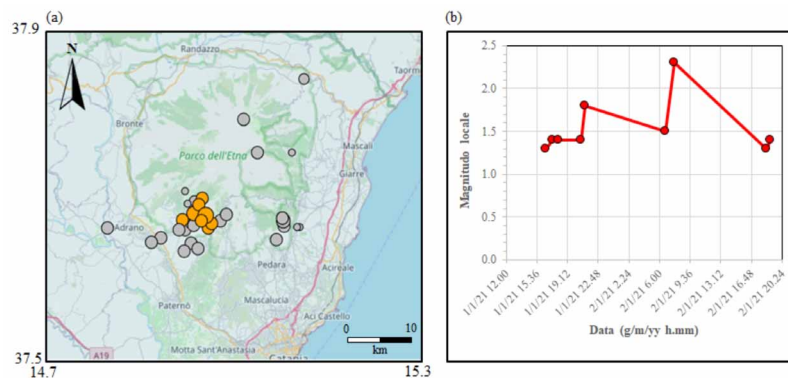


Figura 10 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza di Monte Parmentelli (ID1; cerchi arancioni). I cerchi grigi rappresentano i terremoti non inseriti nella sequenza poiché, pur rispettando il criterio temporale, non soddisfano quello spaziale. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 10 (a) Epicentral map of seismic events belonging to Mount Parmentelli's seismic sequence (ID1; orange circles). The grey circles represent the earthquakes not included in the sequence since, although respecting the temporal criterion, they do not satisfy the spatial one. (b) Distribution of local magnitude values vs time.

ID5 – Crateri Centrali

La mattina del 14 gennaio ha avuto inizio un'importante sequenza sismica, durata fino al giorno 17 gennaio, che ha interessato l'area dei crateri centrali (Figura 11). Ad essa appartengono 39 eventi, di M_L compresa tra 1.3 e 3.4, le cui profondità focali appaiono confinate entro i primi 2 km. L'evento più energetico della sequenza ($M_L = 3.4$) è stato registrato il 16 gennaio alle ore 17:47 (UTC) ed è caratterizzato da una cinematica distensiva (vedi Capitolo 5). Ad esclusione di un evento di $M_L = 2.1$, esso è stato preceduto e seguito da eventi con $M_L < 2$ (Figura 11b), circostanza questa che avvicina la sequenza ad una tipo *foreshocks-mainshock-aftershocks*.

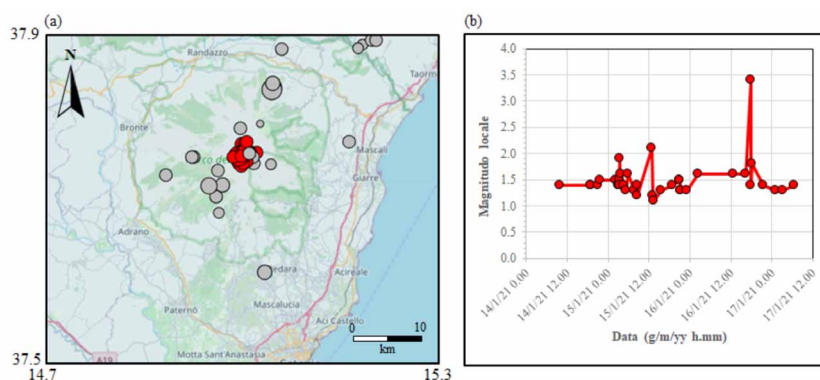


Figura 11 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza dei Crateri Centrali (ID5; cerchi rossi); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 11 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Central Crater's seismic sequence (ID5; red circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

ID7 – Monte Fontane

Si tratta della sequenza sismica con il maggior numero di eventi registrata nel 2021. È avvenuta tra il 24 e il 25 gennaio ed ha interessato il medio versante orientale del vulcano, in un'area compresa tra M.te Fontane e Sant'Alfio (Figura 12a). Sono stati registrati circa un centinaio di eventi di magnitudo compresa tra 1.2 e 2.5; di questi 37 hanno M_L pari o superiore a 2.0.

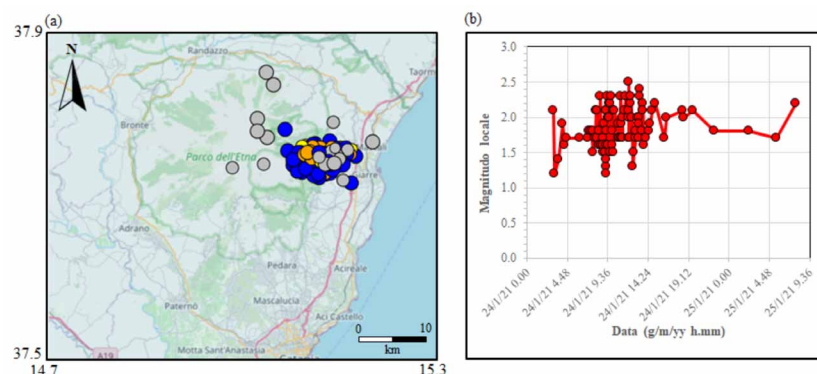


Figura 12 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza di Monte Fontane (ID7; cerchi blu, arancioni e gialli); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 12 (a) Epicentral map of seismic events belonging to Monte Fontane's seismic sequence (ID7; blue, orange, and yellow circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

Le profondità focali sono comprese tra circa 9 e 22 km. La scossa più energetica ($M_L = 2.5$), caratterizzata da una cinematica transtensiva (vedi Capitolo 5), è stata registrata il 24 gennaio alle 12:06 (UTC) ed è stata localizzata a 0.5 Km a nord-ovest di Sant'Alfio, ad una profondità ipocentrale di ca. 20 km. La distribuzione delle magnitudo in funzione del tempo avvicina tale sequenza ad una “*swarm-like seismic sequence*” (Figura 12b).

ID11 – Crateri Centrali

La sequenza sismica avvenuta tra il 2 e il 3 febbraio ha interessato l'area dei crateri centrali, coinvolgendo un volume focale la cui profondità rimane confinata entro i primi 3 km sotto il livello del mare. Il primo evento sismico è stato registrato nella tarda mattinata del 31 gennaio alle 09:16 (UTC) ($M_L = 1.4$) ed è stato seguito da altre 9 scosse, l'ultima delle quali registrata alle 06:31 (UTC) del 1° febbraio. La sismicità nella stessa area è quindi ripresa il 2 febbraio alle 17:46 (UTC) con un evento di $M_L = 1.5$ e si è protratta fino alle 18:46 (UTC) del giorno successivo con altre 45 scosse (Figura 13a).

L'evento più energetico, di $M_L = 2.2$, è stato registrato il 3 febbraio alle 05:23 (UTC) ed è l'unico ad aver superato magnitudo 2.0. Nel complesso, infatti, le restanti scosse sismiche hanno M_L compresa tra 1.3 e 1.9 ed appare come una “*swarm-like seismic sequence*” (Figura 13b).

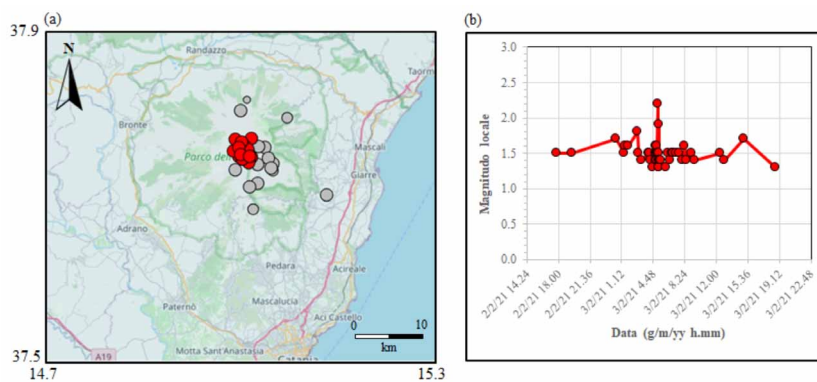


Figura 13 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza dei Crateri Centrali (ID11; cerchi rossi); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 13 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Crateri Centrali's seismic sequence (ID11; red circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

ID16 – Sant’Alfio

Si tratta di una sequenza sismica registrata tra il 29 ed il 30 aprile sul medio-basso versante orientale del vulcano (Figura 14a), in un’area circoscritta tra Milo, Sant’Alfio e Macchia (frazione del comune di Giarre). Risulta costituita da 75 eventi con M_L compresa nell’intervallo 0.7-2.2 e profondità focali tra 13 e 22 km s.l.m. La prima scossa appartenente alla sequenza, di $M_L = 1.1$, è stata registrata alle 15:57 (UTC) del 29 aprile ad una profondità di circa 19 km, ed è stata seguita da altri 31 eventi, con M_L inferiore a 2.0 e coinvolgenti un volume focale la cui profondità media è di 15 km. Alle 20:43 (UTC) viene registrata la scossa più energetica di $M_L = 2.2$, ad una profondità di 15 km, localizzata a 0.4 km NO da S. Alfio (CT). Dell’intera sequenza sismica solo 3 eventi hanno una $M_L \geq 2.0$ ed appare riconducibile ad “*swarm-like seismic sequence*”.

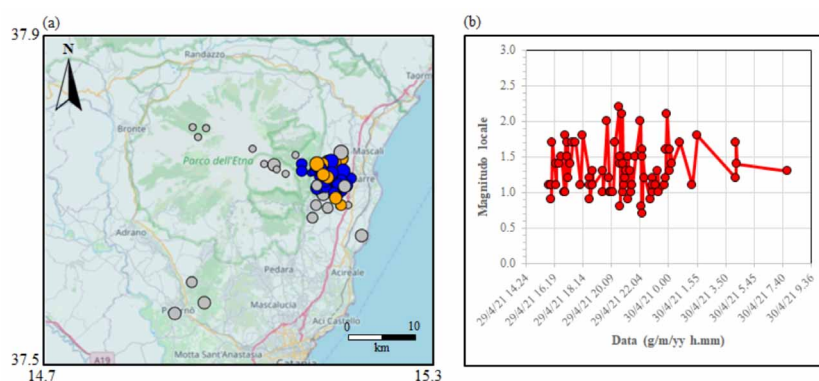


Figura 14 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza sismica di Sant’Alfio (ID16; cerchi blu e arancioni); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 14 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Sant’Alfio’s seismic sequence (ID16; blue, and orange circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

ID17 – Milo

Il 6 maggio è iniziata una sequenza di eventi che ha interessato il medio-basso versante orientale etneo (Figura 15a), in un’area che comprende i comuni di Milo, Zafferana Etnea, Mangano (frazione del comune di Acireale) e Fondo Macchia (frazione del comune di Giarre).

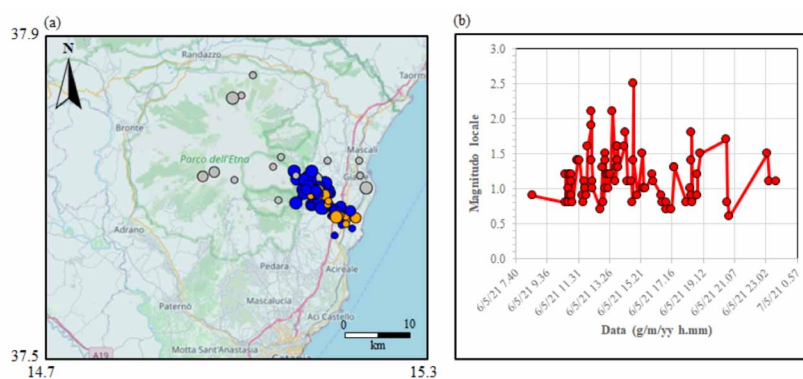


Figura 15 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza sismica di Milo (ID17; cerchi blu e arancioni); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 15 (a) Epicentral map of seismic events belonging to Milo’s seismic sequence (ID17; blue, and orange circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

Gli ipocentri hanno interessato un volume compreso tra i 13 e i 20 km di profondità. L'evento più energetico della sequenza, di magnitudo M_L 2.5, caratterizzato da una cinematica transtensiva (vedi Capitolo 5), è stato registrato il 6 maggio alle ore 14:55 (UTC), ad una profondità di circa 18 km sotto il livello del mare ed è localizzato a 0,5 km a NO da Milo.

L'intera sequenza è costituita da 80 eventi di modesta energia, di cui solo 3 hanno raggiunto e superato $M_L = 2.0$ e sembra ricondurre ad un "swarm-like seismic sequence". Tutti gli eventi si concentrano lungo una fascia allungata in direzione NO-SE, che si estende da Monte Cagliato a Guardia (frazione di Acireale).

ID18 – Pietrafucile

L'8 maggio è iniziata una sequenza che ha generato 61 terremoti in poco meno di 24 ore, con magnitudo locali comprese tra 0.5 e 3.1 e profondità focali tra 4 e 11 km s.l.m. La sequenza ha interessato il versante NE dell'area vulcanica etnea (Figura 16a).

Sono due gli eventi sismici che hanno superato $M_L = 3.0$, registrati entrambi il giorno 8 maggio, a circa 4 minuti l'uno dall'altro, entrambi di $M_L = 3.1$ ed entrambi con cinematica trascorrente (vedi Capitolo 5). In particolare, il primo di questi è avvenuto alle 18:09 (UTC) ad una profondità di ca. 6 km ed il successivo alle 18:13 (UTC), a poche centinaia di metri a SE dal primo, alla stessa profondità. Nel complesso, dei 61 eventi componenti tale la sequenza solo 5 hanno raggiunto e superato $M_L = 2.0$.

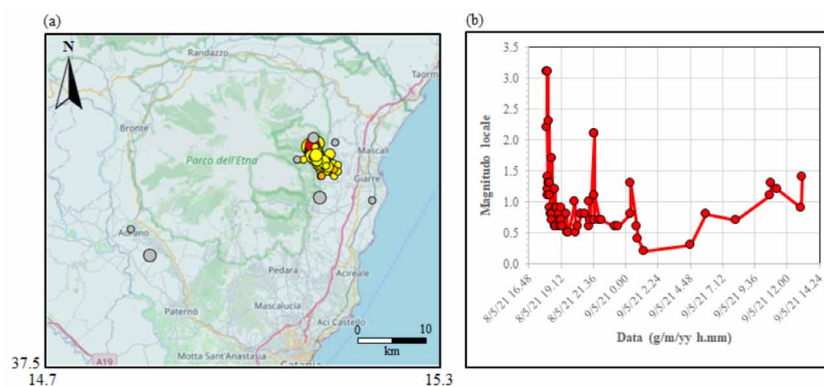


Figura 16 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza sismica di Pietrafucile (ID18; cerchi rossi, gialli e arancioni); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 16 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Pietrafucile's seismic sequence (ID18; red, yellow, and orange circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

ID23 – Sant’Alfio

Si tratta di una sequenza avvenuta tra il 9 e il 10 settembre che ha interessato la parte orientale dell’edificio vulcanico (Figura 17a). È composta da 18 eventi che hanno coinvolto un volume sismogenetico la cui profondità è compresa tra circa 4 e 9 km.

Il terremoto più energetico, registrato alle ore 17:21 UTC del giorno 10 settembre, ha raggiunto una magnitudo $M_L = 3.0$. Quest’ultimo ha una profondità focale di 8 km ed è localizzato 1 km a SO dall’abitato di Sant’Alfio. Infine, dell’intera sequenza, solo un altro evento presenta una M_L superiore a 2.0 (Figura 17b).

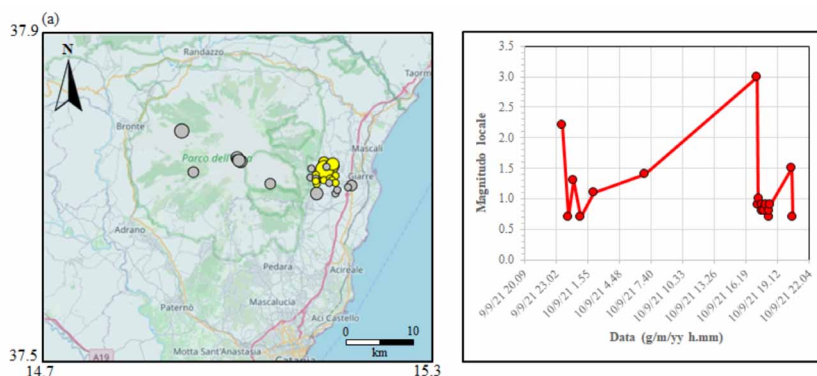


Figura 17 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza sismica di Sant’Alfio (ID23; cerchi gialli); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 17 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Sant’Alfio’s seismic sequence (ID23; yellow circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

ID27 – Zafferana Etnea

Il 24 dicembre l’area di Zafferana Etnea è stata interessata, in meno di 24 ore, da una sequenza sismica formata da poco più di 10 eventi (Figura 18a). L’evento più energetico è stato registrato alle ore 09:19 UTC con magnitudo 3.6 e profondità di circa 4 km (cinematica associata di tipo trascorrente; vedi Capitolo 5).

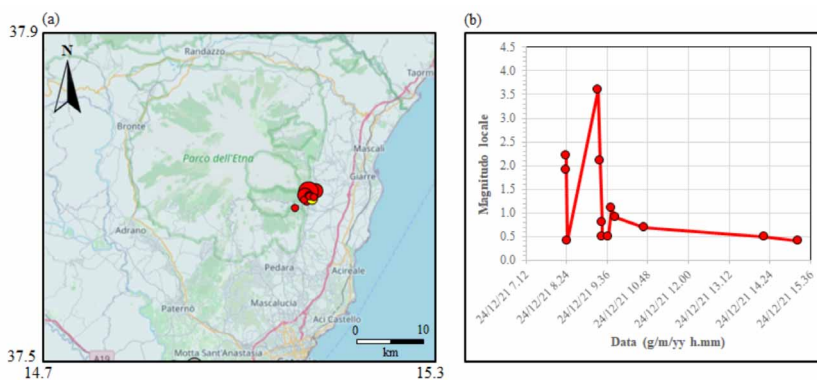


Figura 18 (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza sismica di Zafferana Etnea (ID27; cerchi rossi); cerchi grigi: vedi didascalia in Figura 10. (b) Distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

Figure 18 (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Zafferana Etnea’s seismic sequence (ID27; red circles); grey circles: see caption of Figure 10. (b) Distribution of their local magnitude vs time.

L'epicentro è stato calcolato a circa 1.5 km a nord di Zafferana Etnea. Come appare evidente dalla Figura 18b solo altri due eventi hanno di poco superato $M_L = 2.0$ e questo fa sì che l'intera sequenza possa essere associata ad una “*foreshocks-mainshock-aftershocks seismic sequence*”.

4. Confronto tra attività sismica e vulcanica

Dopo circa 18 mesi di assenza di attività eruttiva significativa, nel dicembre 2020 il vulcano entra in una nuova fase segnata da importanti e numerosi eventi parossistici. In particolare, tra il 13 dicembre 2020 ed il 21 febbraio 2022 il Monte Etna è stato sede di 66 eventi parossistici (52 nel 2021) caratterizzati da intensa attività stromboliana ai crateri sommitali, culminata in importanti e spettacolari episodi di fontane di lava, con formazione di colonne eruttive spesso alte diversi chilometri, flussi lavici di breve durata e abbondanti ricadute di cenere e lapilli in aree circostanti [Calvari et al., 2022]. Tali episodi sono stati accompagnati da un brusco aumento del tremore vulcanico.

In Figura 19 viene mostrata l'ampiezza del tremore vulcanico (linea azzurra) registrato durante il 2021 alla stazione di Serra la Nave (ESLN). L'ampiezza è espressa in termini di RMS (*Root Mean Square*) calcolato sulla componente verticale del moto del suolo, filtrata tra 0.5 e 5.5 Hz, e considerando una finestra mobile di 60 minuti. Le frequenze di taglio del filtro passa-banda individuano la banda in seno alla quale il tremore vulcanico irradia la maggior parte della sua energia [Patanè et al., 2011; Sciotto et al., 2022]. Nella stessa figura vengono inoltre riportate le curve di *strain release* (linea verde) e dell'RMS cumulato (linea grigia), entrambi normalizzati al valore massimo. Vengono anche evidenziati i periodi di intensa attività vulcanica (Eventi Parossistici, EP) sfociata nella maggior parte dei casi in episodi di fontane di lava, tutti accompagnati da un brusco aumento dell'RMS del tremore. Quest'ultimo ha raggiunto il suo massimo valore il 19 marzo, in occasione dell'ottavo episodio di fontana di lava del mese di marzo (il primo si è verificato il giorno 2 marzo), della durata di circa 2 ore, che vede coinvolto il cratere di sud-est (<https://www.ct.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-sorveglianza/prodotti-del-monitoraggio/bollettini-settimanali-multidisciplinari>).

Il primo evento parossistico del 2021, avvenuto il 18 gennaio, e a cui corrisponde un repentino aumento dell'RMS (Figura 19), è stato preceduto da 4 sequenze di eventi sismici superficiali ($z < 5\text{km}$) (vedi sequenze sismiche ID2, ID3, ID4 e ID5 in Tabella 1) registrate complessivamente tra l'8 ed il 17 gennaio nell'area dei Crateri Centrali. Tale evento parossistico si colloca nella fase in cui lo *strain release* è il più significativo dell'intero anno, grazie proprio al verificarsi di una decina di sequenze sismiche in circa un mese e mezzo, ossia fino approssimativamente a metà febbraio (Tabella 1), una delle quali la più importante dell'intero 2021 (sequenza ID7 in Tabella 1 e Figura 12). Come si osserva dalla Figura 19, l'intensificarsi degli episodi parossistici nei periodi 16 febbraio - 31 marzo e 19 maggio - 23 ottobre, sembra essere concomitante con quelle fasi che vedono la progressiva diminuzione del gradiente di *strain release* (Figura 19), ossia una riduzione del tasso di occorrenza dei terremoti e dell'attività sismica da fratturazione (si vedano anche le Figure 4 e 5), che a partire da fine maggio e fino alla fine dell'anno sembrano essere entrambi ridimensionati.

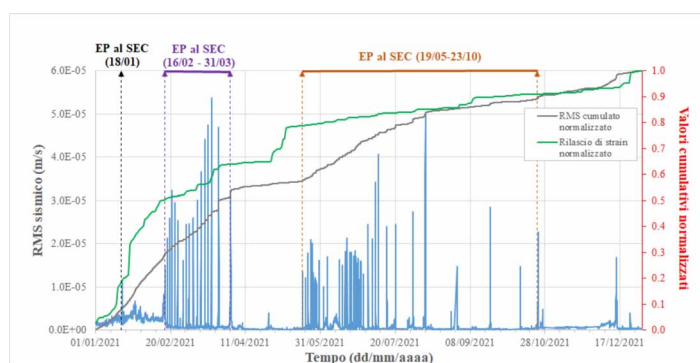


Figura 19 Ampiezza del tremore vulcanico registrato sulla componente verticale della stazione ESLN (Serra la Nave), espressa in termini di RMS (*root mean square*) nella banda frequenza 0.5-5.5 Hz; valori di RMS calcolati ogni 60 minuti (linea blu). Curva relativa allo *strain release* (linea verde) e RMS cumulativo (linea grigia). Entrambe le curve cumulative sono normalizzate a 1. EP=Episodi Parossistici, SEC=Cratere di Sud-Est.

Figure 19 Seismic RMS (*root mean square*) amplitude of the vertical component at the station ESLN, filtered in the band 0.5-5.5 Hz, computed on a 60 minutes long sliding window (blue line). The normalised cumulative RMS (grey line) and strain release (green line) curves are also shown. EP=Paroxysmal Episode, SEC=South-East Crater.

5. Meccanismi focali

Tra le analisi di routine che il Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici dell'OE (GLAOE) svolge giornalmente vi è il calcolo dei meccanismi focali (MF) attraverso il metodo delle polarità dei primi arrivi (fasi P). Il programma utilizzato per ricavare tali soluzioni focali è FPFIT di Reasenber e Oppenheimer [1985].

L'efficace copertura azimutale della rete, unitamente alla buona qualità delle localizzazioni ipocentrali, ha permesso di ottenere un campione di 27 MF (Figura 20, Tabella 3) estratti da un dataset costituito da 29 eventi sismici con $M_L \geq 2.5$. Tali meccanismi focali soddisfano i seguenti criteri:

- numero di discrepanze, tra polarità osservate e calcolate, inferiore al 15% rispetto al numero totale di polarità;
- $STDR > 0.5$ (STDR è un indice della distribuzione azimutale dei dati sulla sfera focale; può variare tra 0 e 1, con $STDR < 0.5$ quando un numero piuttosto grande di dati è posto in prossimità dei piani nodali);
- errori sullo *strike*, *dip* e *rake* inferiori ai 30°;
- distribuzione delle polarità omogenea all'interno dei quadranti.

Quando disponibili più soluzioni per lo stesso evento, il loro confronto ha costituito uno strumento di analisi e valutazione; in particolare la scelta della soluzione è stata basata sul valore STDR, sugli errori associati ai piani focali, sul numero delle discrepanze e sulla dispersione degli assi di deformazione P e T (o assi di *strain*).

In Tabella 3 sono elencati i codici ID che identificano l'evento sismico, la magnitudo (M_L), i parametri focali di *strike*, *slip* e *rake* dei due piani di faglia. Una buona parte di meccanismi focali calcolati appartiene alle sequenze sismiche riportate in Tabella 1.

La cinematica associata alle soluzioni focali selezionate mostra caratteristiche alquanto variabili (Figura 20a) con una prevalenza di meccanismi di tipo trascorrente (59%), seguiti da soluzioni di tipo diretto (26%) e inverse (15%) in accordo con i meccanismi sorgente che tipicamente caratterizzano l'area etnea e coerentemente con l'assetto strutturale dell'area [e.g., Scarfi et al., 2013; Barberi et al., 2016].

In generale la cinematica associata agli eventi più superficiali ($z < 5$ km) localizzati principalmente in prossimità dei crateri centrali e lungo il margine settentrionale della Valle del Bove, presenta una prevalenza di meccanismi distensivi con assi di compressione orientati all'incirca NO-SE (Figura 20a). Gli eventi intermedi (z tra 5 e 15 km) (Figura 20a) presentano soluzioni cinematiche principalmente di tipo trascorrente. Infine per gli eventi più profondi ($z > 15$ km), localizzati nel versante settentrionale del vulcano al margine con la catena Appenninica-Maghrebide, prevale una componente di tipo inversa in accordo con il regime di stress attivo lungo la Catena (Figura 20a). È interessante notare che, come spesso osservato in area Etna [i.e. Alparone et al., 2020], la distribuzione spaziale degli assi di compressione (assi P) mostra un andamento radiale attorno all'area craterica (Figura 20b).

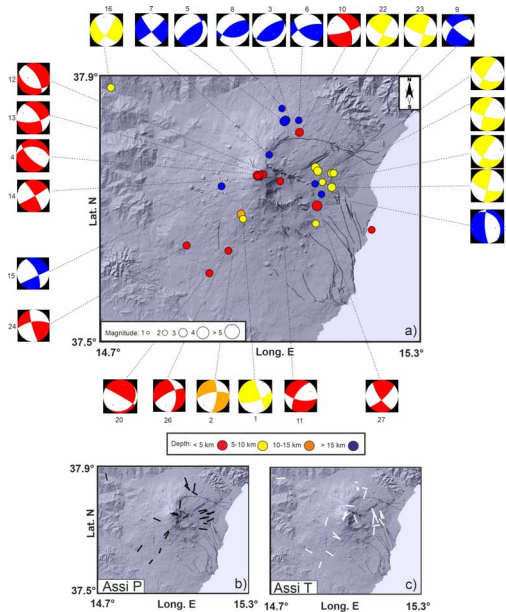


Figura 20 (a) Mappa e meccanismi focali degli eventi con $M_L \geq 2.5$ elencati in Tabella 3 (vedere il testo per maggiori dettagli). Distribuzione degli assi P (b) e T (c) dei meccanismi focali calcolati. La lunghezza degli assi dipende dal valore del *plunge* degli assi P e T.

Figure 20 Map and focal mechanisms of the earthquakes with $M_L \geq 2.5$ listed in Table 3 (see the text for more details). Spatial distribution of P (b) and T (c) axes of the computed focal mechanisms. The length of the axes depends on the plunge value of the P and T axes.

Il meccanismo focale dell'evento più energetico $M_L = 3.6$ (N. 27 in Figura 20 e Tabella 3), appartenente alla sequenza del 24 dicembre (ID27 in Tabella 1) caratterizzata da terremoti con una profondità principalmente compresa tra 3 e 5 km, presenta un meccanismo di tipo trascorrente con componente sinistra lungo un piano NNO-SSE e componente destra lungo un piano orientato NE-SO. La cinematica con componente di trascorrenza sinistra lungo il piano NNO-SSE non risulta compatibile con la cinematica generalmente associata all'attività del sistema di faglie superficiali delle Timpe che presenta una cinematica prevalentemente trascorrente destra lungo tale direzione [Villani et al., 2020]. Pertanto, il meccanismo focale dell'evento del 24 dicembre potrebbe essere associato al movimento trascorrente destro lungo un piano NE-SO corrispondente alla direzione delle faglie sepolte localizzate a nord-ovest di Zafferana Etnea, probabilmente correlate al sistema tettonico regionale Messina-Fiumefreddo [e.g. Alparone et al., 2013].

ID MF	Tempo Origine gg/mm/aaaa hh:mm	Lat(N)	Long(E)	Profondità	Gap	MI	N.Pol.	N.Dis.	STDR	Strike	Dip Piano 1	Rake	Strike	Dip Piano 2	Rake	Azimuth/Plunge Assi P	Assi T
1	01/01/2021 00:12	37.695	14.963	12.15	59	2.9	19	0	0.65	5	65	-150	261	63	-28	224/38	133/1
2	03/01/2021 08:25	37.688	14.966	9.83	43	2.6	23	2	0.57	340	90	150	70	60	0	29/21	291/21
3	16/01/2021 15:21	37.835	15.046	19.65	53	3.2	24	2	0.61	65	25	100	234	65	85	327/20	135/69
4	16/01/2021 17:47	37.753	14.994	0.51	40	3.4	17	0	0.74	135	65	-70	274	31	-126	79/64	210/18
5	16/01/2021 21:08	37.833	15.044	20.42	53	3.3	20	1	0.62	20	20	60	232	72	100	313/27	157/61
6	18/01/2021 13:58	37.835	15.071	24.63	132	2.5	17	0	0.63	130	50	140	248	60	48	7/6	105/53
7	19/01/2021 23:19	37.783	15.016	20.26	45	2.5	25	0	0.57	50	80	-10	142	80	-170	6/14	276/0
8	20/01/2021 04:14	37.853	15.040	16.93	70	2.5	26	1	0.63	90	40	120	233	56	67	339/9	92/69
9	24/01/2021 12:06	37.740	15.103	19.39	76	2.5	17	0	0.51	130	80	-40	228	50	-167	81/35	185/19
10	28/01/2021 05:28	37.817	15.072	-0.67	99	3	15	1	0.52	75	75	-140	333	51	-19	301/38	199/15
11	06/02/2021 06:25	37.744	15.036	3.63	38	2.6	25	2	0.62	100	60	-40	213	56	-143	65/48	157/2
12	11/02/2021 23:26	37.754	15.002	0.73	31	3.1	28	1	0.58	115	35	-120	330	60	-71	280/69	46/13
13	12/02/2021 15:25	37.754	14.998	0.67	44	2.5	19	0	0.64	80	60	-140	327	56	-37	295/48	203/2
14	13/02/2021 16:13	37.752	14.994	0.71	48	2.5	12	0	0.76	60	85	-170	329	80	-5	285/11	194/3
15	10/03/2021 08:56	37.736	14.927	25.49	58	2.7	21	0	0.51	65	90	-150	335	60	0	294/21	196/21
16	10/03/2021 09:20	37.883	14.719	8.47	172	2.8	21	1	0.62	135	55	-160	33	73	-37	349/37	88/12
17	19/03/2021 09:18	37.671	15.207	3.78	185	2.6											
18	19/03/2021 17:56	37.743	15.115	6.03	77	2.5	26	3	0.62	115	45	-10	212	82	-135	84/36	335/24
19	21/03/2021 09:22	37.756	15.132	7.38	47	2.8	24	0	0.72	215	80	-170	123	80	-10	79/14	169/0
20	24/03/2021 07:26	37.681	15.102	6.53	60	2.6											
21	25/03/2021 02:20	37.756	15.136	7.25	84	2.7	27	0	0.64	105	70	-20	202	71	-159	64/28	333/1
22	05/05/2021 12:11	37.607	14.904	2.36	168	2.7	25	2	0.80	50	10	-160	300	86	-81	220/48	21/41
23	06/05/2021 14:55	37.724	15.113	17.47	78	2.5	20	2	0.82	325	20	-120	177	72	-80	102/61	258/27
24	08/05/2021 18:09	37.764	15.102	6.14	45	3.1	19	0	0.83	120	65	0	30	89	155	78/17	342/17
25	08/05/2021 18:13	37.759	15.107	6.26	61	3.1	25	0	0.73	110	70	0	20	89	160	67/14	333/14
26	11/06/2021 14:26	37.648	14.861	0.9	185	2.7	15	0	0.59	165	80	150	261	60	12	216/13	119/28
27	10/09/2021 17:21	37.735	15.133	7.84	97	3	27	1	0.65	15	85	150	108	60	6	65/17	327/24
28	18/12/2021 21:40	37.641	14.939	2.47	104	2.6	12	1	0.58	355	45	-150	243	69	-49	197/49	304/14
29	24/12/2021 09:19	37.707	15.105	3.81	81	3.6	28	1	0.70	145	70	20	48	71	159	97/1	6/28

Tabella 3 Localizzazioni ipocentrali degli eventi con $M_L \geq 2.5$ e parametri geometrici dei MF disponibili.

Vengono riportati: tempo origine (UTC), latitudine, longitudine, profondità, gap azimutale, magnitudo locale, numero di polarità (N.Pol), numero di discrepanze (N.Dis), STDR, *strike*, *dip* e *rake* dei piani nodali, *azimut* e *plunge* degli assi P e T. In grigio gli eventi per i quali non è stato possibile determinare il MF.

Table 3 Hypocentral locations of events with $M_L \geq 2.5$ and geometric parameters of available MFs. Origin time (UTC), latitude, longitude, depth, azimuthal gap, local magnitude, number of polarities (N.Pol), number of discrepancies (N.Dis), STDR, *strike*, *dip* and *rake* of the nodal planes, *azimuth* and *plunge* of the P and T axes, are reported. In grey events for which the MF has not been determined.

6. Note conclusive

Il catalogo dei terremoti etnei reso disponibile alla comunità scientifica dall'Osservatorio Etneo è il risultato dell'analisi sistematica dei segnali sismici eseguita dal Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici dell'OE.

Grazie all'elevata sensibilità della strumentazione utilizzata dalla Rete Sismica dell'Osservatorio Etneo è stato possibile compilare un catalogo molto dettagliato della sismicità strumentale dell'area. Il rilevamento della sismicità di più bassa energia (440 terremoti con $M_L < 1.0$), ha consentito infatti di abbassare la soglia di magnitudo di completezza che, come ben noto, è uno degli ingredienti fondamentali per il calcolo della pericolosità sismica di un'area.

Qui di seguito viene descritta la sismicità che ha caratterizzato l'area etnea durante il 2021. Tale sismicità è generata dall'azione combinata dello stress di natura tettonica, che agisce a scala regionale e/o locale, e dai fenomeni connessi alla migrazione di magma attraverso i diversi livelli crostali dell'edificio vulcanico [Sicali et al., 2014].

Nel lavoro è stata descritta la distribuzione spazio-temporale della sismicità e l'andamento dello *strain release* nel tempo. È stata inoltre stimata la magnitudo di completezza ed il parametro *b* della relazione di Gutenberg-Richter, e calcolati i meccanismi focali degli eventi di $M_L \geq 2.5$ soddisfacenti opportuni criteri di selezione. Inoltre, sono state descritte le principali sequenze sismiche del 2021 e brevemente messo in relazione l'attività sismica con quella vulcanica, quest'ultima particolarmente intensa nel periodo investigato.

I terremoti localizzati nel 2021 nell'area Etnea sono stati 1763, su un totale di 2315 terremoti registrati. Il confronto con quanto avvenuto negli anni precedenti suggerisce che nel periodo in

oggetto è proseguito il trend di diminuzione del tasso di accadimento dei terremoti, osservato a partire dalla fine dell'eruzione etnea del 2018 (Figura 21).

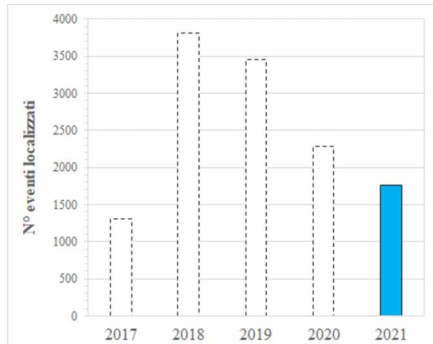


Figura 21 Confronto del numero di eventi localizzati nel 2021, con quello dei 4 anni precedenti.

Figure 21 Comparison of the number of earthquakes localised during 2021, with that of the previous 4 years.

Circa il 40% degli eventi localizzati appartiene ad una delle 27 sequenze sismiche individuate nel corso dell'anno, la più importante delle quali, sia per numero di eventi e sia per rilascio di energia sismica, è quella avvenuta tra il 24 e il 25 gennaio, a 1.5 km ad est di M. Fontane. In termini di rilasci energetici, le sequenze sismiche più significative sono due, entrambe formate da eventi superficiali: i) la prima con uno strain-release di $6.1 \times 10^4 J^{1/2}$ registrata tra il 14 e il 17 gennaio nell'area dei Crateri Centrali; ii) la seconda di $6 \times 10^4 J^{1/2}$ registrata il 24 dicembre, in prossimità dell'abitato di Zafferana Etnea. A quest'ultima sequenza sismica appartiene l'evento con il massimo valore di M_L registrata durante il 2021 ($M_L = 3.6$).

In generale, i maggiori rilasci di energia sismica hanno interessato in larghissima parte profondità comprese entro i primi 10 km s.l.m. con un coinvolgimento maggiore della porzione crostale al di sopra di 5 km (616 eventi). Decisamente meno attivi sismicamente sono i volumi sismogenetici localizzati a profondità maggiori di 10 km (Figura 22).

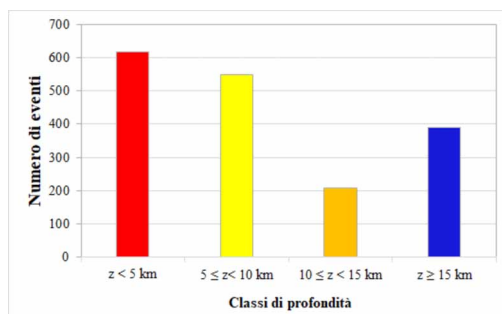


Figura 22 Distribuzione del numero di eventi sismici localizzati in funzione delle classi di profondità focale.

Figure 22 Number distribution of localised earthquakes in terms of focal depth.

Nel periodo di riferimento la sismicità risulta distribuita maggiormente in corrispondenza dei versanti orientale e meridionale del vulcano e, in misura inferiore, in corrispondenza del versante occidentale, interessato per lo più da sismicità profonda ($z \geq 15$ s.l.m.).

L'analisi statistica del catalogo attraverso l'uso del software ZMAP [Wiemer, 2001] ha consentito di stimare una magnitudo di completezza (M_C) pari a 1.4 ± 0.05 ed un valore di $b = 1.2 \pm 0.06$, per l'intera area vulcanica, valore che tipicamente contraddistingue la maggior parte delle zone vulcaniche e confrontabile con i valori ottenuti dall'analisi statistica dei dati relativi ai cataloghi sismici degli anni precedenti (es. 2017, 2019 e 2020). Lo stesso vale per la M_C . Solo una leggera differenza sembra emergere se si considera il set di dati che forma il catalogo 2018, con una tendenza del b ad attestarsi su valori inferiori all'unità ed una magnitudo di completezza pari a 1.1 ± 0.02 .

I meccanismi focali dei terremoti più energetici (M_L compresa tra 2.5 e 3.6) registrati nel 2021 suggeriscono soluzioni cinematiche principalmente trascorrenti (59%) in accordo con quelli che tipicamente caratterizzano l'area etnea e coerentemente con l'assetto strutturale dell'area [e.g. Scarfi et al., 2013; Barberi et al., 2016].

Infine il confronto tra i terremoti vulcano-tettonici, il tremore vulcanico e l'attività eruttiva osservata nel corso del 2021 ha messo in evidenza una stretta correlazione tra le fasi parossistiche al cratere di SE ed una generale diminuzione della sismicità soprattutto quella generata nei livelli crostali più superficiali ($z < 5$ km).

Ringraziamenti

Il Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici ringrazia tutto il personale tecnico che cura la gestione e la manutenzione delle stazioni della rete sismica permanente dell'INGV-OE. Un ringraziamento viene rivolto a Marco Aliotta autore del software *SeismPicker* e di altri applicativi fondamentali per lo svolgimento del lavoro del Gruppo. Si ringraziano G. Barberi, V. Maiolino, A. Scaltrito e A. Ursino per aver contribuito nelle analisi sismiche per l'anno 2021. Si ringrazia inoltre O. Cocina per i commenti e per i suggerimenti che hanno contribuito alla stesura finale del presente lavoro. Questo studio ha beneficiato del contributo finanziario della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento della Protezione Civile; il presente lavoro, tuttavia, non riflette necessariamente la posizione e le politiche ufficiali del Dipartimento.

Bibliografia

- Aki K., (1965). *Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its confidence limits*. Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ., 43, 237– 239.
- Alparone S., Cocina O., Gambino S., Mostaccio A., Spampinato S., Tuvè T., and Ursino A., (2013). *Seismological features of the Pernicana-Provenzana Fault System (Mt. Etna, Italy) and implications for the dynamics of northeastern flank of the volcano*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 118, 1–11.
- Alparone S., Barberi G., Di Grazia G., Ferrari F., Giampiccolo E., Maiolino V., Mostaccio A., Musumeci C., Scarfi L., Scaltrito A., and Ursino A., (2014). *Seismological constraints on deep seismicity occurring in the northwestern flank of Mt. Etna*. Conferenza A. Rittmann. Nicolosi (Catania), 29-31 Ottobre 2014. ISSN 2039-6651, (Poster).
- Alparone S., Barberi G., Giampiccolo E., Maiolino V., Mostaccio A., Musumeci C., Scaltrito A., Scarfi L., Tuvè T., and Ursino A., (2020). *Seismological constraints on the 2018 Mt. Etna (Italy) flank eruption and implications for the flank dynamics of the volcano*. Terra Nova, 32, 334–344. <https://doi.org/10.1111/ter.12463>
- Amitrano D., (2003). *Brittle-ductile transition and associated seismicity: Experimental and numerical studies and relationship with the b value*. J. Geophys. Res., 108. <https://doi.org/10.1029/2001JB000680>
- Barberi G., Giampiccolo E., Musumeci C., Scarfi L., Bruno V., Cocina O., Díaz-Moreno A, Sicali S., Tusa G., Tuvè T., Zuccarello L., Ibáñez J.M., and Patané D., (2016). *Seismic and volcanic activity during 2014 in the region involved by TOMO-ETNA seismic active experiment*. Ann. Geophys., 59, 4, S0429. <https://doi.org/10.4401/ag-7082>
- Barberi G., Ferrari F., Maiolino V., Mostaccio A., Scaltrito A., Sciotto M., Tusa G., Tuvè T., and Ursino A., (2022). *The seismicity of the Mt. Etna in the period January - December 2020*. Quaderni Di Geofisica, 179, 1-30. <https://doi.org/10.13127/qdg/179>
- Bath M., and Duda, S.J., (1963). *Strain release in relation to focal depth*. Geofis. Pura Appl., 56: 93-100.

- Bayrak Y., Ozturk S., and Erduran A., (2002). *The relationships between maximum magnitudes and modal values for different regions of Turkey*. 3rd Balkan Geophysical Congress and Exhibition. 8–4, 24–28 June, Sofia, Bulgaria.
- Calvari S., Biale E., Bonaccorso A., Cannata A., Carleo L., Currenti G., Di Grazia G., Ganci G., Iozzia A., Pecora E., Prestifilippo M., Sciotto M., and Scollo S., (2022). *Explosive Paroxysmal Events at Etna Volcano of Different Magnitude and Intensity Explored through a Multidisciplinary Monitoring System*. Remote Sens., 14, 4006. <https://doi.org/10.3390/rs14164006>
- Gambino S., Mostaccio A., Patanè D., Scarfi L. & Ursino A., (2004). *High-precision locations of the microseismicity preceding the 2002–2003 Mt. Etna eruption*. Geophys. Res. Lett., 31, L18604. <https://doi.org/10.1029/2004GL020499>
- Gutenberg B., and Richter C.F., (1944). *Frequency of earthquakes in California*. Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185–188.
- Gutenberg, B., and Richter, C.F., (1956). *Magnitude and Energy of Earthquakes*. Ann. Geofis., 9, 1–15.
- Hirn A., Nercessian A., Sapin M., Ferrucci F., and Wittlinger G., (1991). *Seismic heterogeneity of Mt. Etna: structure and activity*. Geophys. J. Int., 105, 139–153.
- Kanamori H., and Anderson D.L., (1975). *Theoretical basis of some empirical relations in seismology*. Bull. Seismol. Soc. Am., 65, 1073–1095.
- Lahr J.C., (1989). *HYPOELLIPSE/VERSION 2.0: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude and first motion pattern*. U.S. Geol. Surv., Open-File Rept. 512, 89–116, 81 pp.
- Montalto P., Aliotta M., Cassisi C., and Cannata A., (2013). *SeismicOffice, una suite software per l'analisi e la gestione dei dati sismici*. Rapporto tecnico INGV, 248, 22 pp.
- Patanè D., Aliotta M., Cannata A., Cassisi C., Coltelli M., Di Grazia G., Montalto P., Zuccarello L., (2011). *Interplay between Tectonics and Mount Etna's Volcanism: Insights into the Geometry of the Plumbing System*, New Frontiers in Tectonic Research - At the Midst of Plate Convergence, Edited by Dr. Uri Schattner, ISBN 978-953-307-594-5, 352 pp.
- Reasenber P.A., (1985). *Second-order moment of central California seismicity, 1969–1982*. J. Geophys. Res., 90 (B7), 5479– 5495. <https://doi.org/10.1029/JB090iB07p05479>
- Reasenber P.A., and Oppenheimer D., (1985). *FPPFIT, FPLOT and FPPAGE: FORTRAN Computer Programs for Calculating and Displaying Earthquake Fault-Plane Solutions*. US Geological Survey Open-File Report, 85-739, 109 pp.
- Scarfi L., Cassisi C., and Messina A.A., (2013). *Sicily and Southern Calabria Focal Mechanisms Catalog (SCFocMeC) (Version 1) [Data set]*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) - Osservatorio Etneo (OE). <https://doi.org/10.13127/ETNASC/SCFOCMC>
- Schorlemmer D., and Wiemer S., (2005). *Microseismicity data forecast rupture area*. Nature, 434 (7037), 1086. <https://doi.org/10.1038/4341086a>
- Sciotto M., Cannata A., Di Grazia G., Montalto P., (2022). *Volcanic tremor and long period events at Mt. Etna: Same mechanism at different rates or not?* Phys. Earth Planet. Inter, 324, 106850. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2022.106850>
- Sicali S., Barbano M.S., D'Amico S., and Azzaro R., (2014). *Characterization of seismicity at Mt. Etna volcano (Italy) by interevent time distribution*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 270, 1–9.
- Utsu T., (1965). *A method for determining the value of b in a formula $\log N = a - bM$ showing the magnitude frequency for earthquakes*. Geophys. Bull., Hokkaido Univ., Hokkaido, Japan, 13, 99–103.
- Villani F., Pucci S., Azzaro R., et al., (2020). *Surface ruptures database related to the 26 December 2018, MW 4.9 Mt. Etna earthquake, southern Italy*. Sci. Data 7, 42. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0383-0>
- Wiemer S., (2001). *A software package to analyze seismicity: ZMAP*. Seismol. Res. Lett., 72, 373–382.
- Wiemer S., and Wyss M., (2000). *Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States and Japan*. Bull. Seismol. Soc. Am., 90(4), 859 – 869.

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://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

<http://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

http://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

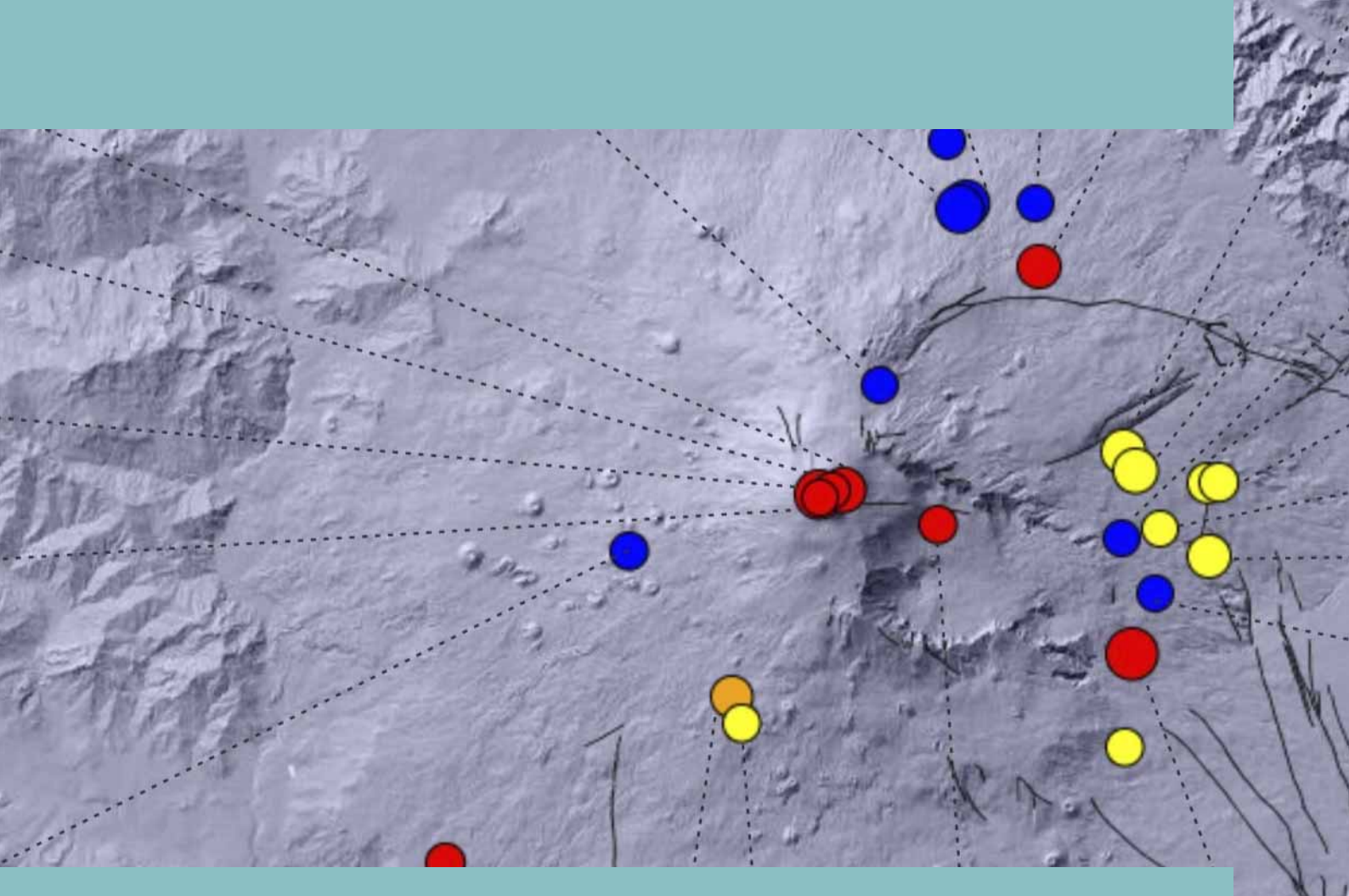
©2024

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