

# QUADERNI di GEOFISICA

La sismicità dell'area etnea nel  
periodo gennaio – dicembre 2020



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

179

M.te Etna

### **Direttore Responsabile**

Valeria DE PAOLA

### **Editorial Board**

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)  
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)  
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)  
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)  
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)  
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)  
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)  
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)  
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)  
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)  
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)  
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)  
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)  
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

### **Segreteria di Redazione**

Francesca DI STEFANO - Coordinatore  
Rossella CELI  
Robert MIGLIAZZA  
Barbara ANGIONI  
Massimiliano CASCONI  
Patrizia PANTANI  
Tel. +39 06 51860068  
redazione@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**

# QUADERNI di GEOFISICA

La sismicità dell'area etnea nel periodo  
gennaio – dicembre 2020

*The seismicity of the Mt. Etna in the period  
January – December 2020*

Graziella Barberi, Ferruccio Ferrari, Vincenza Maiolino, Antonino Mostaccio, Antonio Scaltrito,  
Mariangela Sciotto, Giuseppina Tusa, Tiziana Tuvè, Andrea Ursino

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

Accettato 24 gennaio 2022 | Accepted 24 January 2022

Come citare | How to cite Barberi G., Ferrari F., Maiolino V., Mostaccio A., Scaltrito A., Sciotto M., Tusa G., Tuvè T., Ursino A., (2022). La sismicità dell'area etnea nel periodo gennaio – dicembre 2020. Quad. Geofis., 179: 1-30, <https://doi.org/10.13127/qdg/179>

In copertina | Mappa epicentrale delle principali sequenze sismiche verificatesi nel corso del 2020 | Cover | Epicentral map of the main seismic sequences occurring in 2020

179



# INDICE

<b>Riassunto</b>	<b>7</b>
<i>Abstract</i>	<b>7</b>
<b>Introduzione</b>	<b>8</b>
<b>1. La rete sismica dell'Osservatorio Etneo</b>	<b>8</b>
<b>2. Dati</b>	<b>10</b>
<b>3. Sismicità etnea nel 2020</b>	<b>12</b>
<b>4. Sequenze sismiche</b>	<b>17</b>
<b>5. Meccanismi focali</b>	<b>21</b>
<b>6. Note conclusive</b>	<b>24</b>
<b>Ringraziamenti</b>	<b>24</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>25</b>



# Riassunto

In questo lavoro viene descritta la sismicità, collegata agli eventi vulcano-tettonici, registrata dalle stazioni della Rete Sismica Permanente dell'INGV – Osservatorio Etneo (OE) nell'area vulcanica del Monte Etna dall'1 gennaio al 31 dicembre 2020. Nel periodo di riferimento la rete sismica gestita dall'INGV-OE risulta costituita da un centinaio di stazioni i cui segnali sismici sono trasmessi in tempo reale al CUAD (Centro Unificato Acquisizione Dati) di Catania dove vengono acquisiti e trasferiti in continuo alla Sala Operativa dell'Osservatorio Etneo. Nel corso del 2020 sono stati registrati 3604 terremoti, di cui 2287 localizzati dal Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici dell'OE (GLAOE), secondo gli standard definiti per la compilazione del catalogo strumentale nell'ambito delle attività di monitoraggio previste all'interno dell'Accordo Quadro INGV – Dipartimento Protezione Civile (DPC) 2012-2021 (Allegato A).

Le profondità focali degli eventi analizzati sono comprese tra -1.6 e 35 km circa, mentre la magnitudo locale ( $M_L$ ) risulta compresa tra 0.2 e 3.7; la magnitudo di completezza ( $M_C$ ) del risultante catalogo è pari a 1.2 ( $\pm 0.01$ ), valore quindi del tutto confrontabile con quello stimato per il 2017 e il 2019, ma superiore di 0.1 unità rispetto a quello stimato per il 2018.

Sono 15 gli eventi con  $M_L \geq 3.0$  registrati nel corso del 2020, la maggior parte dei quali appartenenti alle 11 sequenze sismiche che sono state individuate per lo stesso anno. La sequenza sismica più importante sia per numero di eventi (21) sia per energia rilasciata (valore massimo  $M_L = 3.7$ ), è stata registrata il 31 dicembre a partire dalle 19:59 (UTC) e ha interessato il medio versante meridionale dell'edificio vulcanico, poco a nord del centro abitato di Ragalna.

## Abstract

*This work describes the main characteristics of the seismicity due to the volcano-tectonic events recorded at Mount Etna during 2020. The data are recorded by the seismic stations of the Permanent Seismic Network operated by National Institute of Geophysics and Volcanology – Etna Observatory (INGV - OE). In this year, about 100 seismic stations constitute the network. The seismic data are first transmitted in real time to the Unified Data Acquisition Centre (CUAD) and then continuously transferred and recorded in the Control Room of INGV – OE. The Analyst Working Group of the Etna Observatory (GLAOE) reviews and reprocesses the seismic data the day after they are acquired, observing standard protocols which are adopted for the compilation of the catalogues and the databases relative to the volcanic areas pertaining to the observatory. The data analyses are performed every day by the GLAOE, and are among the monitoring activities provided by the INGV in the framework of the Accordo Quadro INGV – Civil Protection Department (DPC) 2012-2021 (Allegato A).*

*During 2020, 3604 earthquakes were recorded in the Etna area, and of these, 2287 were localised. The focal depth is between -1.6 km a.s.l. and 35 km b.s.l., while the local magnitude ( $M_L$ ) is from 0.2 to 3.7. The magnitude of completeness ( $M_C$ ) of the 2020 resulting catalogue is equal to 1.2 ( $\pm 0.01$ ), a value comparable to that calculated for 2017 and 2019, but 0.1 units higher than that estimated for 2018. The seismic events with  $M_L \geq 3.0$  are 15 and above all belonging to one of the 11 seismic sequences identified for 2020. The seismic sequence occurred on December the 31<sup>st</sup> and started at the 19:59 (UTC) is the most important one, since includes the highest number of events (21) and the most energetic earthquake of the year ( $M_L = 3.7$ ).*

## Introduzione

In questo lavoro viene descritto lo stato dell'arte della Rete Sismica Permanente dell'INGV - Osservatorio Etneo (OE) - ed analizzata la sismicità etnea nel corso del 2020. Esso rappresenta il primo di una serie di contributi che gli autori, appartenenti al gruppo di analisi dati sismici dell'Osservatorio Etneo, intendono condividere con la comunità scientifica con aggiornamenti annuali.

Il territorio Etneo, oltre a risentire degli effetti dei terremoti regionali, è interessato da una sismicità locale, soprattutto superficiale (entro i primi 6-7 km di profondità) e principalmente localizzata nel settore centro-orientale dell'edificio vulcanico, dovuta alla combinazione dei processi più prettamente vulcanici legati al sistema magmatico del Monte Etna e alla tettonica regionale associata alle zone sismogenetiche dell'Altopiano Ibleo a sud e dell'Arco Calabro a nord. In questo Quaderno si descrivono le principali caratteristiche della sismicità etnea durante il 2020 partendo dalle registrazioni acquisite dalla rete sopradetta; le fasi sismiche riconosciute, tutte le localizzazioni ottenute e i relativi meccanismi focali sono consultabili nel sito web <http://hpceqcatalog/etnarsc/main.asp>.

Lo studio descrive le principali analisi sismologiche effettuate, ossia l'evoluzione spazio-temporale degli eventi sismici, il calcolo del *b-value*, la descrizione delle sequenze sismiche e dei meccanismi focali dei terremoti con magnitudo locale superiore a 2.5.

Dall'analisi dei dati emerge che una parte rilevante della sismicità registrata nel 2020 è concentrata nel settore orientale dell'edificio vulcanico etneo, con la maggior parte degli eventi localizzati entro i primi 5 km di profondità. Le magnitudo locali stimate sono basse e comprese tra 0.2 e 3.7. Un altro elemento che caratterizza il *pattern* di sismicità deriva dall'osservazione dei terremoti più profondi. Essi si estendono sino ad una profondità di circa 35 km ed hanno epicentri per lo più localizzati nel settore nord occidentale dell'edificio vulcanico. Nella letteratura sismologica, tali eventi sono considerati essere la risposta crostale dell'attività vulcanica più strettamente collegata ai meccanismi di ricarica magmatica. Infine, dall'analisi dei meccanismi focali degli eventi più energetici del set di dati analizzati emerge che la cinematica prevalente delle strutture sismogenetiche coinvolte è di tipo trascorrente.

## 1. La rete sismica dell'Osservatorio Etneo

La Rete Sismica Permanente della Sicilia Orientale (RSP) gestita dall'INGV - Osservatorio Etneo (OE) costituisce parte integrante della Rete Sismica Nazionale (RSN) - INGV, e nel 2020 era costituita da circa un centinaio di stazioni (Figura 1). Dal punto di vista quantitativo, la rete è infatti sottoposta a continui aggiornamenti grazie al supporto delle stazioni temporanee curate dal gruppo Rete Mobile dell'Osservatorio Etneo. Queste ultime rappresentano un importante fonte di integrazione per la RSP poiché concorrono da una parte al miglioramento della copertura spaziale dell'area monitorata, e dall'altra alla sostituzione delle stazioni che periodicamente sono soggette a mal funzionamento.

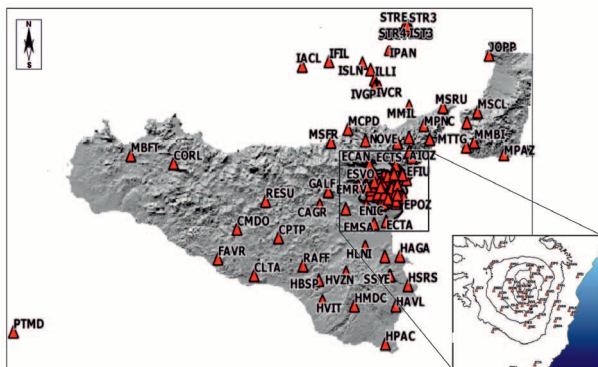
La rete copre la Sicilia orientale, estendendosi dal settore meridionale ibleo fino alle Isole Eolie, e comprende inoltre, l'Isola di Pantelleria, parte della Calabria meridionale e della catena dei Monti Nebrodi.



La totalità delle stazioni è equipaggiata con sensori velocimetrici a larga banda, prevalentemente Trillium 40s in progressiva sostituzione con Guralp CMG-3EX 120s (Tabella 1). La Rete Mobile, il cui ruolo è quello di supportare in modo temporaneo la rete permanente e di provvedere a installazioni utili per scopi di ricerca, adotta quasi esclusivamente il sensore Trillium Compact 120s. Tutte le stazioni, permanenti e temporanee, sono in acquisizione continua, in *real time* e campionate a 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 detezione sempre più elevata della sismicità di fondo, 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>).

Le stazioni ubicate nell'area vulcanica del Monte Etna sono poco più di trenta (Figura 1, Tabella 1) e rappresentano la fonte principale di informazione ai fini della localizzazione degli eventi sismici che caratterizzano più specificatamente la sismicità etnea.



**Figura 1** Mappa delle stazioni della Rete Sismica Permanente dell'INGV - OE. Il riquadro comprende le stazioni utilizzate per la localizzazione degli eventi in area etnea.

**Figure 1** Map of stations belonging to the Permanent Seismic Network of INGV - OE. The square includes the stations used to locate events in the Etna area.

Stazione	Lat. (°)	Lon. (°)	Quota (m)	Sensore	Sensibilità (Volt/m/s)	mV/Count	n° P	n° S	S/P	P/nEv
AIO	37.97	15.23	794	Tr. 40s	1553	0.0010	221	19	0.09	0.061
EBDA	37.63	15.12	350	Gu. 120s	2000	0.0016	249	54	0.22	0.069
ECBD	37.78	15.08	1465	Tr. 40s	1553	0.0025	1644	659	0.40	0.456
ECHR	37.68	14.91	1168	Tr. 40s	1553	0.0025	665	96	0.14	0.185
ECNE	37.76	15.00	2946	Tr. 40s	1553	0.0025	149	46	0.31	0.041
ECPN	37.74	14.98	3038	Tr. 40s	1553	0.0025	143	52	0.36	0.040
ECTS	37.88	15.12	644	Tr. 40s	1553	0.0025	397	47	0.12	0.110
ECZM	37.73	14.90	1391	Tr. 40s	1553	0.0025	886	320	0.36	0.246
EFIU	37.79	15.21	97	Tr. 40s	1553	0.0010	333	14	0.04	0.092
EMCN	37.79	15.03	1917	Tr. 40s	1553	0.0025	1416	622	0.44	0.393
EMFO	37.73	15.09	1209	Tr. 40s	1553	0.0025	1393	637	0.46	0.387
EMFS	37.72	14.99	2552	Tr. 40s	1553	0.0025	974	411	0.42	0.270
EMNR	37.81	15.02	1845	Tr. 40s	1553	0.0010	1418	371	0.26	0.393
EMPL	37.67	14.97	1484	Tr. 40s	1553	0.0025	842	165	0.20	0.234
EMSG	37.82	14.95	1487	Tr. 40s	1553	0.0025	1321	202	0.15	0.367
ENIC	37.63	15.02	878	Tr. 40s	1553	0.0025	365	34	0.09	0.101
EPDN	37.76	15.01	2862	Tr. 40s	1553	0.0025	367	67	0.18	0.102

EPIT	37.81	15.05	1657	Tr. 40s	1553	0.0025	1549	227	0.15	0.430
EPLC	37.76	14.98	2968	Tr. 40s	1553	0.0025	322	132	0.41	0.089
EPMN	37.82	15.17	541	Tr. 40s	1553	0.0025	1031	380	0.37	0.286
EPOZ	37.67	15.18	116	Gu. 120s	2000	0.0016	295	6	0.02	0.082
EPZF	37.82	14.87	1118	Tr. 40s	1553	0.0025	662	115	0.17	0.184
ESAL	37.75	15.13	768	Gu. 120s	2000	0.0016	806	133	0.17	0.224
ESCV	37.74	14.81	658	Tr. 40s	1553	0.0010	507	109	0.21	0.141
ESLN	37.69	14.97	1778	Tr. 40s	1553	0.0025	1049	402	0.38	0.291
ESML	37.61	14.87	408	Tr. 40s	1553	0.0025	397	89	0.22	0.110
ESPC	37.69	15.02	1655	Tr. 40s	1553	0.0025	1572	929	0.59	0.436
ESVO	37.77	14.94	1736	Tr. 40s	1553	0.0010	926	136	0.15	0.257
EV RN	37.68	15.13	417	Le. 20s	1000	0.0025	649	156	0.24	0.180
HLNI	37.34	14.87	133	Tr. 40s	1553	0.0010	74	11	0.10	0.021
MUCR	38.04	14.87	1042	Tr. 40s	1553	0.0010	113	15	0.10	0.031
OEM1	37.61	14.96	737	Tr.c. 120s	750	0.0025	159	52	0.30	0.044

**Tabella 1** Elenco delle stazioni sismiche della RSP installate nell'area etnea, utilizzate per la localizzazione degli eventi nel corso del 2020. Nella tabella vengono riportate: la sigla della stazione, le relative coordinate geografiche (latitudine, longitudine e quota), il tipo di sensore installato e il relativo periodo proprio (Tr. = Trillium; Tr.c. = Trillium compact; Le. = Lennartz; Gu. = Guralp), la sua sensibilità, il fattore di conversione mVolt/Count del digitalizzatore, il numero di fasi P (n° P), il numero di fasi S (n° S), il rapporto tra il numero di fasi S e il numero di fasi P (S/P), il rapporto tra il numero di fasi P e il numero di eventi (P/nEv).

**Table 1** Details of the seismic stations belonging to the RSP of INGV-OE installed in the Etna area, used to locate events in 2020. Station code, geographical coordinates (latitude, longitude and elevation), type of sensor (Tr. = Trillium; Tr.c. = Trillium compact; Le. = Lennartz; Gu. = Guralp) with its eigen-period and sensitivity, millivolt to count conversion factor, number of P- (n° P) and S-phases (n° S), number of S- to P-phases ratio (S/P), number of P-phases to number of events (P/nEv) ratio are reported for each station.

## 2. Dati

Sin dal 1999 il Gruppo di Analisi Dati Sismici si occupa dell'analisi di dettaglio di tutti gli eventi sismici registrati nelle aree vulcaniche monitorate dall'OE, e dell'aggiornamento quotidiano del catalogo dei terremoti. Le attività svolte dal gruppo prevedono la stima dei principali parametri sismici quali: coordinate ipocentrali, tempo origine e magnitudo locale, oltre al calcolo dei meccanismi focali, della frequenza di accadimento dei terremoti e del rilascio di *strain* sismico associato. Le stime di tutti questi parametri, derivate dall'analisi dei terremoti, confluiscono nella Banca Dati Analisti [Barberi et al., 2020].

Come è noto, tra gli errori sistematici associati a una misura, quello legato alla soggettività della stessa può essere minimizzato definendo un protocollo che contenga dei rigidi criteri da seguire in ogni fase della misura stessa. Questo vale anche per la localizzazione di un terremoto e la stima dei parametri che lo caratterizzano, come ad esempio la magnitudo.

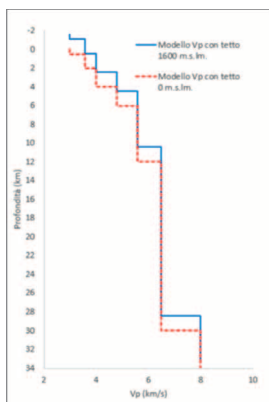
Per limitare gli effetti della soggettività sulle stime dei parametri contenuti nel catalogo e renderlo il più possibile omogeneo, dall'1 gennaio 2020 l'analisi dei dati prevede l'applicazione dei seguenti criteri:

1. archiviazione dei tempi di arrivo di tutte le fasi P e S disponibili per un dato evento e relativo

1. inserimento nel catalogo, a prescindere dalla bontà della localizzazione che ne deriva<sup>1</sup>;
2. localizzazione, ottenuta attraverso il codice di calcolo ipocentrale *Hypoellipse* [Lahr, 1999], di tutti gli eventi per i quali sono stati identificati i tempi di arrivo di almeno 4 fasi P e/o S;
3. utilizzo del modello 1D di velocità delle onde P (rapporto  $V_p/V_s$  pari a 1.73) a sette strati di Hirn et al. [1991], modificato da Patanè et al. [1994], il cui tetto è posto a 1600 metri sul livello del mare (Figura 2);
4. calcolo della magnitudo attraverso la media delle magnitudo stimate alle singole stazioni, e dell'associato errore standard<sup>2</sup>.

L'adozione dei criteri sopra descritti ha determinato rispetto ai cataloghi precedenti:

- un maggior numero di eventi localizzati (Numero di letture,  $NI \geq 4$ ), anche se ad alcuni di essi risultano associati errori di localizzazione (rms, erh, erz, gap) relativamente elevati. L'incremento delle localizzazioni nel 2020 non è quantificabile percentualmente, rispetto agli anni precedenti, a causa del diverso modo di archiviazione degli eventi, ovvero la mancanza del numero di picking disponibili per questi eventi;
- localizzazioni caratterizzate da profondità ipocentrali anche negative (comprese tra 0.0 e -1.6 km s.l.m.), ossia al di sopra del piano campagna;
- valori di errore standard associati alla magnitudo, mediamente più elevati.



**Figura 2** Profilo di velocità delle onde P [Hirn et al., 1991; modificato da Patanè et al., 1994] con il livello di riferimento posto a 1600 m s.l.m. (linea azzurra). Viene mostrato lo stesso profilo di velocità ma con il livello di riferimento posto a 0 m s.l.m. (linea rossa tratteggiata) utilizzato negli anni precedenti per le localizzazioni degli eventi in area etnea. Il rapporto  $V_p/V_s$  è pari a 1.73.

**Figure 2** P-phase velocity profile [Hirn et al., 1991; modified by Patanè et al., 1994] relative to the model with 1600 m a.s.l. (blue line) and 0 m a.s.l. (red line) as reference level. The  $V_p/V_s$  ratio is 1.73.

Nel corso del 2020 sono stati registrati 3604 terremoti; di questi, 1317 non sono stati localizzati perché caratterizzati da un insufficiente numero di letture dei primi arrivi P. Le cause di ciò possono essere imputate: (i) alla bassa energia dell'evento, che quindi viene registrato solo da poche stazioni; (ii) al basso rapporto segnale rumore in seguito a un aumento del tremore vulcanico, che quindi tende a mascherare gli *onset* dei primi arrivi; (iii) all'appartenere a uno sciame sismico per cui la coda di un evento maschera il primo arrivo dell'evento successivo. Tuttavia, per tali eventi sono stati forniti all'interno del catalogo i tempi di arrivo di almeno una fase P. In definitiva, su 3604 terremoti solo 2287 sono stati localizzati dal Gruppo di Lavoro Analisi Dati Sismici dell'OE (GLAOE) contenenti tutti i parametri che definiscono la localizzazione ipocentrale (ultimo accesso 11 novembre 2021).

I parametri ipocentrali dei terremoti localizzati vengono salvati nel database <http://eqcatalog.ct.ingv.it/etnarsc/> ed essendo un catalogo dinamico, può essere sottoposto a

<sup>1</sup> In precedenza, gli eventi la cui localizzazione proveniva da un numero di letture,  $NI$ , inferiore a 4, non venivano inseriti all'interno del catalogo poiché se ne riteneva non affidabile la localizzazione.

<sup>2</sup> Negli anni precedenti al calcolo della magnitudo media non contribuivano quei valori che l'analista riteneva, in modo del tutto arbitrario, discostarsi significativamente dalla media.

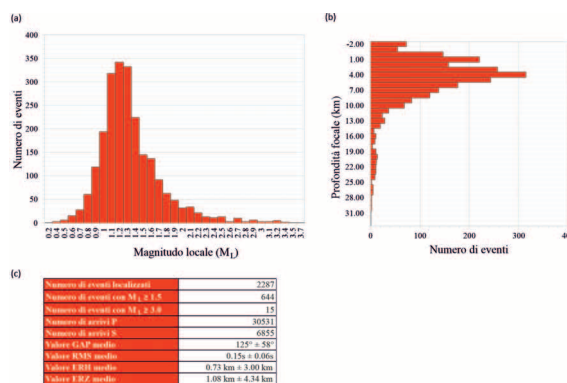
continui aggiornamenti. Inoltre, oltre ai dettagli dell'evento, nel sito viene riportata anche la data esatta di elaborazione dell'evento localizzato.

Il software utilizzato per l'analisi dei terremoti è *SeismPicker*, sviluppato dal gruppo informatico dell'INGV - OE [Montalto et al., 2013], che utilizza *Hypoellipse* [Lahr, 1999] per la localizzazione dei terremoti. *SeismPicker*, oltre a consentire la visualizzazione contemporanea delle tracce sismiche alle singole stazioni, offre la possibilità di filtrarle e di effettuare le letture dei tempi di arrivo, definendo, ove possibile, la polarità necessaria per il calcolo dei meccanismi focali attraverso l'uso del software FPFIT [Reasenbergs and Oppenheimer, 1985]. Contestualmente alla localizzazione, *SeismPicker* calcola la magnitudo locale attraverso la media delle magnitudo stimate per ciascuna stazione utilizzata.

### 3. Sismicità etnea nel 2020

L'attività sismica da fratturazione che ha caratterizzato l'area vulcanica del Monte Etna durante il 2020 è stata significativa sia da un punto di vista quantitativo sia da un punto di vista energetico. La magnitudo dei terremoti localizzati durante il periodo investigato è compresa tra 0.2 e 3.7 (Figura 3a), quest'ultimo valore legato a un evento del 31 dicembre il cui epicentro ricade sull'alto versante sud-occidentale del vulcano, 1 km a S da Monte Denza (Figura 4). Circa il 30% del totale degli eventi localizzati ha una  $M_L \geq 1.5$ ; di questi 50 sono quelli che hanno superato il valore di  $M_L \geq 2.5$ , e soltanto 15 hanno raggiunto e superato una  $M_L$  pari a 3.0 (Figura 3c).

Come è possibile osservare in Figura 4, l'attività sismica si è concentrata prevalentemente nell'area dei crateri sommitali e nel settore orientale dell'edificio vulcanico etneo, coinvolgendo per lo più i primi 6 km di profondità (Figura 3b) (il 65% circa del totale degli eventi si colloca in questo livello crostale), sebbene la sismicità sia comunque presente in un ampio intervallo di profondità (fino a circa 30 km), come ben si evince anche dall'osservazione della Figura 5.



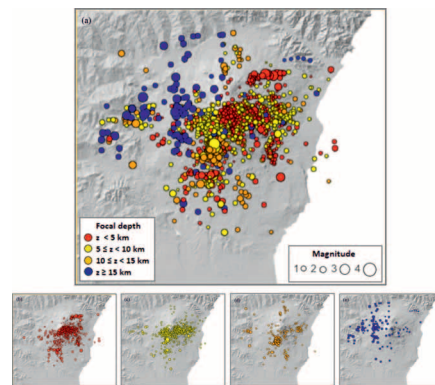
**Figura 3** (a) Distribuzione del numero di eventi localizzati in funzione della magnitudo presenti nel catalogo (ultimo accesso 11 novembre 2021). Si noti il picco a  $M_L = 1.2$ . (b) Distribuzione del numero di eventi in funzione della profondità focale. (c) Riepilogo dei principali parametri ipocentrali dei terremoti localizzati che costituiscono il catalogo.

**Figure 3** (a) Number of localised events versus local magnitude ( $M_L$ ) characterizing the catalogue (last access: 11 November, 2021). Note the peak around the value 1.2. (b) Frequency distribution of earthquakes with respect to focal depth. (c) Summary of the main hypocentral parameters of the localised earthquakes recorded in the Etna area.

Gli epicentri sono concentrati principalmente sul fianco nord-orientale del vulcano, lungo il sistema di faglie di Piano Provenzana–Pernicana, nella Valle del Bove e in un settore a ESE di

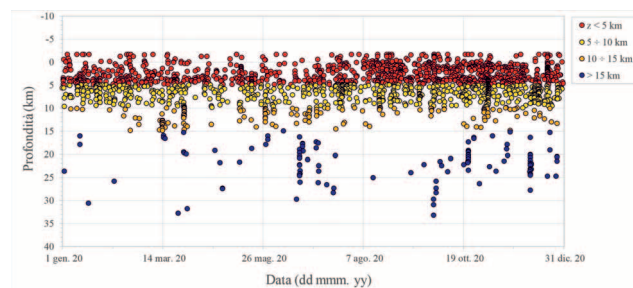
quest'ultima (Figura 4). La sismicità che caratterizza il fianco sud-occidentale appare distribuita lungo un'ampia fascia che dai crateri sommitali si spinge fino al medio versante meridionale del vulcano e coinvolge i livelli crostali al di sopra dei 15 km.

Viceversa, conformemente a una evidenza ormai consolidata, i settori occidentale e nord-occidentale dell'edificio vulcanico sono sismicamente meno attivi e sedi di sismicità più profonda (prevalentemente oltre i 15 km) in risposta all'attività tettonica connessa ai sistemi strutturali a carattere regionale legati al regime compressivo della Catena Appennino–Maghrebide [Alparone et al., 2014].



**Figura 4** (a) Mappa epicentrale degli eventi etnei localizzati e presenti nel catalogo 2020. La dimensione dei cerchi è proporzionale alla magnitudo. Mappe della stessa sismicità suddivise per intervalli di profondità: (b)  $h < 5$  km, (c)  $5 \text{ km} \leq h < 10$  km, (d)  $10 \text{ km} \leq h < 15$  km ed (e)  $h \geq 15$  km.

**Figure 4** (a) Epicentral map of Mount Etna seismicity during 2020. Circle dimension is proportional to the magnitude. Epicentral maps for different depth levels: (b)  $h < 5$  km, (c)  $5 \text{ km} \leq h < 10$  km, (d)  $10 \text{ km} \leq h < 15$  km, and (e)  $h \geq 15$  km b.s.l.



**Figura 5** Distribuzione in funzione del tempo delle profondità focali degli eventi etnei localizzati nel periodo gennaio–dicembre 2020.

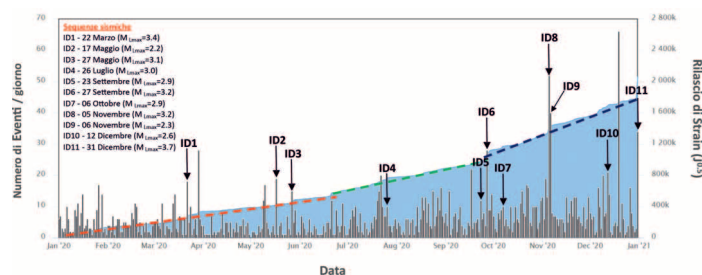
**Figure 5** Earthquake depths distribution as a function of time from January to December 2020.

Tuttavia, alcuni eventi con profondità focali superiori a 10 km sono riconoscibili anche al di sotto dei settori nord-orientale e sud-orientale del vulcano.

In Figura 6 viene riportato l'andamento temporale del numero di terremoti giornaliero e del relativo rilascio cumulativo di *strain* (espresso in  $J^{1/2}$ ). Quest'ultimo è stato stimato attraverso la radice quadrata dell'energia sismica ( $E$ ) espressa in erg, calcolata usando la relazione di Richter [1958]:

$$\text{Log}(E) = 9.9 + 1.9M_L - 0.024M_L^2 \tag{1}$$

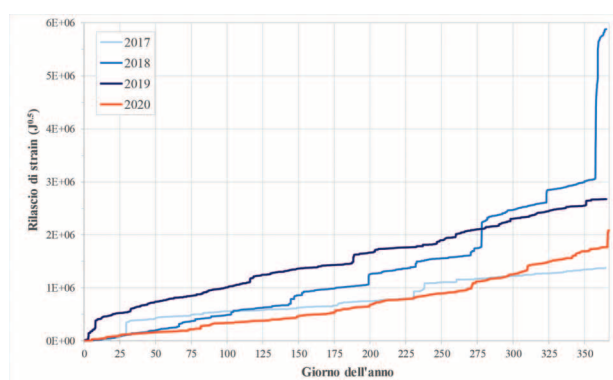
dove  $M_L$  è la magnitudo locale dell'evento.



**Figura 6** Numero giornaliero di terremoti e rilascio cumulativo di *strain* sismico nel periodo 1 gennaio–31 dicembre 2020. Le linee tratteggiate rossa, verde e blu evidenziano le principali fasi di cambiamento nel rilascio di *strain*. L'inset in alto a sinistra elenca le sequenze sismiche registrate nel 2020, riportandone la relativa magnitudo locale massima registrata.

**Figure 6** Daily number of earthquakes and cumulative seismic strain release from 1 January to 31 December 2020. The red, green, and blue dashed lines highlight the major change in the cumulative strain release with time. The top left inset lists the seismic sequences recorded in 2020, with their relative maximum local magnitude recorded.

I dati in Figura 6 evidenziano un rilascio energetico modesto, sia per quanto riguarda il numero di terremoti sia per l'energia ad essi associata. Riguardo a quest'ultimo aspetto, infatti, la curva cumulativa del rilascio di *strain* calcolata per il 2020 mette in evidenza un rilascio di energia sismica decisamente più basso di quello che ha caratterizzato i due anni precedenti, come si evince chiaramente dalla Figura 7. Viceversa, rispetto al 2017, le stesse curve tendono a mostrare tassi di sismicità confrontabili. Si noti che l'intervallo temporale considerato nella Figura 7 è volutamente ampliato fino all'1 gennaio del 2021, in modo da evidenziare il repentino aumento del rilascio di *strain* dovuto al verificarsi della sequenza sismica a cavallo tra il 31 dicembre 2020 e l'1 gennaio 2021, la più importante dell'intero periodo e che verrà descritta con maggiore dettaglio nel Capitolo 4.



**Figura 7** Confronto tra le curve di rilascio di *strain* che caratterizzano gli anni 2017, 2018, 2019 e 2020.

**Figure 7** Comparison between the strain release curves computed for years 2017, 2018, 2019, and 2020.

Dal punto di vista energetico, nel 2020 il tasso di sismicità si è mantenuto circa costante fino alla metà di giugno (linea tratteggiata rossa in Figura 6). I rilasci più significativi si sono verificati a partire dall'inizio del secondo semestre (Tabella 3), in concomitanza delle sequenze sismiche che hanno interessato i diversi settori dell'edificio vulcanico – con maggiori addensamenti di eventi sismici nei versanti nord-orientale e meridionale del vulcano – e si sovrappongono alla generale sismicità moderata che ha coinvolto tutta l'area vulcanica etnea. Sebbene ancora associate a eventi sismici di modesta entità, queste sequenze hanno prodotto un leggero

aumento del tasso di frequenza e un altrettanto leggero aumento del gradiente di rilascio di *strain* (linea tratteggiata verde in Figura 6). All'interno di tale periodo si collocano le sequenze del 26 luglio e del 23 settembre (ID 4 e ID 5 in Figura 6), le cui aree epicentrali si trovano entrambe sull'alto versante orientale del vulcano (tra Pizzi de Neri e Monte Centenari la prima, e i Crateri Centrali la seconda). Un ulteriore aumento del gradiente temporale di rilascio di *strain* si osserva a partire dalla fine di settembre, accompagnato anche da un leggero ulteriore aumento nella frequenza degli eventi sismici; tale aumento si registra in concomitanza del verificarsi di un importante sciame superficiale (volumi crostali coinvolti entro i primi 5 km) che ha interessato la zona del sistema di faglie di Piano Provenzana – Pernicana sul versante nord-orientale del vulcano (sequenza con ID 6 in Figura 6) e il cui evento più energetico di  $M_L = 3.2$  è stato registrato il 27 settembre alle ore 18:10 UTC. Allo stesso periodo appartengono due tra le sequenze sismiche più significative del 2020, ossia quelle del 5 e del 6 novembre (ID 9 e ID 10 in Figura 6), ancora nell'area dei Crateri Centrali e con profondità focale compresa circa tra 3 e 8 km. Un pronunciato gradino nella curva di rilascio di *strain* si osserva alla fine del 2020 grazie al verificarsi di uno sciame sismico "profondo" iniziato il 31 dicembre, che si è protratto fino alle prime ore dell'1 gennaio 2021, lungo il medio-alto versante sud-orientale del vulcano e che ha prodotto l'evento più energetico di tutto il 2020 ( $M_L = 3.7$ ).

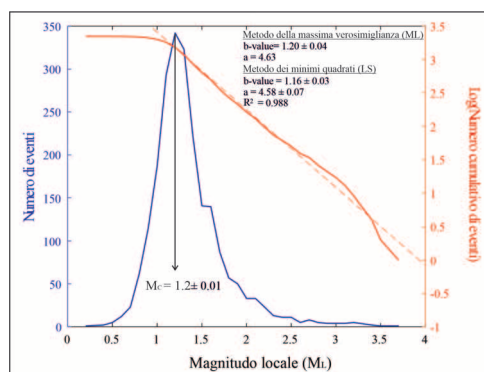
Un altro elemento che ci aiuta a caratterizzare la sismicità etnea durante il 2020, può essere ricavato dalla distribuzione del numero dei terremoti in funzione della magnitudo, calcolata attraverso la legge empirica di Gutenberg-Richter [Gutenberg e Richter, 1944]. Tale relazione può essere espressa come:

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

dove  $N$  indica il numero cumulativo degli eventi con una magnitudo superiore a  $M$  e i parametri  $a$  e  $b$  sono costanti. In particolare,  $a$  corrisponde al numero di terremoti  $N(M)$ , che per  $M = 0$  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  $\text{Log}_{10}N(M)$ , esprime invece il rapporto tra il numero di piccoli e di 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], che ha consentito di stimare la magnitudo di completezza ( $M_C$ ) attraverso il metodo della massima curvatura [Wiemer e Wyss, 2000] e la relativa incertezza. In particolare, la  $M_C$  per il 2020 è risultata essere pari a 1.2 con una incertezza di  $\pm 0.01$ , quest'ultima stimata attraverso la tecnica del *bootstrap* applicando una correzione in termini di magnitudo di 0.1 a 200 campioni (Figura 8). 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], ancora attraverso il software ZMAP, sia con il metodo dei minimi quadrati (LS, *Least Squared*), al fine di valutare l'influenza del metodo di analisi adottato sul valore dei coefficienti stessi e sulla loro incertezza.

La legge empirica G-R ottenuta per il catalogo 2020 riflette la somma della sismicità prodotta dall'insieme delle sorgenti sismiche, sia superficiali sia profonde, distribuite sull'intero edificio vulcanico. In tal senso, quindi, deve essere considerata come indicativa di un regime medio rappresentativo di tutta la sismicità che ha caratterizzato l'area vulcanica durante il 2020. Come mostrato in Figura 8, il *b-value* nell'intero volume campionato è stimato essere, con entrambi i metodi adottati, di poco superiore all'unità, in conformità con i valori che tipicamente caratterizzano le aree sismicamente attive.

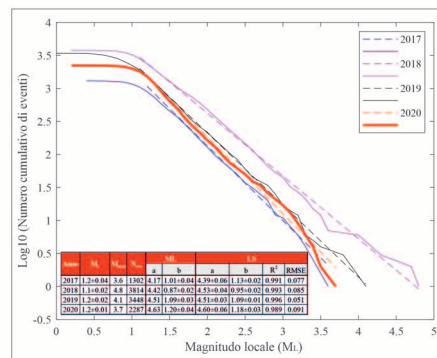


**Figura 8** Distribuzione del numero di eventi in funzione della magnitudo (linea blu) e relazione di Gutenberg-Richter (linea rossa) calcolata utilizzando i dati del catalogo di sismicità dell'area etnea nel 2020. La magnitudo di completezza ( $M_C$ ) è pari a  $1.2 \pm 0.01$ . La linea rossa tratteggiata rappresenta la retta di regressione lineare derivata a partire da  $M_C$ .

**Figure 8** Number of events vs local magnitude (blue line) and cumulative Gutenberg-Richter distribution (red line) of the whole 2020 Etna seismicity catalogue. The magnitude of completeness ( $M_C$ ) is  $1.2 \pm 0.01$ . The red dashed line represents the line of best-fit (least square method) through the data points with magnitude greater than or equal to  $M_C$ .

L'evoluzione temporale del  $b$ -value rappresenta un ulteriore aspetto utile a 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]. A tal fine, sono state quindi stimate le distribuzioni G-R relative agli anni 2017, 2018 e 2019, in conformità con la procedura adottata per l'analisi della sismicità 2020, e sono stati confrontati i risultati (Figura 9). Tenendo conto delle differenze nei valori di  $b$  ottenuti con i due metodi applicati e delle relative incertezze, è possibile concludere che il  $b$ -value è costantemente prossimo all'unità, sebbene una leggera diminuzione di esso sembra caratterizzare il 2018. Questa tendenza potrebbe essere collegata a un aumento dello stato di *stress* locale rispetto a quello che ha contraddistinto il Monte Etna negli altri anni esaminati.





**Figura 9** Confronto tra il logaritmo del numero cumulativo di eventi in funzione della magnitudo locale relativo agli anni 2017, 2018, 2019 e 2020 (linee continue). 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 basso a sinistra).  $N_{eve}$  indica il numero totale di eventi che compongono i singoli set di dati. ML si riferisce al metodo della massima verosimiglianza (si veda il testo per maggiori dettagli).

**Figure 9** Comparison of logarithm of cumulative number of events as a function of local magnitude ( $M_L$ ) for the years from 2017 to 2020 (solid lines). Dashed lines are the lines of best-fit obtained using least-squared method (LS) through the data points (Gutenberg-Richter distribution) relative to each single year. The inset table in the lower left 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 that make up the individual data sets.

## 4. Sequenze sismiche

Come precedentemente anticipato, l'incremento del tasso di sismicità è stato osservato soprattutto in concomitanza del verificarsi delle sequenze sismiche che sono state registrate nell'area etnea nel corso del 2020. Complessivamente sono state individuate 11 sequenze (Tabella 2, Figure 6 e 10), ossia addensamenti spazio-temporali di terremoti, le cui durate temporali non sono state superiori ai due giorni.

Il criterio adottato per la definizione di una sequenza sismica si ispira all'algoritmo di *declustering* di Reasenber [Reasenber, 1985], algoritmo che analizza spazialmente e temporalmente gli eventi sismici, e calcola sia il tempo che separa un evento da un altro sia la loro distanza spaziale. Se gli eventi avvengono entro un prefissato intervallo di tempo e in un'area definita, allora si può ipotizzare che essi appartengano ad uno stesso *cluster* o a una stessa sequenza sismica, a prescindere dalla presenza di un eventuale *mainshock* al suo interno. Ricordiamo infatti che, in linea generale, una sequenza sismica può essere data da un *mainshock* e da una serie di *aftershocks*, o costituire invece uno sciame sismico, cioè una sequenza formata da molti terremoti di diversa magnitudo distribuiti irregolarmente nel tempo senza che vi sia un terremoto con magnitudo predominante [Utsu, 2002]. Si tratta ovviamente di un modo riduttivo di definire le sequenze sismiche, poiché in un'area come quella etnea, spesso esse mostrano caratteristiche tali da impedirne la classificazione in questa o in quella categoria. Questo è, ad esempio, il caso della definizione di un evento quale *mainshock* di una sequenza sismica, e della differenza in termini di magnitudo che quest'ultimo debba possedere per essere definito tale, rispetto a quello degli eventi che compongono l'intera sequenza. E lo stesso si può dire rispetto all'intervallo temporale entro il quale gli eventi sismici debbano verificarsi per essere inseriti all'interno della stessa sequenza sismica o sciame (ore o giorni).

ID	n° ev.	Inizio	Fine	M <sub>L</sub> max	Area epicentrale
1	11	22/03/2020 10.10.09	22/03/2020 14.07.09	3.4	1.6 km SW from Monte Scorsone (CT)
2	6	17/05/2020 17.47.22	17/05/2020 22.45.19	2.2	0.8 km SW from Monte Scorsone (CT)
3	5	27/05/2020 18.44.11	27/05/2020 22.32.44	3.1	7.0 km SW from Bronte (CT)
4	7	26/07/2020 08.22.47	26/07/2020 08.52.27	3.0	1.9 km N from Monte Centenari (CT)
5	9	23/09/2020 10.36.59	24/09/2020 05.13.56	2.9	1.0 km E from Crateri Centrali (CT)
6	9	27/09/2020 16.22.14	27/09/2020 22.06.32	3.2	3.4 km NW from Vena (CT)
7	9	06/10/2020 15.18.43	07/10/2020 16.01.32	2.9	1.1 km E from Crateri Centrali (CT)
8	23	05/11/2020 08.36.49	06/11/2020 01.52.18	3.2	1.7 km SE from Pizzi Deneri (CT)
9	5	06/11/2020 01.38.41	06/11/2020 06.18.34	2.3	1.7 km S from Monte Palestra (CT)
10	8	12/12/2020 12.59.53	13/12/2020 03.15.49	2.6	1.8 km S from Monte Palestra (CT)
11	27	31/12/2020 19.59.47	01/01/2021 02.43.18	3.7	1.1 km S from Monte Denza (CT)

**Tabella 2** Elenco delle sequenze sismiche registrate nell'area etnea durante il 2020. La tabella riporta il numero della sequenza (ID), il numero dei terremoti associati alla sequenza (n° ev.), il tempo origine del primo (Inizio) e dell'ultimo (Fine) evento della sequenza, la magnitudo locale massima (M<sub>L</sub> max) e l'area interessata dalla sequenza (Area epicentrale).

*Table 2* List of the seismic sequences recorded in the Etna area during 2020. The table reports the identification number (ID), the number of earthquakes belonging to the sequence (n° ev.), the origin time of the first and the last events of the sequence, the maximum local magnitude (M<sub>L</sub> max) of each seismic sequence and the toponym of the area struck by the sequence.

In questa analisi, per sequenza sismica si intende un gruppo di eventi, individuato attraverso la procedura di seguito descritta, che prescinde dalla presenza di un *mainshock* all'interno del gruppo stesso. A differenza di quanto previsto dall'algoritmo di Reasenberg [1985], che richiede la definizione di un intervallo temporale di associabilità di un evento in funzione della magnitudo, in questo studio è stata fissata una distanza temporale massima di 12 ore tra due eventi appartenenti alla stessa sequenza a prescindere, quindi, dal valore della magnitudo. Dal punto di vista della distanza spaziale, Reasenberg [1985] introduce il concetto di zona di interazione tra due eventi la cui estensione dipende dalle dimensioni delle sorgenti, supposte circolari secondo il modello di Kanamori e Anderson [1975]. Secondo tale approccio, dati quindi due eventi di magnitudo M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>, le cui faglie circolari equivalenti hanno raggi r<sub>1</sub> e r<sub>2</sub>, essi saranno associati allo stesso cluster se la distanza tra i loro ipocentri è inferiore alla somma dei rispettivi raggi. In accordo con Reasenberg [1985], la relazione che lega il raggio alla magnitudo è:

$$r = aM^b \quad (3)$$

con *a* e *b* pari a 0.03 e 3.64, rispettivamente, ottenuta considerando la relazione M<sub>0</sub>-M di Bakun [1984].

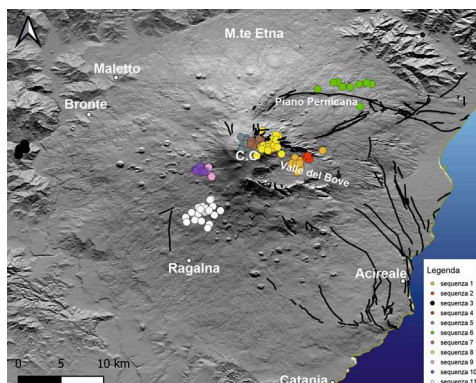
Nella Tabella 3 vengono riportate le distanze calcolate attraverso la (3) per coppie di eventi con magnitudo nell'intervallo tra 1.0 ≤ M<sub>L</sub> ≤ 5.0.

	1	2	3	4	5
1	0.1	0.4	1.7	4.7	10.6
2	0.4	8.0	2.0	5.0	11.0
3	1.7	2.0	3.3	1.0	12.2
4	4.7	5.1	6.4	9.4	15.3
5	10.6	11.0	12.2	15.3	21.2

**Tabella 3** Distanze massime, espresse in km, tra coppie di eventi con magnitudo comprese tra 1.0 e 5.0.

**Table 3** Maximum distances, in km, between pairs of seismic events with magnitude in the range 1.0 and 5.0.

Come precedentemente detto, durante il 2020 sono state individuate complessivamente 11 sequenze sismiche (Tabella 2 e Figura 10), le cui durate temporali non sono state superiori ai due giorni, e che hanno coinvolto soprattutto la parte centro-meridionale dell'area vulcanica etnea. Quella di maggiore rilevanza, caratterizzata dal terremoto più energetico dell'intero 2020 ( $M_L = 3.7$ ), è rappresentata da un importante *cluster* di eventi che a partire dal tardo pomeriggio del 31 dicembre, e fino alle primissime ore del giorno successivo, ha coinvolto il versante sud-occidentale del vulcano.



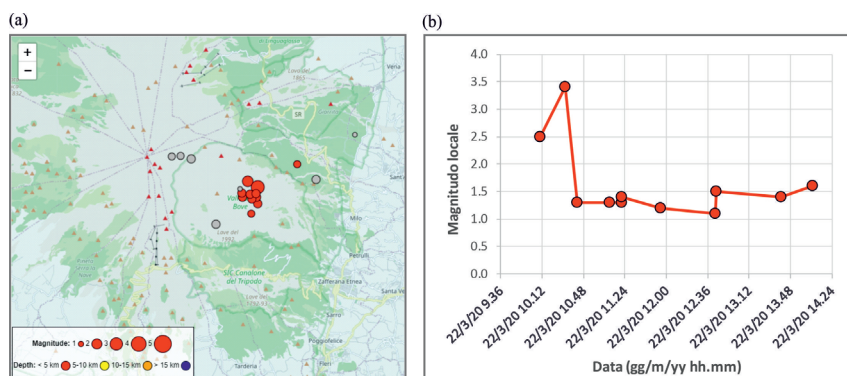
**Figura 10** Mappa epicentrale delle principali sequenze sismiche verificatesi nel corso del 2020. I numeri rappresentano l'ID della sequenza, conformemente a quanto riportato in Tabella 2.

**Figure 10** Epicentral map of the main seismic sequences occurring in 2020. The numbers refer to the ID of the sequence as reported in Table 2.

Sono 3 le sequenze sismiche più significative, ossia quelle costituite da un numero di terremoti maggiore di 10. Vengono di seguito descritte in ordine cronologico e, per ognuna di esse ne vengono fornite le principali caratteristiche in termini di area epicentrale, di data di inizio e di fine (durata), di numero e di localizzazione degli eventi, con la descrizione di quelli più rilevanti.

### ID 1 – Monte Scorione

Tale sequenza ha interessato la parte orientale della Valle del Bove, tra Monte Centenari e Monte Scorione. Iniziata alle ore 10:10 (UTC) del 22 marzo con un evento di  $M_L = 2.5$ , si è esaurita nell'arco di 4 ore. L'intera sequenza è costituita da 11 eventi, su un totale di 22 piccoli terremoti registrati tra la tarda serata del 21 e le primissime ore del 23 marzo (Figura 11a). Le magnitudo degli 11 eventi sono comprese tra 1.1 e 3.4 (Figura 11b). Le profondità ipocentrali sono tutte comprese tra 2.5 e 4.5 km.

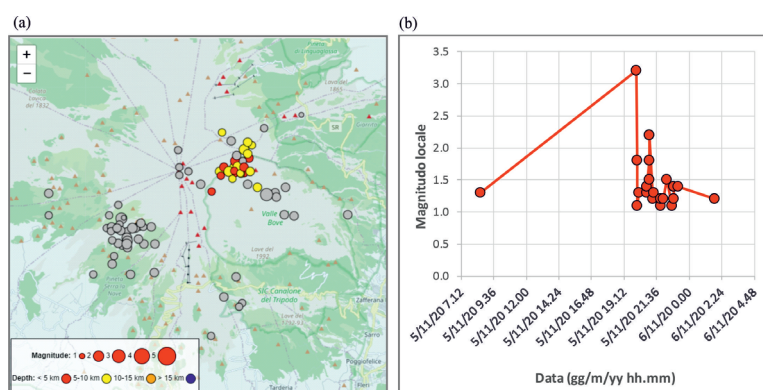


**Figura 11** (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza di Monte Scorzone (ID 1) (cerchi rossi) (i cerchi grigi rappresentano i terremoti con un intertempo compatibile per l'inserimento all'interno della sequenza, ma incompatibili in termini di distanza) e (b) distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

**Figure 11** (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Mount Scorzone's seismic sequence (ID 1) (red circles) (grey circles represent the earthquakes out of sequence since characterised by a not consistent inter-sequence distance) and (b) distribution of their local magnitude vs time.

### ID 8 – Pizzi Deneri

La sequenza sismica in oggetto ha interessato un volume sismogenetico posto nel settore nord-orientale del vulcano, pochi chilometri a SE di Pizzi Deneri. Sono 23 gli eventi localizzati ad essa ascrivibili, su un totale di circa un'ottantina di scosse avvenute a partire dalle 08:36 (UTC) del 5 novembre (Figura 12a). La magnitudo locale degli eventi è compresa tra 1.1 e 3.2 (Figura 12b), e sono solo tre gli eventi che hanno superato il valore di  $M_L = 2$ . La scossa più energetica, registrata alle 20:08 (UTC) del 5 novembre a una profondità ipocentrale di 5.1 km, è localizzata a circa 2.0 km a SE di Pizzi Deneri. Le profondità focali coinvolte in questa sequenza sono tutte comprese tra 3.5 e 7.5 km.



**Figura 12** (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti alla sequenza di Pizzi Deneri (ID 8) (cerchi rossi e gialli) (i cerchi grigi rappresentano i terremoti con un intertempo compatibile per l'inserimento all'interno della sequenza, ma incompatibili in termini di distanza) e (b) distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

**Figure 12** (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Pizzi Deneri's seismic sequence (ID 8) (red and yellow circles) (grey circles represent the earthquakes out of sequence since characterised by a not consistent inter-sequence distance) and (b) distribution of their local magnitude vs time.

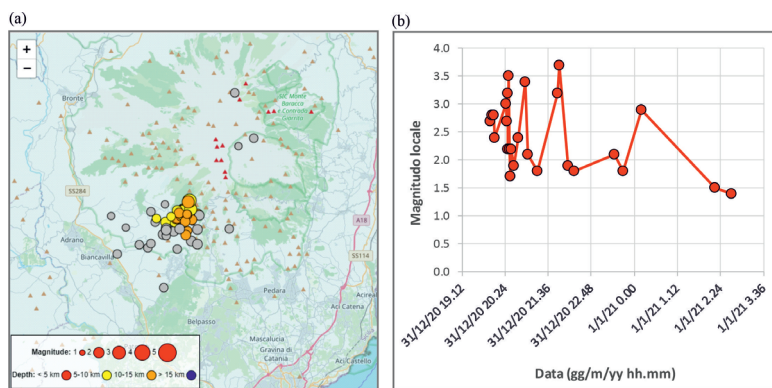
## ID 11 – Monte Denza

Si tratta della sequenza sismica con il maggior numero di eventi registrati nel 2020 ed è rappresentata da uno sciame, che a partire dal tardo pomeriggio del 31 dicembre e fino alle primissime ore del giorno successivo, ha coinvolto il versante sud-occidentale del vulcano (Figura 13a).

In particolare, tra le 08:00 (UTC) circa del 31 dicembre e le 15:00 (UTC) del giorno successivo, sono stati registrati 65 eventi sismici. Secondo i criteri precedentemente descritti, alla stessa sequenza sono risultati appartenere solo 27 eventi, il primo dei quali registrato alle 19:59 (UTC) del 31 dicembre. Sono stati 18 gli eventi con magnitudo maggiore di 2.0, di cui 6 terremoti con  $M_L \geq 3.0$  (Figura 13b). Gli epicentri degli eventi appartenenti allo sciame ricadono in un'area orientata prevalentemente in direzione NE-SO, tra il Monte Denza e il Monte Parmentelli.

L'evento di magnitudo maggiore ( $M_L = 3.7$ ), registrato alle 21:54 (UTC) del 31 dicembre, è stato localizzato a circa 1 km a sud di Monte Denza, ad una profondità approssimativa di 10 km. A tale riguardo, l'intero sciame coinvolge volumi crostali confinati in un intervallo di profondità complessivamente compreso tra i 9 e i 13 km.

Nei due giorni successivi alla fine dello sciame, ossia il 2 e il 3 gennaio 2021, nella stessa area epicentrale sono stati registrati altri tre terremoti di  $M_L$  compresa tra 2.0 e 2.6, le cui profondità focali si collocano ancora tra i 9 e gli 11 km.



**Figura 13** (a) Mappa epicentrale degli eventi appartenenti allo sciame di Monte Denza (ID 11) (cerchi gialli e arancioni) (i cerchi grigi rappresentano i terremoti con un intertempo compatibile per l'inserimento all'interno della sequenza, ma incompatibili in termini di distanza) e (b) distribuzione dei relativi valori di magnitudo in funzione del tempo.

**Figure 13** (a) Epicentral map of seismic events belonging to the Mount Denza's seismic swarm (ID 11) (yellow and orange circles) (grey circles represent the earthquakes out of sequence since characterised by a not consistent inter-sequence distance) and (b) distribution of their local magnitude vs time.

## 5. Meccanismi focali

Come già detto, tra le operazioni che il Gruppo di Lavoro svolge di routine vi è il calcolo dei meccanismi focali attraverso il metodo delle polarità dei primi arrivi (fasi P). Il programma utilizzato per ricavare tali soluzioni focali è FPFIT di Reasenberg e Oppenheimer [1985].

In questo paragrafo vengono presentati e discussi solo i meccanismi focali, degli eventi con  $M_L \geq 2.5$ , che soddisfino i seguenti criteri:

- siano caratterizzati da un'unica soluzione focale;
- abbiano un gap azimutale non superiore ai 90°;
- presentino un numero di discrepanze, tra polarità osservate e calcolate, inferiore al 20% rispetto al numero totale di polarità.

Solo 23 eventi soddisfano i criteri sopra citati (Tabella 4).

È importante sottolineare che una buona parte di questi 23 meccanismi appartiene alla sequenza del 31 dicembre 2020 (Tabella 4), e che eccetto l'evento del 28 ottobre alle 03:53 UTC (ID 5230 in Tabella 4) tutti i meccanismi focali dei terremoti con  $M_L \geq 3.0$  fanno parte di una delle 11 sequenze sismiche individuate nel corso del 2020.

Osservando la Figura 14 si può notare che i meccanismi focali degli eventi selezionati presentano soluzioni cinematiche principalmente trascorrenti, in accordo con quelle che tipicamente caratterizzano l'area etnea e coerentemente con l'assetto strutturale della stessa [e.g., Scarfi et al., 2013; Barberi et al., 2016]. Movimenti trascorrenti sinistri sono fondamentalmente ipotizzati lungo i piani orientati NW-SE per gli eventi localizzati nel medio-alto versante sud-occidentale del vulcano, in prossimità dei Crateri Centrali e lungo il margine settentrionale della Valle del Bove. Viceversa, movimenti con trascorrenza destra, associati ancora a piani orientati in direzione circa NW-SE, sembrano caratterizzare il cluster di eventi a nord di Ragalna nel settore sud-occidentale dell'area vulcanica.

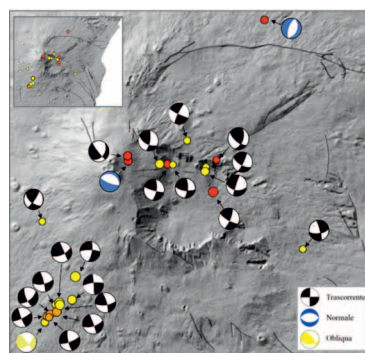
Per l'evento localizzato a circa 2.5 km a NE da Piano Pernicana – Provenzana (ID 5760 in Tabella 4), appartenente alla sequenza del 27 settembre (ID 6 in Tabella 2), il meccanismo focale mette in evidenza un movimento normale su un piano orientato all'incirca NS. Una cinematica di tipo distensivo contraddistingue anche l'evento più energetico (ID 5746 in Tabella 4) della sequenza di eventi superficiali che il 23 settembre (ID 5 in Tabella 2) ha interessato l'area a circa 1 km a E dei Crateri Centrali, cinematica che sembra essere confermata anche dal secondo evento più energetico della sequenza ( $M_L = 1.8$ ) che ha preceduto di circa 4 ore (18:34 UTC) l'evento più energetico appena descritto.

ID	Tempo origine (gg/mm/yyyy hh:mm:ss)	Lat (°)	Long (°)	Prof. (km)	Gap	$M_L$	NI	Npol	Ndis	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Azimuth / Plunge (°)		Toponimo
													Asse P	Asse T	
5397	25/01/2020 11:19:15	37,7491	15,0552	5,71	37	2,5	38	20	0	120	65	10	75 / 11	340 / 24	1.2 km W from Monte Scorsonne (CT)
5371	22/03/2020 10:32:12	37,7369	15,0584	3,78	56	3,4	22	16	3	120	70	20	72 / 1	341 / 28	1.6 km SW from Monte Scorsonne (CT)
6135	17/07/2020 19:33:46	37,7628	15,0443	5,24	36	2,6	35	26	3	115	80	-10	71 / 14	341 / 0	1.4 km W from Rifugio Citelli (CT)
7085	26/07/2020 08:22:47	37,7519	15,0309	4,15	38	2,9	28	20	1	105	80	30	234 / 13	331 / 28	1.9 km N from Monte Centenari (CT)
5746	23/09/2020 22:24:21	37,7546	15,0068	0,00	40	2,9	22	16	1	110	70	-90	20 / 65	200 / 25	1.0 km E from Crateri Centrali (CT)
5760	27/09/2020 18:51:59	37,8190	15,0973	-1,57	55	2,7	22	12	2	20	30	-90	110 / 75	290 / 15	2.6 km NE from Piano Pernicana (CT)
5263	07/10/2020 07:01:34	37,7573	15,0065	0,74	42	2,9	32	19	2	35	30	-20	23 / 47	255 / 29	1.1 km E from Crateri Centrali (CT)
5230	28/10/2020 03:53:17	37,7470	15,0544	5,12	38	3,0	31	25	1	100	40	-10	73 / 38	318 / 28	1.3 km W from Monte Scorsonne (CT)
6451	31/10/2020 20:19:10	37,7512	15,0344	6,48	39	2,5	33	16	1	100	70	20	52 / 1	321 / 28	1.8 km N from Monte Centenari (CT)
6437	05/11/2020 20:08:11	37,7521	15,0260	5,10	37	3,2	42	22	0	120	50	30	69 / 11	327 / 46	1.7 km SE from Pizzi Deneri (CT)
5176	21/11/2020 13:55:26	37,7061	15,1121	5,82	77	2,5	29	17	1	80	65	-170	300 / 24	35 / 11	1.7 km NE from Zafferana Etnea (CT)
5211	24/11/2020 19:46:28	37,7524	15,0618	4,67	50	2,5	24	14	2	20	55	150	252 / 7	348 / 44	0.8 km NW from Monte Scorsonne (CT)

6721	12/12/2020 16:22:24	37,7278	14,9510	6,65	59	2,5	23	13	0	130	60	10	86 / 14	348 / 27	1.9 km S from Monte Palestra (CT)
5909	31/12/2020 19:59:47	37,6869	14,9557	9,57	47	2,7	25	22	0	80	60	10	36 / 14	298 / 27	1.3 km NW from M. Parmentelli (CT)
5915	31/12/2020 20:02:08	37,6786	14,9487	9,50	62	2,8	21	20	3	320	90	140	13 / 27	267 / 27	1.8 km W from M. Parmentelli (CT)
5912	31/12/2020 20:05:45	37,6813	14,9502	10,75	57	2,8	26	19	2	65	75	-10	22 / 18	291 / 4	1.6 km W from M. Parmentelli (CT)
5911	31/12/2020 20:25:51	37,6823	14,9520	10,54	55	3,0	25	16	1	50	55	-30	18 / 44	282 / 7	1.5 km W from M. Parmentelli (CT)
6282	31/12/2020 20:27:11	37,6810	14,9513	11,01	57	2,7	21	11	0	70	70	-20	29 / 28	298 / 1	1.5 km W from M. Parmentelli (CT)
5908	31/12/2020 20:28:02	37,6834	14,9562	10,79	51	3,2	39	25	1	340	85	150	30 / 17	292 / 24	1.2 km W from M. Parmentelli (CT)
5905	31/12/2020 20:30:52	37,6875	14,9583	9,64	46	3,5	27	21	0	335	90	150	24 / 21	286 / 21	1.2 km NW from M. Parmentelli (CT)
5160	31/12/2020 20:58:10	37,6866	14,9586	9,63	46	3,4	24	22	1	345	75	150	37 / 9	301 / 32	1.1 km NW from M. Parmentelli (CT)
5910	31/12/2020 21:51:23	37,6887	14,9662	9,91	43	3,2	27	24	1	355	85	-160	221 / 18	127 / 10	0.9 km N from M. Parmentelli (CT)
7171	31/12/2020 21:54:40	37,6958	14,9640	9,89	41	3,7	46	31	2	65	10	-160	229 / 31	322 / 5	1.1 km S from M. Denza (CT)

**Tabella 4** Coordinate ipocentrali e parametri geometrici del modello di faglia determinati attraverso il codice FPFIT per gli eventi di  $M_L \geq 2.5$  selezionati (si rimanda al testo per maggiori dettagli). Nell'ordine vengono riportati: tempo origine (UTC), latitudine, longitudine, profondità, *gap* azimutale, magnitudo locale, numero di letture (NI), numero di polarità (Npol), numero di discrepanze (Ndis), *strike*, *dip* e *rake* dei primi piani nodali, *azimut* e *plunge* degli assi P e T.

**Table 4** Hypocentral coordinates and geometry parameters of fault planes obtained through the FPFIT algorithm for the selected seismic events with local magnitude  $M_L \geq 2.5$  (see the text for major details). Origin time (UTC), latitude, longitude, focal depth, azimuthal gap, local magnitude, number of onsets P, number of polarities, number of discrepant observations, *strike*, *dip* and *rake* of the first nodal plane, azimuth and plunge of P and Taxes.



**Figura 14** Mappa dei meccanismi focali dei terremoti con  $M_L \geq 2.5$  verificatisi nel 2020, elencati in Tabella 4 (vedere il testo per maggiori dettagli).

**Figure 14** Map of focal mechanisms of earthquakes with  $M_L \geq 2.5$  occurred in 2020 and listed in Table 4 (see the text for major details).

## 6. Note conclusive

La Rete Sismica Permanente dell'Osservatorio Etneo, nell'area vulcanica del Monte Etna, è caratterizzata da un'elevata capacità di "detection" dei microterremoti e per questo consente di compilare cataloghi molto dettagliati della sismicità strumentale dell'area vulcanica stessa. È possibile localizzare accuratamente centinaia di microterremoti, anche di magnitudo negativa, generalmente non identificati dalla Rete Sismica Nazionale (RSN) – INGV. Le importanti capacità di rilevamento di questa rete locale, dovute anche all'elevata sensibilità della strumentazione utilizzata, permettono l'identificazione dei microterremoti locali attraverso una efficace procedura che consente di abbassare la soglia di magnitudo di completezza che, come ben noto, è uno degli elementi fondamentali per il calcolo della pericolosità sismica di un'area.

L'attività sismica descritta in questo lavoro è quella collegata agli eventi vulcano-tettonici etnei, la cui genesi è dovuta all'azione combinata di stress tettonici, che agiscono a scala regionale e/o locale, associata alla migrazione di magma attraverso i diversi livelli crostali dell'edificio vulcanico [Sicali et al., 2014].

Con un numero di poco inferiore a 2300 eventi localizzati, l'attività sismica che ha caratterizzato il 2020 può sicuramente considerarsi non trascurabile, sebbene, se confrontata con quella dei due anni precedenti, suggerisce un certo ridimensionamento sia in termini di numero di eventi (Figura 9) sia in termini di energia da essi rilasciata (Figura 7). I maggiori rilasci sono avvenuti in concomitanza del verificarsi di sequenze sismiche (in totale 11) che hanno interessato l'area dei crateri sommitali, il versante settentrionale (in prossimità di Piano Provenzana – Pernicana) e il medio-alto versante sud-occidentale del vulcano.

Nel periodo di riferimento la sismicità risulta distribuita maggiormente in corrispondenza dei versanti orientale e meridionale del vulcano e, in misura nettamente inferiore, in corrispondenza del versante occidentale, interessato per lo più da sismicità profonda. In particolare, i rilasci di energia sismica hanno interessato in larghissima parte i livelli crostali più superficiali, ossia i primi 10 km, con un coinvolgimento maggiore della porzione crostale al di sopra dei 6 km.

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  $1.2 \pm 0.01$  ed un  $b$ -value per l'intera area vulcanica solo di poco superiore all'unità ( $1.2 \pm 0.04$ ), valore che tipicamente contraddistingue la maggior parte delle zone sismicamente attive e rispetto al quale si identificano le aree a livello di stress più alto ( $b$ -value  $< 1$ ) o più basso ( $b$ -value  $> 1$ ). I valori di  $M_c$  e del coefficiente  $b$  della G-R non mostrano sostanziali differenze quando confrontati con quelli che scaturiscono dall'analisi statistica dei dati relativi ai cataloghi del 2017 e del 2019. Solo una leggera differenza sembra emergere se si considera il set di dati riportati nel catalogo del 2018, con una tendenza del  $b$ -value ad attestarsi su valori inferiori all'unità e una magnitudo di completezza pari a  $1.1 \pm 0.02$ . Infine, i meccanismi focali dei terremoti più energetici ( $M_L$  compresa tra 2.5 e 3.7) registrati nel 2020 suggeriscono soluzioni cinematiche principalmente trascorrenti 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].

## Ringraziamenti

Il Gruppo 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 particolare viene rivolto a Marco Aliotta autore del software *SeismPicker* e di altri applicativi fondamentali per lo svolgimento del lavoro del Gruppo.



## Bibliografia

- 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, Anno 2014-Numero 25, 15. (Poster).
- 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.
- 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 Patanè D., (2016). *Seismic and volcanic activity during 2014 in the region involved by TOMO-ETNA seismic active experiment*. Ann. Geophys. [Internet]. 2016Sep.30 [cited 2021Nov.15];59(4): S0429. <https://www.annalsofgeophysics.eu/index.php/annals/article/view/7082>
- Barberi G., Ferrari F., Maiolino V., Mostaccio A., Scaltrito A., Sciotto M., Tusa G., Tuvè T., and Ursino A., (2020). *Mt. Etna Revised Seismic Catalog from 2020 (EtnaRSC2020) (Version 1) [Data set]*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), <https://doi.org/10.13127/etnasc/etnarsc2020>
- Bakun W. H., (1984). *Magnitudes and moments of duration*. Bull. Seism. Soc. Am. 74, no. 6, 2335–2356.
- 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.
- Gutenberg B., and Richter C.F., (1944). *Frequency of earthquakes in California*. Bull. Seismol. Soc. Am., 34, 185–188.
- 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., (1999). *HYPOELLIPSE: a computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude, and first-motion pattern*. U.S. Geological Survey Open-File Report 99–23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023>
- 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., Privitera E., Ferrucci F., and Gresta S., (1994). *Seismic activity leading to the 1991-1993 eruption of Mt. Etna and its tectonic implications*. Acta Vulcanologica, 4, 47-55.
- 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.
- Richter C.F., (1958). *Elementary Seismology*. W.H. Freeman, San Francisco, 768.
- Scarfi L., Cassisi C., and Messina 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/SCFOCMEC><https://doi.org/10.13127/ETNASC/SCFOCMEC>
- Schorlemmer D., and Wiemer, S., (2005). *Microseismicity data forecast rupture area*. Nature, 434 (7037) (2005), p. 1086, <https://doi.org/10.1038/4341086a>

- 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.*, 13, 99 - 103.
- Utsu T., (2002). *Statistical features of seismicity*. In *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, eds W. H. Lee, P. Jennings, C. Kisslinger, and H. Kanamori (San Diego, CA: Academic Press), 719-732.
- 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/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/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/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html](http://istituto.ingv.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

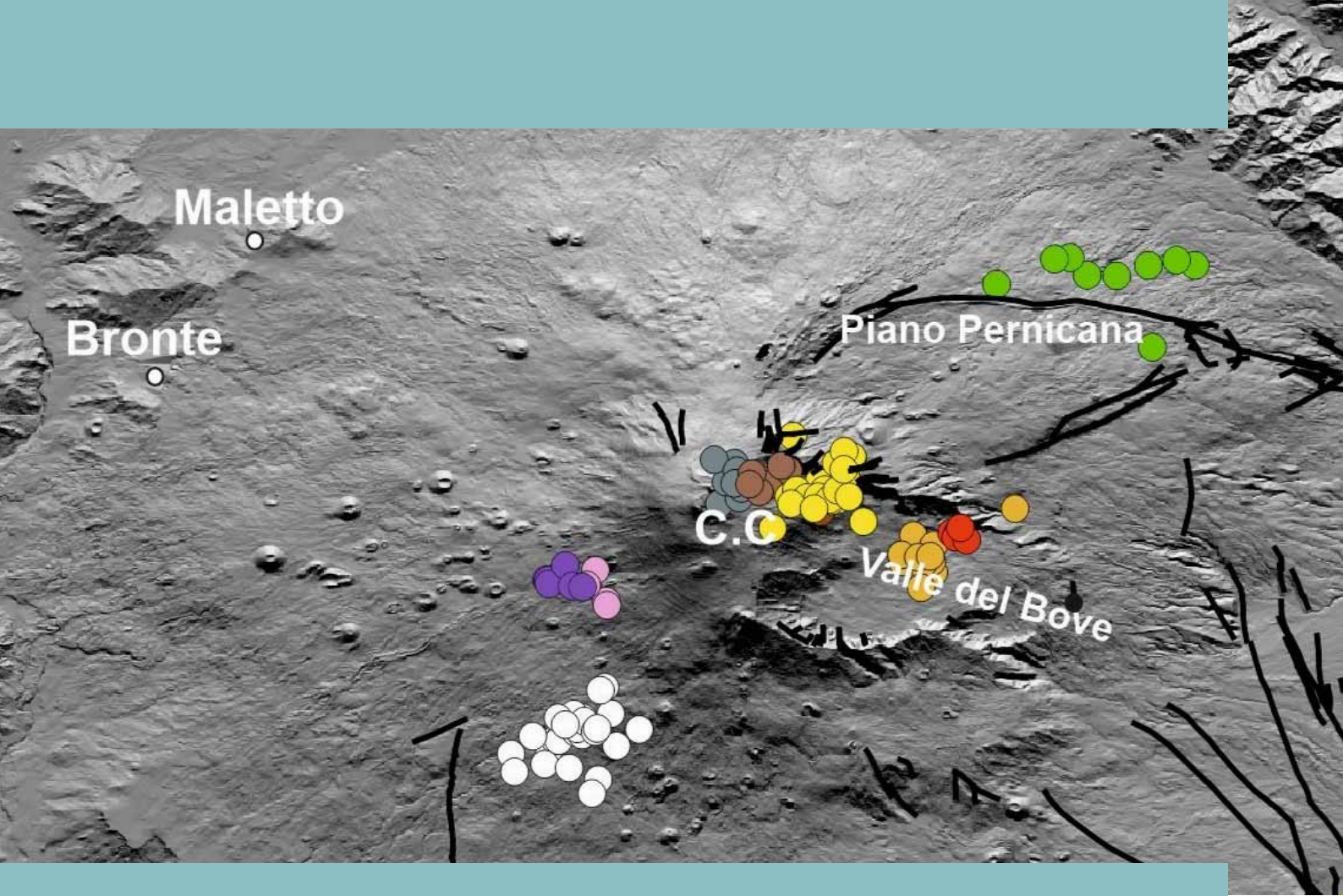
©2022

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

[www.ingv.it](http://www.ingv.it)



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

M.te Etna