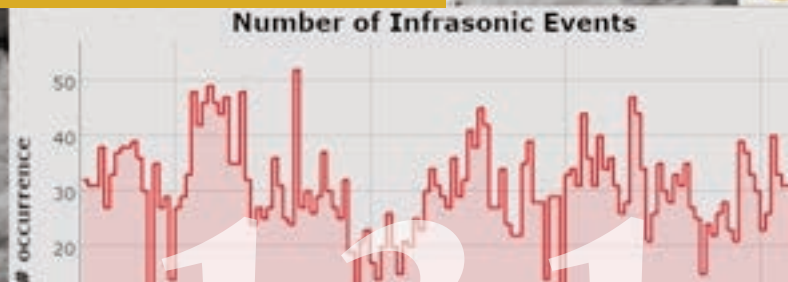


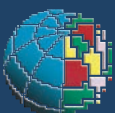
Sistema di elaborazione automatica dei segnali infrasonici al Monte Etna

Quaderni di Geofisica

st 30 infrasonic events



131



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Stefano GRESTA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (INGV - RM1)

Raffaele AZZARO (INGV-CT)

Mario CASTELLANO (INGV-NA)

Viviana CASTELLI (INGV-BO)

Rosa Anna CORSARO (INGV-CT)

Mauro DI VITO (INGV-NA)

Antonio GUARNIERI (INGV-BO)

Marcello LIOTTA (INGV-PA)

Mario MATTIA (INGV-CT)

Milena MORETTI (INGV-CNT)

Nicola PAGLIUCA (INGV-RM1)

Umberto SCIACCA (INGV-RM2)

Alessandro SETTIMI (INGV-RM2)

Salvatore STRAMONDO (INGV-CNT)

Andrea TERTULLIANI (INGV-RM1)

Aldo WINKLER (INGV-RM2)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860068

redazionecen@ingv.it

in collaborazione con:

Barbara Angioni (RM1)

Sistema di elaborazione automatica dei segnali infrasonici al Monte Etna

Processing automatic system of infrasonic signals at Mt. Etna

Andrea Cannata, Eugenio Privitera, Mariangela Sciotto, Luciano Scuderi, Marco Aliotta, Carmelo Cassisi, Placido Montalto, Salvatore Rapisarda

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

Sistema di elaborazione automatica dei segnali infrasonici al Monte Etna

Il monitoraggio infrasonico dei vulcani è diventato uno degli strumenti più efficaci per caratterizzare l'attività vulcanica. Nel 2006 è stata installata al Monte Etna la rete permanente infrasonica gestita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo-Sezione di Catania (INGV-OE), costituita oggi da 10 stazioni. Per elaborare i segnali registrati da queste stazioni, è stato sviluppato un sistema automatico costituito da 4 software che permettono di eseguire la rilevazione, la caratterizzazione in termini di ampiezze e contenuto spettrale, e la localizzazione degli eventi infrasonici e del tremore infrasonico prodotti dal vulcano. I risultati delle elaborazioni sono scritti in file ASCII formattati in colonne, e le informazioni in essi riportate sono poi caricate in automatico e in near real-time nel database di sezione dell'INGV-OE tramite software implementati appositamente. Le informazioni prodotte da tale sistema automatico sono disponibili in near real-time al personale di turno nella Sala Operativa dell'INGV-OE, dove i dati sulla posizione delle sorgenti infrasoniche e sul tasso di occorrenza degli eventi sono sempre visibili, contribuendo così alla sorveglianza. Inoltre, tali dati sono usati per fornire informazioni aggiuntive sullo stato di attività dell'Etna per scopi di monitoraggio interni all'INGV o per procurare dati addizionali agli organi di Protezione Civile.

In the last 10 years, the infrasonic monitoring has become one of the most effective tool to characterize the volcano activity. In 2006, the infrasonic permanent network, run by Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo-Sezione di Catania (INGV-OE), was installed at Mt. Etna. Today, this network is made up of 10 stations. In order to process the data recorded by these stations, an automatic system, composed of 4 software, has been developed, allowing to detect, characterize in terms of amplitude and spectral content, and locate infrasonic events and tremor generated by the volcano. The processing results are stored in ASCII files, and successively the information written in them are imported in the INGV-OE database by software loader, specifically developed. The information provided by this automatic system are available in near real-time to the people on duty in the control room, where the data regarding infrasonic source locations and occurrence rate of infrasonic events are always visible. Moreover, such data are used to give further data on the volcano state of health for INGV-OE internal monitoring purposes or to provide additional information to the Civil Protection.

Introduzione

Il monitoraggio infrasonico dei vulcani è diventato uno degli strumenti più efficaci per caratterizzare l'attività vulcanica. Vengono generalmente distinti due differenti approcci per il monitoraggio dei vulcani tramite infrasuono: da remoto e locale. Il primo approccio, che permette di effettuare la rilevazione dell'attività e conoscere la posizione approssimativa del vulcano attivo, fa uso di *array* distanti centinaia-migliaia di km [e.g., Matoza et al., 2011]. Il secondo approccio invece utilizza reti locali installate sul vulcano da monitorare, e permette di caratterizzare l'attività in corso (e.g., degassamento attivo, attività stromboliana, fontana di lava), e di localizzare accuratamente i crateri attivi da un punto di vista infrasonico [e.g., Cannata et al., 2013].

Nel 2006 è stata installata al Monte Etna la rete permanente

infrasonica gestita dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo-Sezione di Catania (INGV-OE; Fig. 1). Tale rete ha permesso di evidenziare come i segnali infrasonici di origine vulcanica al Monte Etna siano prevalentemente transienti (chiamati "eventi infrasonici"), caratterizzati da durata variabile da meno di 1 s ad oltre 30 s, inizi impulsivi in compressione e contenuto spettrale nel range 0.3-6.0 Hz [e.g. Cannata et al., 2009a,b; Sciotto et al., 2011, 2013; Spina et al., 2015]. Esempi di forme d'onda di eventi infrasonici generati dal Nuovo Cratere di Sud-Est (NSEC), dal Cratere di Nord-Est (NEC) e dalla Bocca Nuova (BN) sono riportati in Fig. 2. Un'altra tipologia di segnale infrasonico a volte registrato al Monte Etna è il tremore infrasonico, un segnale continuo, della durata di minuti-giorni, associato a fenomeni di degassamento o di attività parossistica (alcuni esempi di forme d'onda sono riportati in Fig. 3).

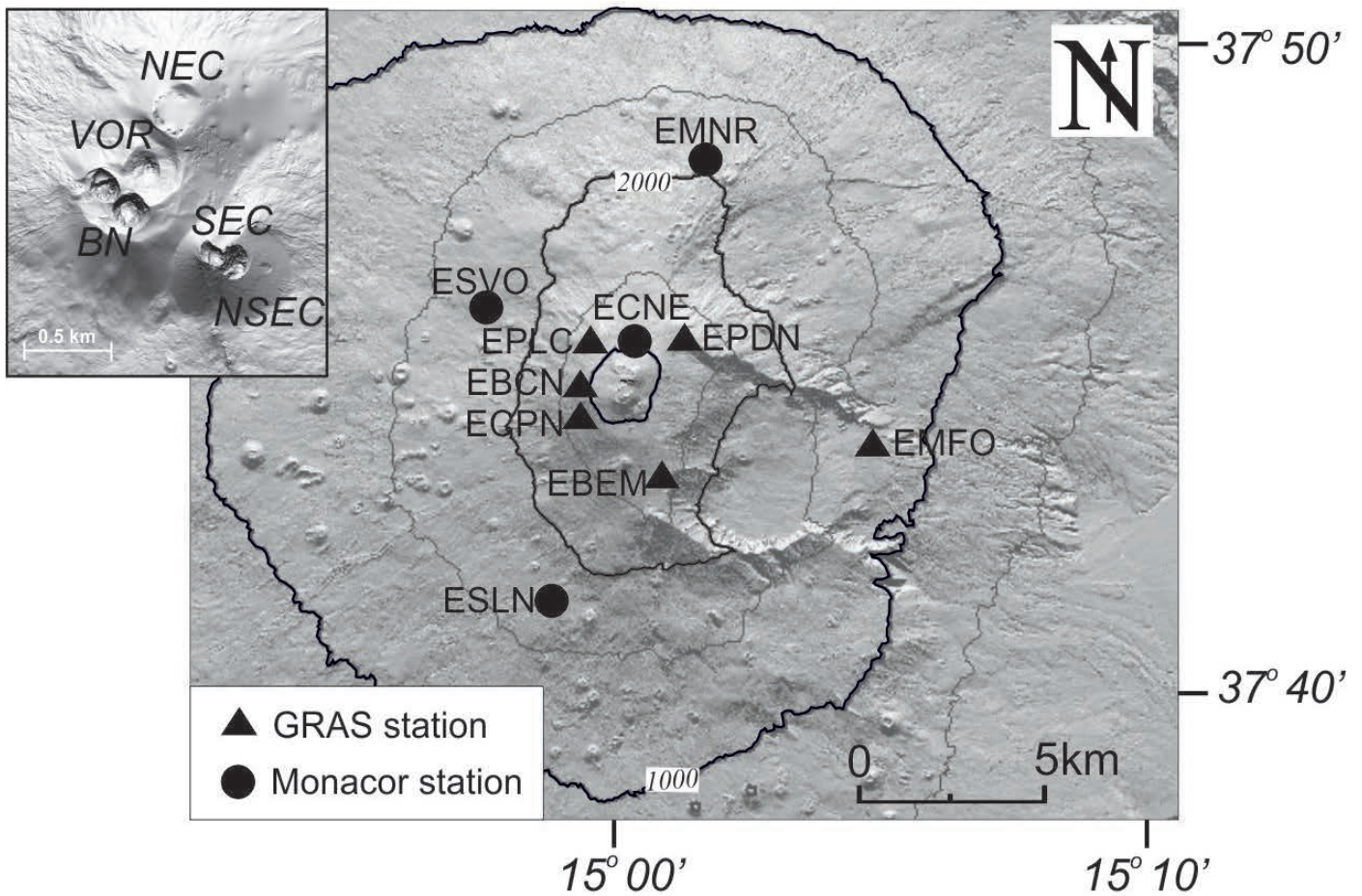


Figura 1 Modello digitale del suolo del Monte Etna, con la posizione delle stazioni appartenenti alla rete infrasonica permanente gestita dall'INGV-OE. Il riquadro in alto a sinistra mostra la disposizione dei 5 crateri sommitali (Cratere di Nord-Est: NEC; Voragine: VOR; Bocca Nuova: BN; Cratere di Sud-Est: SEC; Nuovo Cratere di Sud-Est: NSEC).

Figure 1 Digital elevation model of Mt. Etna, with the location of the stations belonging to the infrasonic permanent network, run by INGV-OE. The inset in the upper left corner shows the distribution of the 5 summit craters (Cratere di Nord-Est: NEC; Voragine: VOR; Bocca Nuova: BN; Cratere di Sud-Est: SEC; Nuovo Cratere di Sud-Est: NSEC).

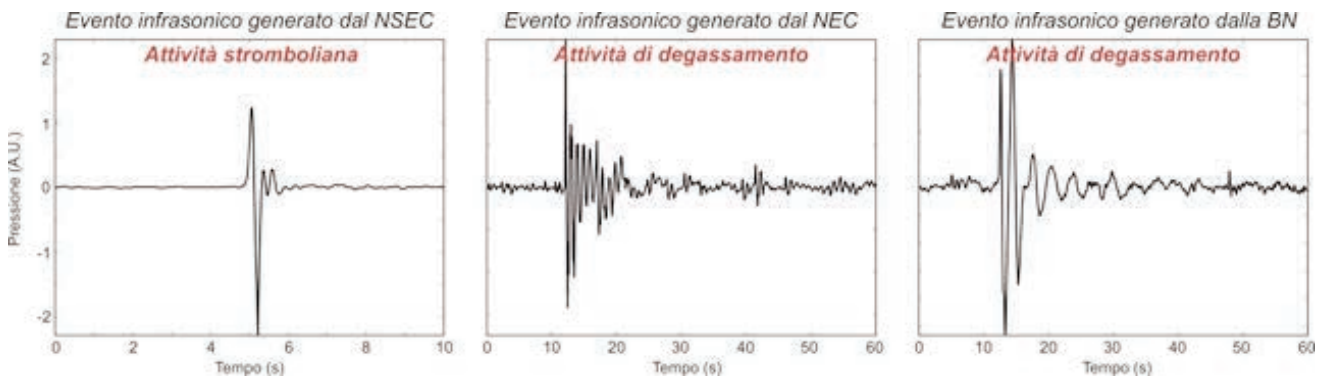


Figura 2 Forme d'onda degli eventi infrasonici generati dal NSEC, NEC e BN. La finestra di segnale mostrata nel plot di sinistra dura 10 secondi, mentre le finestre di segnale negli altri 2 plot durano 60 secondi.

Figure 2 Waveforms of the infrasonic events generated by NSEC, NEC and BN. The signal window shown in the left plot lasts 10 sec, while the other 2 windows 60 sec.

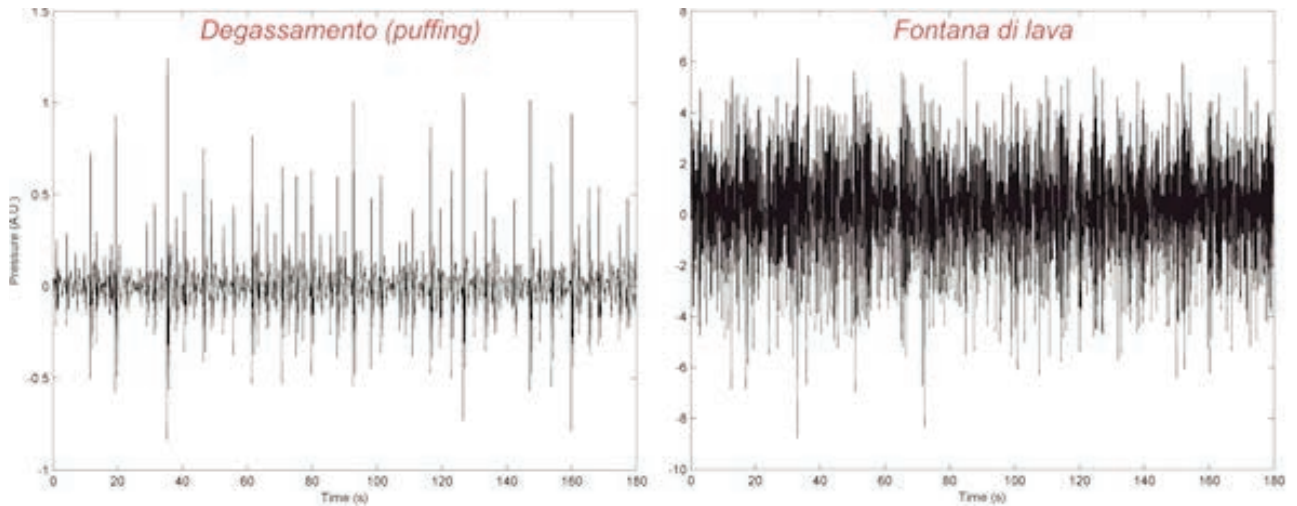


Figura 3 Esempi di finestre di tremore infrasonico registrate il 31 dicembre 2008 (sinistra) e il 4 settembre 2007 (destra), durante attività di degassamento e fontana di lava, rispettivamente.

Figure 3 Examples of infrasonic tremor windows recorded on 31 December 2008 (left) and on 4 September 2007 (right), during degassing and lava fountaining, respectively.

In questo lavoro, è descritto il sistema automatico di elaborazione dei segnali infrasonici registrati al Monte Etna.

1. Rete infrasonica

La rete infrasonica permanente del Monte Etna è oggi composta da 10 stazioni (co-localizzate con le stazioni della rete sismica permanente; Fig. 1), equipaggiate con 2 differenti tipi di microfoni: i) GRAS 40AN con sensitività pari a 50 mV/Pa nel range di frequenza 0.3-20,000 Hz; ii) Monacor MC 2005 con sensitività teorica pari a 80 mV/Pa nel range di frequenza 1-20 Hz.

Lo schema del sistema di elaborazione dei segnali infrasonici, con il relativo sistema di visualizzazione, è rappresentato in Fig. 4.

2. Processing dei segnali infrasonici

Sono stati sviluppati 4 *software* in ambiente Matlab[®], che permettono di eseguire la rilevazione, la caratterizzazione e la localizzazione degli eventi e del tremore infrasonici prodotti dal vulcano. Tali elaborazioni automatiche sono ritardate rispetto al *real-time* di pochi minuti, necessari per chiudere i *file* in formato SUDS (Ward, 1989), dove viene immagazzinato il segnale infrasonico, e per ottenere un *buffer* sufficientemente lungo di segnale. I suddetti *software* sono stati compilati in Matlab[®] mediante l'utilizzo del compilatore LCC il quale fornisce un *file* eseguibile (*file .exe*) al di fuori dell'ambiente Matlab[®]. Questo approccio permette di distribuire il *software* sviluppato senza dover impiegare l'ambiente di svi-

luppo purché nel pacchetto di distribuzione, oltre all'eseguibile dei programmi, sia presente il pacchetto di distribuzione dei moduli di *runtime* di Matlab[®]. Una volta compilati, i moduli realizzati sono installati su PC, sia fisici che virtuali, dove elaborano H24.

I parametri necessari per eseguire il processing sono forniti per mezzo di file di configurazione, che presentano sia input di tipo stringa (e.g., path in cui si trovano i file contenenti i segnali sismici o dove salvare i file con le informazioni riguardanti gli eventi o le finestre di tremore infrasonico individuati, nomi di file contenenti la lista delle stazioni dove eseguire la rilevazione), sia input numerici necessari per la rilevazione degli eventi e la loro localizzazione. Un esempio del file di configurazione del software adibito alla rilevazione e caratterizzazione degli eventi infrasonici è riportato in Fig. 5. Le interfacce dei software sviluppati sono mostrate in Fig. 6. Una volta terminate le elaborazioni, i software scrivono i risultati su file ASCII, simili a quelli riportati in Fig. 7. Nei sottoparagrafi successivi verranno brevemente illustrati gli algoritmi implementati in questi 4 *software*.

2.1 Rilevazione e caratterizzazione degli eventi infrasonici

Tale modulo implementa l'algoritmo STA/LTA (*short time average/long time average*; [Withers et al., 1998]) per la rilevazione degli eventi. Esso viene applicato sui segnali acquisiti da tutte le stazioni infrasoniche in diverse bande di frequenza e le risultanti liste di rilevazione vengono unificate in un'unica lista, prendendo in considerazione il fatto che un singolo evento è registrato da sensori posizionati in punti diversi con differenti tempi di arrivo, compatibili con il diverso tempo di tragitto impiegato dall'onda acustica per

giungere dalla sorgente ai microfoni. È stato osservato come sull'Etna l'attività stromboliana sia accompagnata da un aumento nel numero degli eventi infrasonici. Tuttavia, è da considerare che i segnali infrasonici sono generalmente più rumorosi dei segnali sismici, in quanto più soggetti a sorgenti di *noise* quali il vento, che genera un segnale a larga banda, a volte continuo a volte a transienti, che può nascondere gli eventi. Quindi il numero di rilevazione può essere pesantemente influenzato dalle condizioni meteo. Una volta estratti, gli eventi infrasonici vengono analizzati per ottenere informazioni riguardo alle ampiezze e al

contenuto spettrale. Le ampiezze sono ottenute come valori picco-picco all'interno di finestre di segnale che racchiudono la porzione iniziale degli eventi. Per mezzo dell'algoritmo *Fast Fourier Transform* (FFT) sono ricavati i valori di frequenza corrispondenti al massimo dell'ampiezza spettrale (dette "frequenze di picco"). Dal punto di vista del monitoraggio, l'informazione più importante è quella riguardante l'ampiezza e la sua variazione nel tempo. Infatti, i fenomeni di attività esplosiva sono in genere accompagnati da un aumento nell'ampiezza degli eventi e del tremore infrasonico.

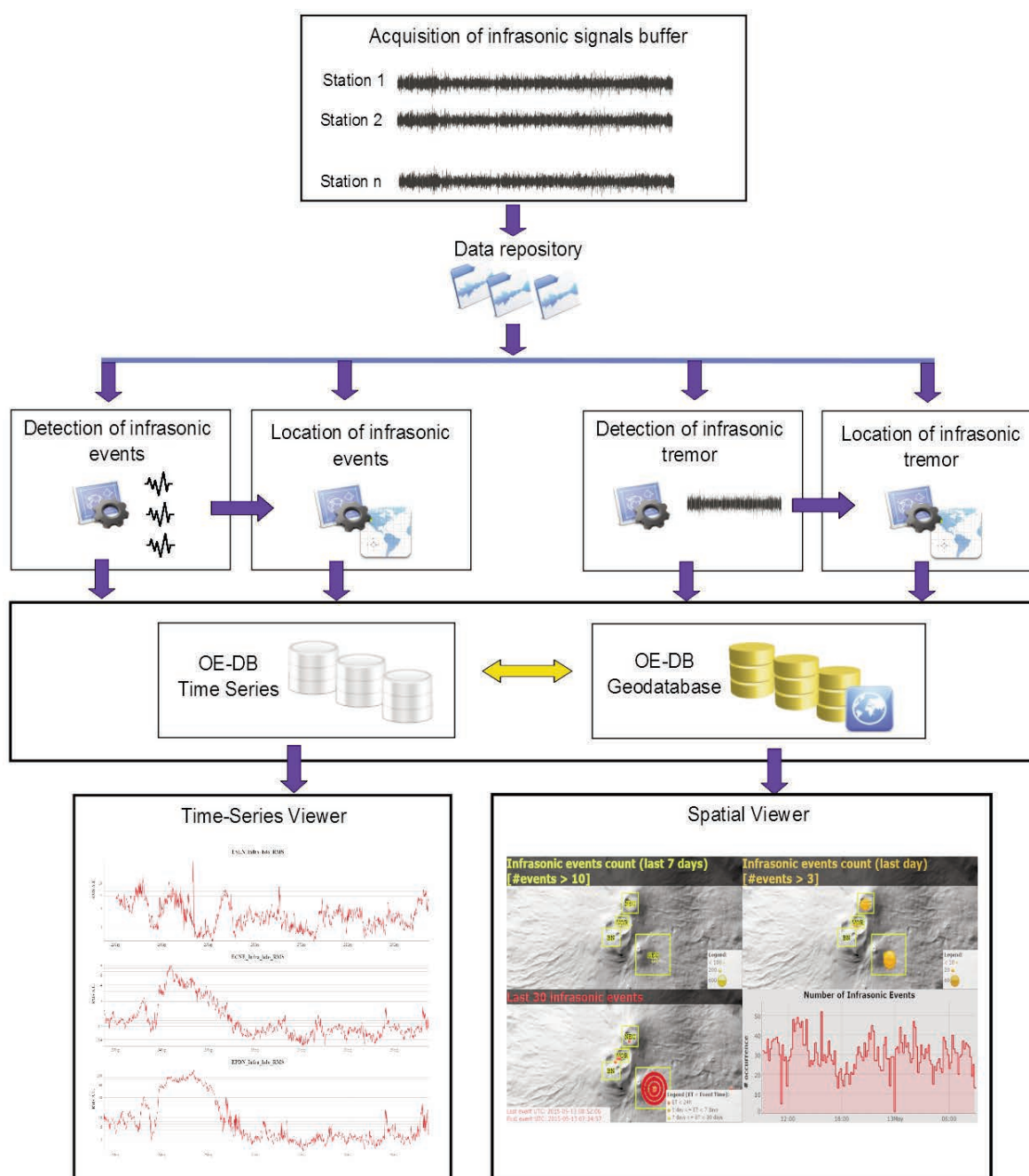


Figura 4 Schema del sistema di elaborazione dei segnali infrasonici, con il relativo sistema di visualizzazione.
Figure 4 Sketch of the processing system of the infrasonic signals, with the corresponding visualization system.

```

1 [toolidir]
2 DMX_host = \\10.201.1.75\AcqSismologia\Infrasismo
3 file_station = localizzazionekm_infra_summit.txt
4 component = 0
5 file_DEM = DEM_etna.mat
6 path_save = D:\real_time_systems\etna_infra_LP\picking\save
7 path_save_working = D:\real_time_systems\etna_infra_LP\picking\save_working
8 filename_save = Etna_infra_LP.txt
9 file_log = log_file.txt
10
11 [trigger_LP]
12 trigger_type = 1
13 N_dmx = 4
14 minutes_delay = 5
15 minutes_to_save = 2
16 freqmin_stalta = 1
17 freqmax_stalta = 6
18 stalength = 0.5
19 llength = 5
20 stalta_threshold = 2.8
21 dettrigger_thr = 1.5
22 length_events = 3
23 min_length_events = 1.5
24 percentile_events = 5
25 alpha_events = 10
26 RMS_quad = 1
27 length_window_RMS = 2
28 Min_No_trigger = 1
29 window_length_joint = 10
30 stalta_threshold_min = 2.5
31
32 [trigger_VLP]
33 trigger_type = 1
34 N_dmx = 4
  
```

Figura 5 Porzione del file di configurazione del software che si occupa della rilevazione e caratterizzazione degli eventi infrasonici.
 Figure 5 Portion of the configuration file of the software, dealing with the detection and characterization of the infrasonic events.

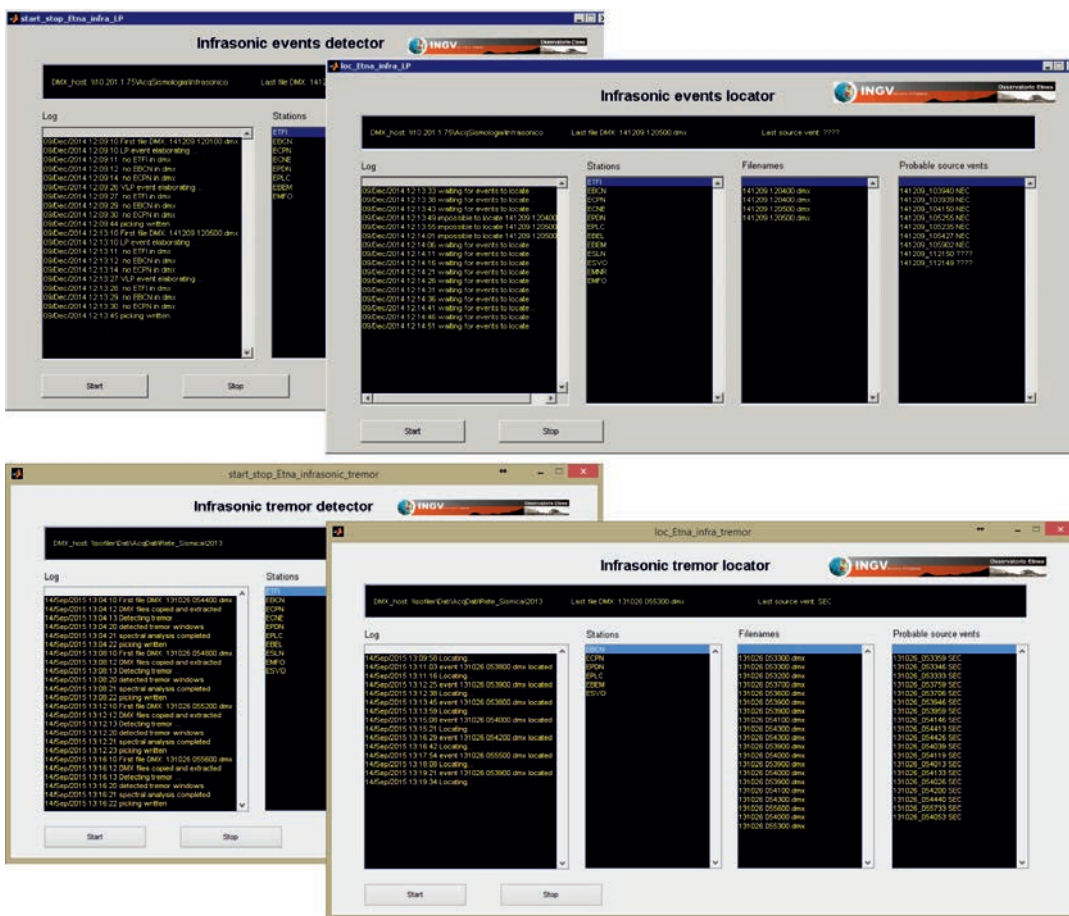


Figura 6 Interfacce dei software sviluppati per il monitoraggio dell'attività infrasonica dell'Etna.
 Figure 6 Graphic interfaces of the software developed for the monitoring of the Etna infrasonic activity.

2.2 Localizzazione degli eventi infrasonici

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse tecniche per localizzare la sorgente dei segnali infrasonici. Per quanto concerne i segnali infrasonici acquisiti sul vulcano Etna, data la geometria sparsa della rete permanente, sono state sviluppate tecniche ad hoc per localizzare le sorgenti.

Il *software*, che si occupa della localizzazione degli eventi infrasonici, implementa un metodo basato su due differenti funzioni: *semblance* e una versione modificata di *brightness* [Cannata et al., 2011, 2013]. Per quanto riguarda la prima, usata per valutare la somiglianza di dati multi-canale, è definita come [Neidell e Taner, 1971]:

$$S_0 = \frac{\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N U_i(\tau_i + j\Delta t) \right)^2}{N \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N U_i(\tau_i + j\Delta t)^2}$$

dove U è il segnale infrasonico, N è il numero di sensori, Δt è l'intervallo di campionamento, τ_i è il tempo origine alla stazione i -esima, e M rappresenta il numero di campioni della finestra di segnale. Tale funzione varia da 0 a 1. Il valo-

re 1 è ottenuto solo nel caso in cui i segnali siano identici in termini di forme d'onda ed ampiezza. La definizione di *brightness* è la seguente:

$$B_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\max(W_i))$$

dove W_i è la finestra del segnale U_i -esimo moltiplicata per la funzione di hanning:

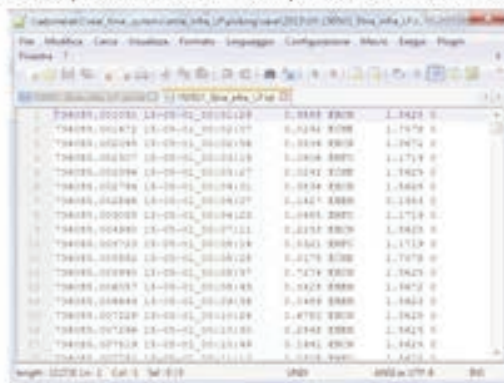
$$W_i = \text{hanning}[U_i(\tau_i + j\Delta t)]$$

con $j=1, \dots, M$

Il segnale U deve essere normalizzato, in modo tale che, nel caso in cui tutte le massime ampiezze siano allineate al centro della finestra considerata, B_0 sia uguale a 1.

Tale metodo di localizzazione consiste nel trovare il set di tempi di arrivo alle stazioni, tale da massimizzare il valore congiunto di *semblance*+*brightness*. Il metodo di localizzazione è costituito da vari *step*. Per prima cosa viene definita una griglia 2D di possibili posizioni sorgente, coincidente con la superficie topografica, con estensione pari a 8×8

Time, spectral and amplitude information



Location information

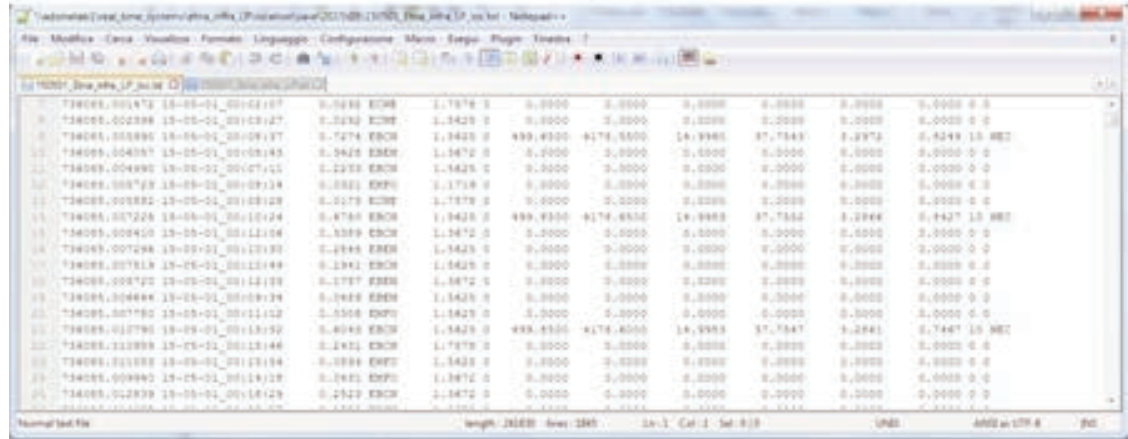


Figura 7 File di testo contenenti i risultati delle elaborazioni automatiche eseguite sui segnali infrasonici. Figure 7 ASCII files containing the results of the automatic processing, performed on the infrasonic signals.

km^2 e spaziatura pari a 50 m. Un tempo di inizio (chiamato t_s) è fissato sulla base del tempo di arrivo dell'evento infrasonico ad una stazione di riferimento (generalmente scelta sulla base del rapporto segnale/rumore). Si assume che la sorgente sia in ciascun nodo della griglia, e per ciascun nodo si calcola il tempo origine t_0 , assumendo una certa velocità di propagazione delle onde acustiche in atmosfera (generalmente pari a circa 340 m/s), sulla base della seguente equazione:

$$t_0 = t_s - r/v$$

dove v è la velocità e r è la distanza tra il nodo della griglia, assunto come posizione sorgente, e la stazione di riferimento. Quindi vengono calcolati i *travel time* teorici a tutte le stazioni sulla base della seguente equazione:

$$t_i = r_i/v$$

dove r_i è la distanza tra il nodo della griglia e la stazione i -esima. Sulla base dei *travel time* così ottenuti, i segnali alle varie stazioni sono ritardati e vengono calcolati i valori di *semblance* e *brightness*. Una volta che tali parametri sono

determinati in tutti i nodi, le due griglie di valori di *semblance* e *brightness* sono normalizzate (sottraendo il valore minimo e dividendo per il valore massimo) e sommate nodo per nodo. La sorgente viene così localizzata nel nodo della griglia che mostra il valore massimo di *semblance+brightness* (Fig. 8).

Altri metodi di localizzazione con array [e.g. Ripepe et al., 2007] utilizzano la funzione di *semblance*. La necessità di introdurre anche la funzione di *brightness* deriva dal fatto che le stazioni, non avendo una configurazione ad *array*, presentano una maggiore distanza le une rispetto alle altre, da cui deriva una maggiore decorrelazione tra le forme d'onda.

2.3 Rilevazione e caratterizzazione del tremore infrasonico

Dato che il tremore infrasonico ha un inizio molto emergente, rispetto agli eventi infrasonici che sono in genere caratterizzati da un inizio impulsivo, non viene usato l'algoritmo STA/LTA, ma viene applicato il seguente metodo per la rilevazione. Il segnale registrato da varie stazioni viene filtrato con filtri passa-basso con frequenza di *cut-off* pari a 1 Hz. Tale frequenza è stata scelta a causa della minore perdita di coerenza dei segnali di bassa frequenza

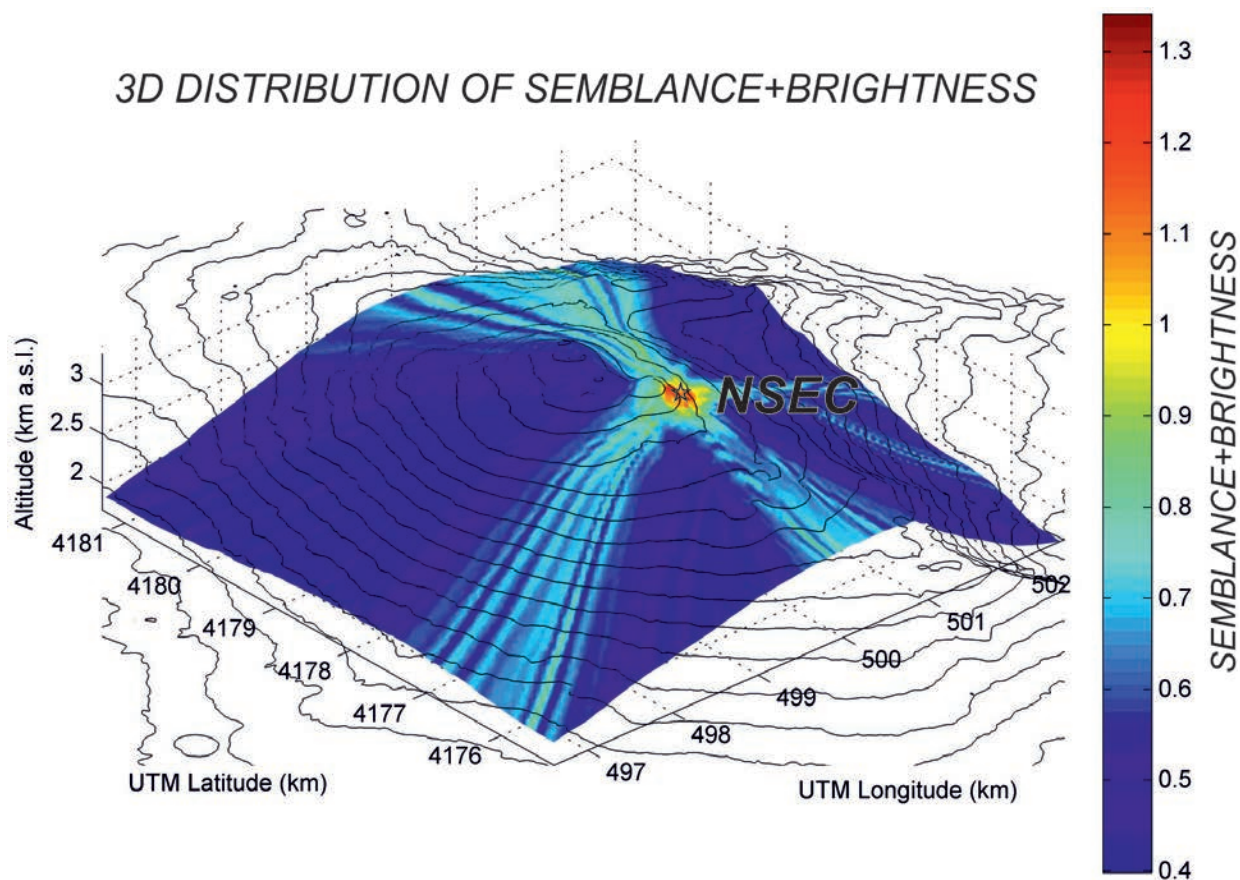


Figura 8 Distribuzione spaziale di *semblance+brightness* per un evento infrasonico generato dal NSEC. La stella indica il punto della griglia con il massimo valore di *semblance+brightness*.
Figure 8 Space distribution of *semblance+brightness* for an infrasonic event generated by NSEC. The star indicates the grid node with the maximum value of *semblance+brightness*.

attraverso una rete sparsa, rispetto a segnali di più alta frequenza. Per tale motivo vengono utilizzati solo i segnali registrati dai microfoni GRAS, che presentano risposta piatta fino a 0.3 Hz (vedi Fig. 1). Quindi vengono estratte finestre mobili di segnale filtrato a differenti stazioni e confrontate per mezzo della funzione di cross-correlazione. Tale coefficiente viene massimizzato considerando possibili *lag* tra le finestre. Vengono calcolati i valori del coefficiente di cross-correlazione tra tutte le possibili coppie di finestre. Se la cross correlazione massima supera il valore di 0.75 almeno ad un certo numero di coppie di stazioni, viene dichiarata la rilevazione di una finestra di tremore infrasonico. Tali finestre di tremore vengono caratterizzate da un punto di vista di ampiezza e di contenuto spettrale tramite il calcolo dell'RMS e della frequenza di picco, rispettivamente.

Come già riportato nel caso della rilevazione degli eventi infrasonici, anche il numero di finestre di tremore individuate può essere pesantemente influenzato dal *noise* legato al vento.

2.4 Localizzazione del tremore infrasonico

Per quanto concerne il tremore infrasonico, il metodo di localizzazione è simile a quello degli eventi infrasonici, con

la differenza che solo la funzione *semblance* viene utilizzata per ricavare la posizione della sorgente. Di modo tale da mantenere la coerenza tra i segnali, vengono utilizzate solo le basse frequenze (< 1 Hz) e quindi solo i segnali registrati dai microfoni GRAS (vedi Fig. 1).

3. Importazione nella banca dati e visualizzazione

Una volta che i risultati delle elaborazioni sono scritti su *file* ASCII formattati in colonne, le informazioni in essi riportate sono caricate in automatico e in *near real-time* mediante il sistema TSDSystem (Time Series Database System; Cassisi et al., [2015]) che costituisce l'archivio delle serie temporali del database di sezione dell'INGV-OE. Il caricamento avviene mediante i moduli "loader" i quali archiviano i risultati delle elaborazioni dei segnali infrasonici all'interno di una struttura omogenea di tipo multi-parametrico alla quale afferiscono tutte le grandezze temporali archiviate nel database dell'INGV-OE.

Il sistema garantisce il consolidamento dell'informazione relazionando la singola rilevazione e localizzazione con tutti i parametri impiegati per il processo, tra cui il numero di stazioni impiegate e le stazioni utilizzate con i relativi

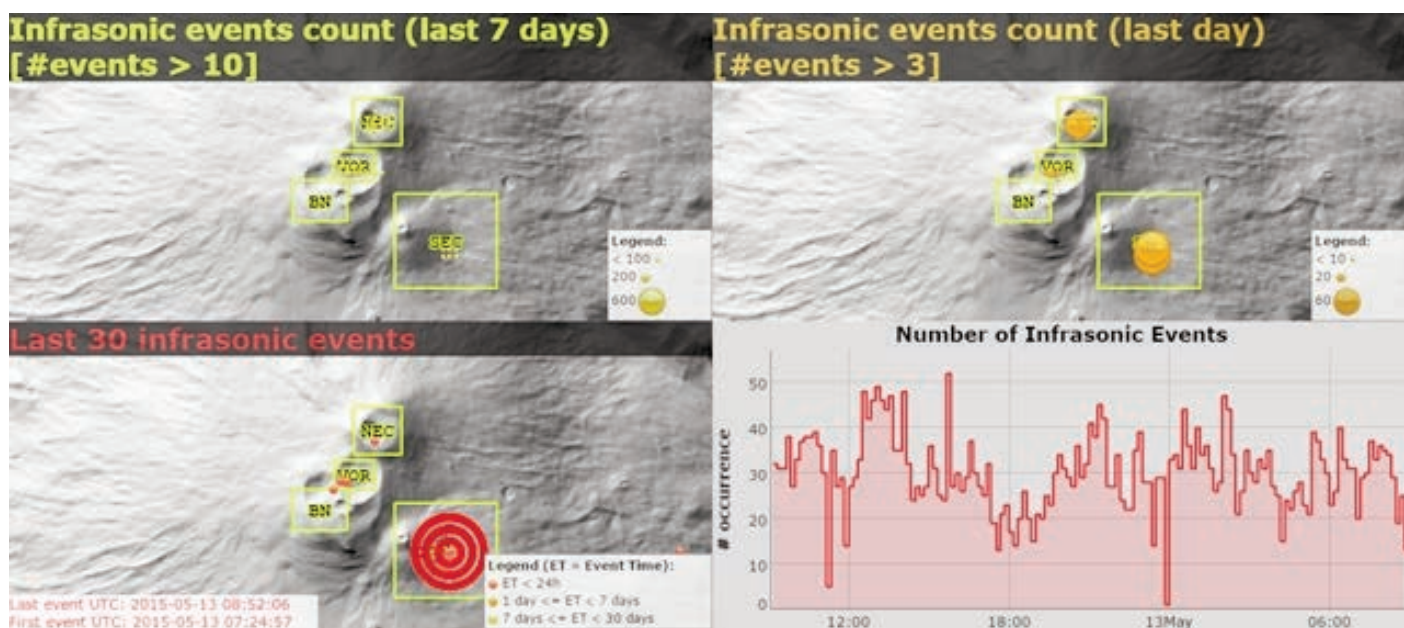


Figura 9 Screenshot del software di visualizzazione che mostra una parte dei risultati delle elaborazioni automatiche eseguite sui segnali infrasonici. La pagina è suddivisa in 4 blocchi. In particolare, nel blocco in alto a sinistra viene mostrata la localizzazione degli eventi infrasonici durante l'ultima settimana (la dimensione dei cerchi è proporzionale al numero di localizzazioni al centro del cerchio, vedi legenda in basso a destra); nel blocco in alto a destra la localizzazione degli eventi infrasonici durante l'ultimo giorno (la dimensione dei cerchi è proporzionale al numero di localizzazioni al centro del cerchio, vedi legenda in basso a destra); nel blocco in basso a sinistra le ultime 30 localizzazioni; nel blocco in basso a destra la variazione nel tempo del tasso di occorrenza degli eventi.

Figure 9 Screenshot of the software showing some results of the automatic elaborations performed on the infrasonic signals. In particular, in the upper left plot the locations of the infrasonic events recorded during the last week are shown (the size of the circle is proportional to the location number at the center of the circle, see legend at the lower right corner), in the upper right plot the infrasonic locations during the last day (the size of the circle is proportional to the location number at the center of the circle, see legend at the lower right corner), in the lower left plot the location of the last 30 events, and in the lower right plot the variation in time of the occurrence rate of the infrasonic events.

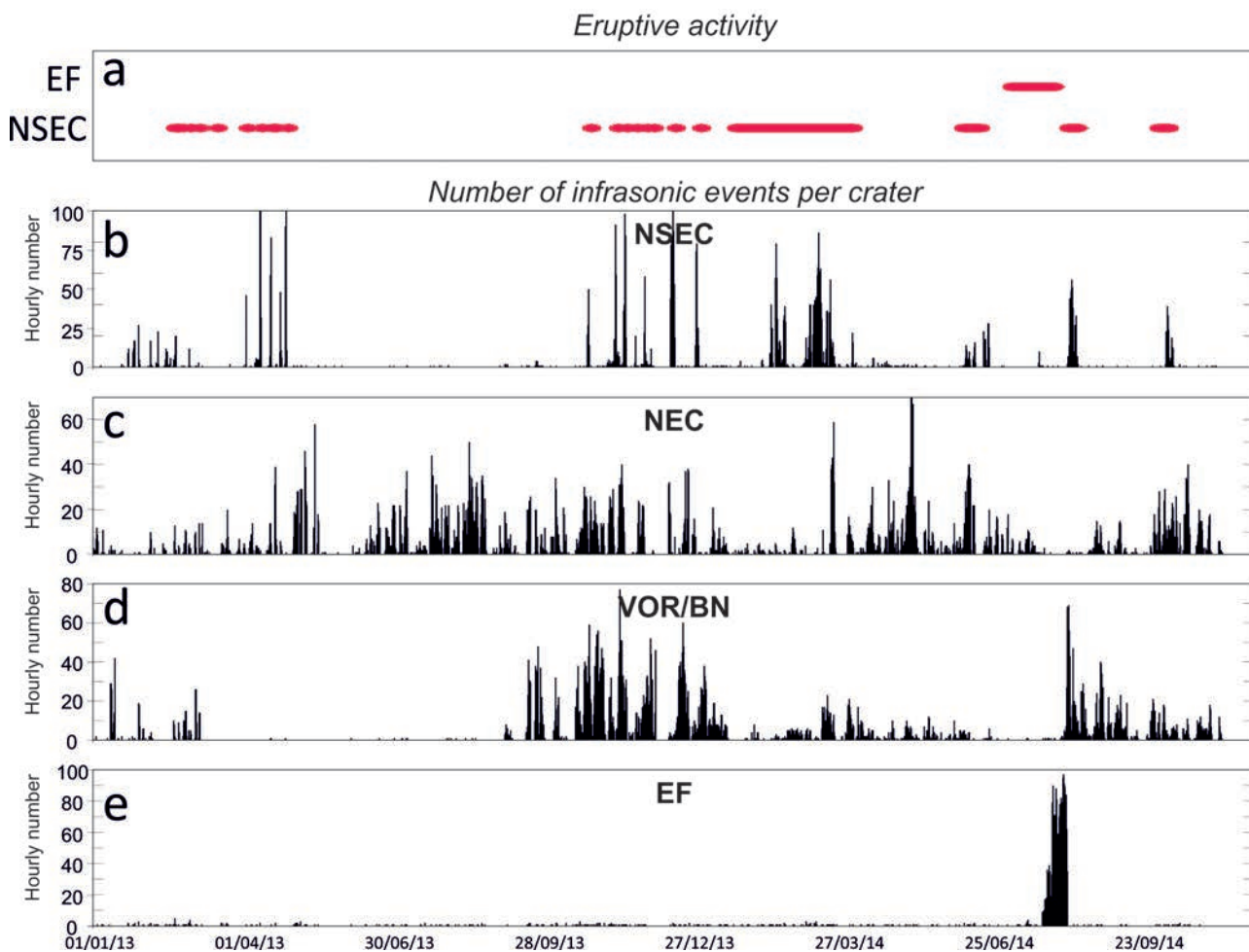


Figura 10 (a) Periodi di attività eruttiva alla fessura attiva durante luglio-agosto 2014 (EF) e al NSEC. (b,c,d,e) Variazione giornaliera del numero orario di eventi infrasonici localizzati in 4 aree di sorgenti infrasoniche.

Figure 10 (a) Eruptive periods at the fissure active during July-August 2014 (EF) and at NSEC. (b,c,d,e) Temporal variations of the hourly number of infrasonic events located in 4 source areas.

parametri (ubicazione, caratteristiche tecniche, curve di risposta dei sensori, etc..). Sebbene all'interno di TSDSystem i parametri relativi alle localizzazioni siano archiviati sotto forma di serie temporali (es. latitudine e longitudine nel tempo), il processo di visualizzazione richiede l'impiego di una base cartografica. Per questo motivo la visualizzazione avviene impiegando anche il *geodatabase* dell'INGV-OE nel quale sono archiviate diverse basi cartografiche sia in forma vettoriale (*shape file*) che mediante *geotiff*. L'organo di visualizzazione impiegato sfrutta la connessione al *geodatabase* mediante specifiche WMS (*Web Map Service*) per ottenere la base cartografica, nella fattispecie il DEM dell'area sommitale del Monte Etna, e la connessione al TSDSystem per ottenere i dati relativi alla localizzazione degli eventi. Uno *screenshot* del *software* di visualizzazione che mostra le localizzazioni degli eventi infrasonici e la variazione nel tempo del loro tasso di occorrenza è riportato in Fig. 9.

4. Conclusioni

Uno degli strumenti fondamentali per la sorveglianza e il monitoraggio dell'attività del Monte Etna è il sistema di elaborazione automatica in *near real-time* dell'attività infrasonica. Tale sistema fornisce informazioni sulla posizione delle sorgenti infrasoniche, sul tasso di occorrenza di eventi infrasonici e tremore infrasonico, e sulle caratteristiche di tali segnali in termini di ampiezze e contenuto spettrale. Queste informazioni sono disponibili in *near real-time* al personale di turno in Sala Operativa, dove i dati sulla posizione delle sorgenti e sul tasso di occorrenza degli eventi sono sempre visibili, contribuendo così alla sorveglianza. Inoltre, tali dati sono usati per fornire informazioni aggiuntive sullo stato di attività dell'Etna per scopi di monitoraggio interni all'INGV-OE o per procurare dati addizionali agli organi di Protezione Civile. Esempi di tali informazioni sono riportati nelle Figg. 10 e 11, che mostrano la varia-

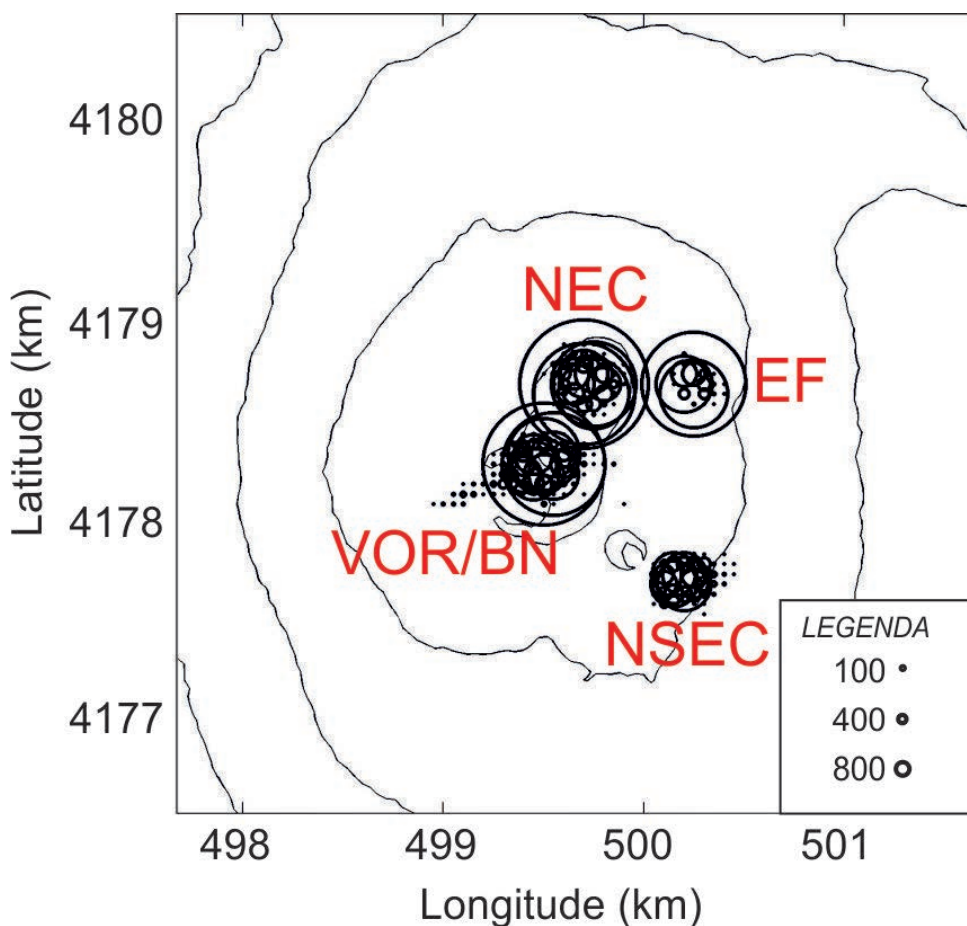


Figura 11 Mappa dell'area sommitale del Monte Etna con le localizzazioni degli eventi infrasonici avvenuti durante il 2013-2014. La grandezza dei cerchi è proporzionale al numero di localizzazioni al centro dei cerchi (vedi legenda in basso a destra).

Figure 11 Map of the summit area of Mt. Etna with the locations of the infrasonic events that occurred in 2013-2014. The size of the circles is proportional to the locations number at the center of the circles (see legend in the lower right corner).

zione nel tempo del numero orario di eventi infrasonici per area sorgente durante il 2013-2014 e la loro disposizione in mappa, rispettivamente.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il Dott. Rosario Peluso per la revisione del lavoro e gli utili consigli. I risultati di questo report sono stati ottenuti grazie al progetto PON01_00683 SIGMA (Sistema Integrato di sensori in ambiente cloud per la Gestione Multirischio Avanzata).

Bibliografia

Cannata A., Montalto P., Privitera E., Russo G., Gresta S., (2009). *Tracking eruptive phenomena by infrasound: May*

13, 2008 eruption at Mt. Etna. Geophys. Res. Lett., 36, doi:10.1029/2008GL036738.

Cannata A., Montalto P., Privitera E., Russo G., (2009). *Characterization and location of infrasonic sources in active volcanoes: Mount Etna, September-November 2007*. J. Geophys. Res., 114, B08308, doi:10.1029/2008JB006007.

Cannata A., Sciotto, M., Spampinato L., Spina L., (2011). *Insights into explosive activity at eruptive fissure closely-spaced eruptive vents using infrasound signals: example of Mt. Etna 2008 eruption*. J. Volcanol. Geotherm. Res., doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.09.003.

Cannata A., Di Grazia G., Aliotta M., Cassisi C., Montalto P., Patané D., (2013). *Monitoring seismo-volcanic and infrasonic signals at volcanoes: Mt. Etna case study*. Pure and Applied Geophysics, doi:10.1007/s00024-012-0634-x.

Cassisi, C., Montalto, P., Aliotta, M., Cannata, A., Prestifilippo, M., (2015). *TSDSystem: un database mul-*

tidisciplinare per la gestione di serie temporali. Rapporti tecnici INGV, 304.

- Johnson J.B., Ripepe M., (2011). *Volcano infrasound: A review*. J. Volcanol. Geotherm. Res., doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.06.006.
- Matoza R.S., Vergoz J., Le Pichon A., Ceranna L., Green D.N., Evers L.G., Ripepe M., Campus P., Liszka L., Kvaerna T., Kjartansson E., Höskuldsson A., (2011). *Long-range acoustic observations of the Eyjafjallajökull eruption, Iceland, April-May 2010*. Geophys. Res. Lett., 38, L06308, doi:10.1029/2011GL047019.
- Neidell N., Taner M.T., (1971). *Semblance and other coherency measures for multichannel data*. Geophysics, 36, 482-497.
- Ripepe M., Marchetti E., Olivieri G., (2007). *Infrasound monitoring at Stromboli volcano during the 2003 effusive eruption: Insights on the explosive and degassing process of an open conduit system*. J. Geophys. Res., 112, B09207, doi:10.1029/2006JB004613.
- Sciotto M., Cannata A., Privitera E., Gresta S., Di Grazia G., (2011). *Seismo-acoustic investigations of paroxysmal activity at Mt. Etna volcano: New insights into 16 November 2006*. J. Geophys. Res. doi:10.1029/2010JB008138.
- Sciotto M., Cannata A., Gresta S., Privitera E., Spina L., (2013). *Seismic and Infrasound Signals at Mt. Etna: Modelling of North-East Crater Conduit and its Relation with the Feeding System of the 2008-2009 Eruption*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 254, 53-68, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.12.024.
- Spina L., Cannata A., Privitera E., Vergniolle S., Ferlito C., Gresta S., Montalto P., Sciotto M., (2014). *Insights into Mt. Etna's Shallow Plumbing System from the Analysis of Infrasound Signals, August 2007-December 2009*. Pure and Applied Geophysics, doi: 10.1007/s00024-014-0884-x.
- Ward P.L. (1989). *SUDS: Seismic Unified Data Sistem*. In:U.S.G.S. Open-File Report 89-188.
- Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J., (1998). *A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection*. Bull. Seism. Soc. Am., 88, 95-106.

Indice

Introduzione	4
1. Rete infrasonica	6
2. Processing dei segnali infrasonici	6
2.1 Rilevazione e caratterizzazione degli eventi infrasonici	6
2.2 Localizzazione degli eventi infrasonici	9
2.3 Rilevazione e caratterizzazione del tremore infrasonico	10
2.4 Localizzazione del tremore infrasonico	11
3. Importazione nella banca dati e visualizzazione	11
4. Conclusioni	12
Ringraziamenti	13
Bibliografia	13

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia