

QUADERNI di GEOFISICA

Prestazioni di un sistema di allerta
rapido: il caso del software PRESTo



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

188

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editor in Chief

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

Editorial Board

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

Segreteria di Redazione

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

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

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

Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

QUADERNI di GEOFISICA

Prestazioni di un sistema di allerta rapido:
il caso del software PRESTo

*Performance of an early warning system:
The PRESTo software case*

Simona Carannante¹, Chiara Ladina²

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

²INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

Accettato 17 maggio 2023 | Accepted 17 May 2023

Come citare | *How to cite* Carannante S., Ladina C., (2023). Prestazioni di un sistema di allerta rapido: il caso del software PRESTo. Quad. Geofis., 188: 1-32, <https://doi.org/10.13127/qdg/188>

In copertina Distribuzione della sismicità del catalogo INGV | Cover INGV seismicity distribution

188

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	8
1. Il software PRESTo	9
2. Configurazione di PRESTo	9
3. PRESTo in tempo reale	11
3.1 Performance del software	14
3.2 Casi Particolari	17
3.2.1 Caso 1	19
3.2.2 Caso 2	20
3.2.3 Caso 3	22
3.3 La sequenza 2022 Costa Marchigiana Pesarese	23
4. Criticità del sistema PRESTo: discussione e conclusioni	24
Ringraziamenti	25
Bibliografia	26

Riassunto

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto premiale del 2015 ART-IT (Allerta Rapida Terremoti in Italia). Scopo principale del lavoro è quello di indagare le prestazioni e le criticità di un sistema di allerta rapido con particolare riferimento al sistema PRESTo (*PRobabilistic and Evolutionary early warning SysTem*, [Iannacone et al., 2010; Satriano et al., 2011]) il cui utilizzo è stato testato nell'ambito del progetto sopra menzionato. L'utilizzo ed il corretto funzionamento di un sistema di allerta rapido può garantire una più efficace gestione di un'emergenza sismica sin dai primi secondi dopo il riconoscimento di un forte terremoto, consentendo di adottare azioni rapide per ridurre l'esposizione e il rischio sismico. Nell'ambito del progetto, il lavoro è stato sostanzialmente suddiviso in due fasi. Una prima fase, realizzata nella prima parte del progetto, ha riguardato la calibrazione del *software*, ovvero l'individuazione dei valori dei parametri di configurazione che ne garantissero le migliori prestazioni in termini di *triggering* e dichiarazione degli eventi. Una volta individuati i valori dei parametri, la seconda fase del lavoro si è focalizzata sulla sperimentazione del *software* in tempo reale su un'area scelta come *test site* e la successiva valutazione delle sue prestazioni in termini di capacità di detezione e localizzazione. Il presente lavoro si focalizza principalmente sulla seconda parte della sperimentazione ed è volto a descrivere e sintetizzare le analisi effettuate per valutare la risposta del *software* PRESTo (e in genere di un sistema di allerta precoce) dopo un anno di sperimentazione ed acquisizione ed evidenziare eventuali problematiche e criticità del *software* e più in generale dei sistemi di allerta rapido.

Abstract

This work was carried out within the 2015 ART-IT project (Early Earthquake Alert in Italy). Its main purpose is to investigate the performance and the critical issues of an early warning system with particular reference to the PRESTo system (PRobabilistic and Evolutionary early warning SysTem, [Iannacone et al., 2010; Satriano et al., 2011]) whose use has been tested in the framework of the above mentioned project.

The correct operation of an early warning system can effectively guarantee a more effective management of a seismic emergency from the first seconds after the occurrence of a strong earthquake, allowing quick actions to reduce exposure and seismic risk. The work was substantially subdivided into two main steps. A first calibration phase, carried out in the first part of the project and aimed to identify the best values of the software configuration parameters in terms of event triggering and declaration. Once the values of the aforementioned parameters have been identified, the second phase of the work was focused on testing the software in real time configuration, on a test site area and the subsequent evaluation of its performance in terms of declaration and localization capacity. This work focuses mainly on the second part of the experimentation and is aimed describing and summarizing the analysis carried out to evaluate the response of the PRESTo software (and in general of an early warning system) after one year of experimentation and acquisition and highlight any problems and critical issues of the software and more generally of the rapid alert systems.

Introduzione

Negli ultimi anni l'uso di un sistema di allerta rapida (Earthquake Early Warning, EEW) si è diffuso ed è stato implementato in molti paesi del mondo. La vulnerabilità delle aree urbane in relazione ad eventi sismici ha portato allo sviluppo di differenti approcci, metodologie e combinazioni di nuove esperienze. In questi ultimi anni diversi paesi si sono dotati di sistemi prototipali, che in alcuni casi sono stati resi operativi.

Alcuni esempi includono il sistema di EEW in Giappone [Otake et al., 2003], in Taiwan [Wu and Teng, 2002; Hsiao et al., 2009], in Messico [Suarez et al., 2009], in Turchia [Erdik et al., 2003; Alcik et al., 2009] ed in Romania [Böse et al., 2007]. In California alcuni tra i principali sistemi attivi si basano sui software ElarmS [Allen and Kanamori, 2003; Allen et al., 2009], ShakeAlert [Kohler et al., 2020] e Virtual Seismologist [Cua et al., 2009], quest'ultimo utilizzato anche in Svizzera [Massin et al., 2021]. In Europa sono operativi sistemi di EEW in Israele [Nof et al., 2021], in Grecia [Galasso et al., 2023], nel sud della Penisola Iberica [Carranza et al., 2017] ed in particolare in Italia dove è stato sviluppato il software PRESTo [Iannaccone et al., 2010; Satriano et al., 2011]. Tutti questi sistemi hanno in comune lo scopo di fornire una rapida notifica dei potenziali effetti dannosi di un evento sismico attraverso il processamento dei dati di reti di monitoraggio nelle aree in cui è localizzata la sorgente dell'evento o nelle aree circostanti i target selezionati. Per questi motivi, sono necessarie sempre nuove conoscenze in questo ambito e lo sviluppo di infrastrutture dedicate agli scopi di EEW, partendo anche da studi di fattibilità degli stessi [Olivieri et al., 2008; Picozzi et al., 2015; Ladina et al., 2021; Enferadi et al., 2021].

Esistono sostanzialmente due diversi approcci all'EEW, dipendenti dalla disposizione della rete di monitoraggio rispetto all'area epicentrale ed alla distanza dei target da allertare: i sistemi "regionali" e quelli "on-site".

Un sistema regionale è basato su una densa rete di sensori installati nella regione di origine dell'evento di interesse e in cui, i target da proteggere, risultano lontani. Il sistema ha lo scopo di rilevare, localizzare e stimare la magnitudo di un evento a partire dall'analisi di pochi secondi dal primo arrivo (onda P) registrato alle stazioni di modo da poter successivamente predire, con un grado di affidabilità quantificato, l'intensità del movimento del suolo attesa ad un sito *target*. Il sistema *on-site* invece consiste in un singolo sensore o più sensori vicini alla struttura da allertare. In questo sistema la fase P registrata da un singolo sensore viene utilizzata per calcolare il tempo di arrivo e l'ampiezza della fase S.

Alla luce di queste premesse un buon sistema di EEW può essere definito come un sistema che fornisce allo stesso tempo un grande *lead-time* (definito come tempo utile per avviare azioni di messa in sicurezza ai target) ed il minimo errore di predizione del picco di spostamento (considerato come la differenza di ampiezza tra il picco osservato e quello predetto) [Zollo et al., 2010]. Alcuni autori [esempio Zollo et al., 2010; Colombelli et al., 2012] hanno inoltre mostrato come l'integrazione dei due sistemi (regionale e on-site) possa consentire una previsione più tempestiva dell'area di danno. Un'ulteriore classificazione del sistema regionale riguarda la sorgente. Anche in questo caso si possono avere due tipi di approcci: 'point-source' o 'finite-fault'. Velazquez et al. [2020] descrivono la prima come una sorgente approssimabile ad un volume concentrato, mentre la seconda viene descritta in maniera più sofisticata e realistica considerando le proprietà della sorgente, valutata come un intero piano di faglia. Alcuni studi hanno dimostrato che il primo approccio non è il più idoneo per terremoti di forte entità ($M \geq 6.5 - 7$) per la saturazione dei parametri dell'onda P. Alcuni autori [esempio Colombelli et al., 2012b, Velazquez et al., 2020] a questo riguardo, hanno proposto delle finestre di analisi più lunghe per la stima della magnitudo per ottenere valori finali più accurati. Anche la stima della localizzazione è stata affrontata da più autori. Satriano et al. [2008] mostra come sia possibile attivare il sistema di allerta anche quando l'evento è stato localizzato solamente da un numero limitato di stazioni, e successivamente perfezionare la stima con l'aggiunta di nuove stazioni.

Sul territorio italiano, nella maggior parte dei casi, i principali danni sono stati riscontrati nelle aree prossime all'epicentro, sia nel caso di eventi superficiali (solitamente < 15 km di profondità) sia nel caso di eventi di bassa magnitudo (< 6) dove l'area di danneggiamento generalmente non supera il raggio di ~30-40 km nell'intorno dell'epicentro. Nelle aree urbane, poste a poche decine di chilometri dalla sorgente sismica, i tempi di pre-allerta stimati possono essere anche di poche decine di secondi. Picozzi et al. [2015] hanno mostrato come in Italia utilizzando il sistema PRESTo e simulando il terremoto dell'Irpinia del 1980 (Mw 6.9), per comuni a distanze epicentrali comprese tra circa 20 e 60 km (area utile di intervento) la differenza tra il tempo di arrivo delle onde sismiche S e il momento in cui scatta l'allarme poteva essere fino a circa 20 secondi, tempo più che sufficiente per ridurre alcuni fattori di rischio attraverso allarmi lanciati da sistemi automatici.

Il progetto premiale ART-IT aveva tra gli obiettivi quello di sviluppare e verificare un sistema integrato di allerta precoce per i terremoti in Italia (*Seismic Early Warning*), implementando e ottimizzando, in alcune aree critiche, le reti di monitoraggio sismico già esistenti. Nell'ambito di questo progetto, la sezione di Milano si è occupata della sperimentazione del sistema di allerta precoce PRESTo sviluppato dal gruppo RISSCLAB dell'Università di Napoli [<http://www.rissclab.unina.it>], utilizzando come *test site* un'ampia area del Centro Italia comprendente anche la zona della Val Tiberina.

1. Il software PRESTo

Il *software* PRESTo è stato utilizzato per elaborare in tempo reale le accelerazioni da segnali sismici stimando posizione, magnitudo e tempo residuo dell'onda S ai siti target eventualmente monitorati [Festa et al., 2018]. PRESTo implementa le seguenti componenti: un *detector* di fase ed un *filter picking* [Lomax et al., 2012] che permettono di selezionare il primo arrivo dell'onda P; un algoritmo di localizzazione *RTLoc* [Satriano et al., 2008] che costituisce una versione implementata dell'originale algoritmo di localizzazione *NLLoc* [Lomax et al., 2000; 2001] utilizzando sia stazioni che hanno triggerato l'evento che quelle che non lo hanno triggerato per dare una prima stima dei parametri ipocentrali e del tempo origine; un algoritmo per la stima della magnitudo *RTMag* [Lancieri and Zollo, 2008], basato su un approccio bayesiano che utilizza picchi di spostamento dei primi secondi (2 e 3 s per l'onda P e 2 s per l'onda S) con una frequenza di *cutoff* di 0.075 Hz. La magnitudo finale è ottenuta attraverso leggi di correlazione empiriche basate sui primi valori di spostamento dei picchi di P e S mentre le *Ground-Motion Prediction Equations* (GMPE), per stimare il picco di *ground motion* (*peak ground velocity*, PGV, e *peak ground acceleration*, PGA) ai siti *target*, vengono calcolate in tempo reale a partire da posizione e magnitudo stimate grazie alle informazioni delle stazioni in uso.

2. Configurazione di PRESTo

Una fase preliminare del lavoro, all'interno del progetto, ha riguardato la calibrazione del *software* PRESTo, al fine di ottimizzarne le prestazioni, in termini di capacità di *detection* degli eventi e precisione della stima dei parametri ipocentrali e di *ground motion*. La calibrazione è stata realizzata utilizzando il *software* in modalità *playback*, vale a dire utilizzando le registrazioni di eventi reali per simulare l'accadimento di un evento sismico così da analizzare poi la risposta del *software* al variare dei parametri di configurazione.

La fase di calibrazione, su cui non ci soffermiamo perché dettagliatamente descritta in Carannante et al. [2022], è stata realizzata adoperando un dataset di forme d'onda relative ad un catalogo costituito da 20 eventi, avvenuti nel periodo dal 01/01/2017 al 31/12/2019 e con

una magnitudo $4.0 \leq M_L \leq 5.4$ in un'area tra le regioni Umbria e Marche. Rispetto all'area attualmente monitorata dal *software* in tempo reale, descritta nel paragrafo successivo, cui sono riferite le analisi del presente lavoro, quella adoperata per la calibrazione costituisce un'area più piccola. La scelta di utilizzare un'area più ristretta rispetto a quella attuale ed un catalogo con un numero esiguo di eventi è stata dettata sia da esigenze di carattere strumentale, come già argomentato [Carannante et al., 2022], sia dal fatto che, benché tutto il Centro Italia sia caratterizzato da un elevato tasso di sismicità, risultano comunque pochi gli eventi con una magnitudo superiore a 4.5 e quindi tali da risultare di interesse ai fini dell'*early warning*.

La calibrazione ha riguardato principalmente i parametri che nel *software* regolano la fase di *triggering* e *detriggering* e la fase di dichiarazione dell'evento. Non ci si è invece soffermati ad analizzare l'impatto sulle prestazioni utilizzando un modello di velocità 1D rispetto ad un modello 3D e l'adeguatezza delle leggi di attenuazione per la stima della magnitudo e per la stima di PGA e PGV.

Per la stima della magnitudo, durante tutta la fase di test, è stata utilizzata la relazione pubblicata da Festa et al. [2018], calibrata sui dati della sequenza avvenuta in Centro Italia tra il 2016 e 2017 e registrata dalle stazioni RAN (Rete Accelerometrica Nazionale, codice FDSN: IT, gestita dalla Protezione Civile Nazionale, Gorini et al., 2010) e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale gestite dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV codice FDSN: IV); mentre per la stima di PGA e PGV si è fatto uso delle relazioni di base presenti nel *software*.

PRESTo utilizza una serie di *file* di *input*, tra questi vi è il *file params.txt* che contiene i parametri di configurazione. I parametri scelti all'interno del file utilizzati per le analisi proposte in questo lavoro sono stati analizzati in Carannante et al. [2022] e riportati nella Tabella 1.

Il sistema PRESTo è attualmente in acquisizione su un Desktop con sistema operativo Linux Ubuntu 18.04.6 LTS, dotato di Intel(R) Core(TM) i7-8700 CPU @ 3.20GHz, 12 Core e 16Gb di RAM.

PRESTO PROGRAM CONFIGURATION PARAMETERS CURRENTLY USED			PRESTO PROGRAM CONFIGURATION PARAMETERS CURRENTLY USED		
Simulation	VALUES	TESTED	Binder (Event Declaration)	VALUES	TESTED
simulation speed	1	YES	binder stations for coincidence	5	YES
simulation movie period	0	NO	binder secs for coincidence	3.0	YES
simulation write displacement	0	NO	binder secs for association	10.0	YES
simulation lag mean	0	NO	binder quakes life	15.0	YES
simulation lag sigma	0	NO	binder quakes separation	30.0	YES
Debug(Simulation Only)			binder apparent vel min	4.30	YES
debug_gaps duration	0	NO	binder apparent vel max	20	YES
debug_gaps period	0	NO	binder apparent vel stations spacing	50	YES
Debug			binder apparent vel max distance	120	YES
debug_save rtloc	0	NO	Locate		
SeedLink (Real Time)			locate ignore error	0	NO
slink timeout secs	60	NO	locate force sac	0	NO
slink delay secs	30	NO	locate force lon	-12345	NO
slink keepalive secs	0	NO	locate force lat	-12345	NO
slink log verbosity	0	NO	locate force dep	-12345	NO
Display			locate use non triggering stations	1	YES
display_heli_max_num	60	NO	locate period	1.0	NO
display_heli_min_accel	0.001	NO	Magnitude		
display_heli_min_vel	0.0001	NO	debug_save rtmag	0	NO
display_heli_lag_threshold	10	NO	magnitude max value	8.0	NO
display_heli_secs	60	NO	magnitude outlier threshold	3.5	NO
display_heli_width	0.455	NO	magnitude low fmin	1.0	NO
display_map_fixed_size	1	NO	magnitude low fmax	25	NO
display_map_station_scale	1.0	NO	magnitude high threshold	4.0	NO
display_heli_show_mag	1	NO	magnitude high fmin	0.075	NO
display_real_quake	1	NO	magnitude high fmax	3.0	NO
Waveform			magnitude p_secs short	2	NO
waveform_rmean_secs	30.0	NO	magnitude p_secs long	4	NO
waveform_clipping_secs	30.0	NO	magnitude_s_secs	2	NO
waveform_min_snr	5	NO	magnitude_p_can_overlap_s	0	NO
Picker			magnitude_secs_before_window	5	NO
picker_filterWindow	1.5	YES	Alarms		
picker_longTermWindow	14.0	YES	alarm_heartbeat_secs	60	NO
picker_threshold1	9.0	YES	alarm_during_simulation	0	NO
picker_threshold2	9.0	YES	alarm_max_period	1.0	NO
picker_tUpEvent	0.3	YES	Latencies		
			latency_log_period_secs	600	NO

Tabella 1 Parametri di configurazioni attualmente utilizzati in PRESTo presso la sezione di Milano. In rosso, nella colonna *TESTED*, sono evidenziati i parametri per i quali sono stati effettuati test in fase di calibrazione.
Table 1 Configuration parameters currently used in PRESTo at the Milan section. The parameters for which tests were carried out during the calibration phase are highlighted in red in the column *TESTED*.

3. PRESTo in tempo reale

I risultati e le analisi proposte in questo lavoro sono state realizzate utilizzando i dati raccolti in tempo reale dal *software* in un periodo di studio/sperimentazione di un anno, dal 30/07/2020 al 30/07/2021. In data 30/07/2020, in particolare, è stata modificata la configurazione del sistema, che era già in funzione, inserendo quella ottimizzata durante la fase di calibrazione. Per la sperimentazione si è scelto di monitorare un'area più ampia rispetto a quella utilizzata per la calibrazione che, con un'estensione di circa (220x240) km², copre la zona centrale dell'arco appenninico inglobando anche il *Near Fault Observatory TABOO* [Chiaraluce et al., 2014]. La scelta dell'area [Lat: 42.5 - 44.5, Lon: 11.0 - 14.2], deriva sia dalla sua storia sismica [Amato et al., 1998; De Luca et al., 2009; Chiarabba et al., 2015; Chiaraluce et al., 2017], sia dalla densità di stazioni sismiche presenti, caratteristica utile per realizzare l'*early warning*. Per l'intero periodo analizzato nel presente lavoro il *software* ha acquisito costantemente in *real time* anche se sono stati riscontrati alcuni gap nel processamento imputabili principalmente a tre cause:

1. problemi "esterni" di natura tecnica (in due casi si sono verificati dei *black out* elettrici nella sezione di Milano);
2. nel 25% dei casi è stato necessario effettuare un arresto manuale del *software* per diversi motivi (riavvio del *Desktop* a seguito di aggiornamenti, necessità di modificare la configurazione, aggiunta di stazioni alla rete di monitoraggio o modifica dei parametri di una stazione). In questo caso l'interruzione è durata pochi minuti e non ha comportato grossi disagi;
3. nel 65% dei casi si è invece verificato un problema di natura grafica (indipendente dall'operatore). Periodicamente infatti il *software* ha subito un blocco della scheda grafica continuando di fatto ad acquisire i dati senza però elaborarli.

La natura di quest'ultima tipologia di problema non è ancora chiara. Quello che però è risultato evidente è che a causa della prima e dell'ultima problematica si è andati incontro alla perdita di eventi significativi. Attualmente non è stato individuato un modo o comunque non siamo a conoscenza di un procedura che permetta di effettuare il controllo in automatico del corretto funzionamento in *real time* del *software* ed invii una segnalazione in caso di blocco così da permettere un intervento immediato. Nonostante i controlli periodici per verificare il corretto funzionamento del *software*, anche da remoto, non sempre il riavvio del sistema è avvenuto in tempi brevi, con la conseguente perdita di informazioni anche per alcuni giorni (Figura 1).

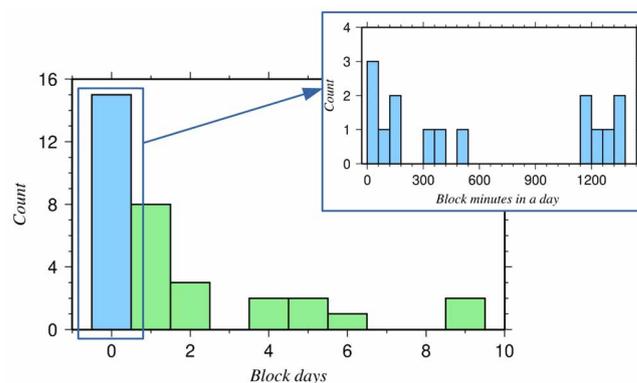


Figura 1 Statistica dei tempi di blocco del *software* dovuti a fattori esterni (1° e 3° caso nel testo). Nel box a sinistra è mostrata la distribuzione dei periodi di blocco (verde per blocchi superiori alla giornata; azzurro per blocchi di un solo giorno). Nel riquadro in alto, a destra, è mostrata la distribuzione in minuti dei 15 casi in cui il sistema ha subito un blocco giornaliero (box azzurro a sinistra).

Figure 1 Software block times statistics due to external factors (1° and 3° case). On the left side the total days of each block are shown (green for blocks longer than one day; blue for blocks lasting one day). On the right side is shown the minutes distribution, throughout the day, of the 15 blocks (blue box) that lasted for a single day.

Per l'intero periodo in analisi, il numero di stazioni in acquisizione è stato di 83: 56 appartenenti alla Rete Sismica Nazionale (IV-INGV) e 28 appartenenti alla Rete Accelerometrica Nazionale (IT-RAN). La sperimentazione ha riguardato il *software* presso la sezione di Milano, che acquisisce esclusivamente dati di una rete di monitoraggio composta da sole stazioni di tipo accelerometrico.

Ogni qualvolta il sistema rileva un evento, produce alcuni file di *output* tra cui il file *mail.log* contenente le principali informazioni sul possibile terremoto. Nel periodo in esame PRESTo ha prodotto 1562 file *mail.log* rilevando altrettanti potenziali eventi sismici.

Questi 1562 potenziali eventi presentano le seguenti caratteristiche "sospette":

- 1140 eventi hanno dato localizzazioni con profondità minore di zero (corrispondenti, di fatto, ad eventi localizzati in aria);
- 148 eventi risultano avere errore su localizzazione pari a zero e magnitudo uguale a zero.

Per quanto riguarda la magnitudo, (Figura 2, pannello a sinistra) gli eventi risultano così suddivisi:

- 36 eventi con $M_L \geq 6$;
- 47 eventi con $5 \leq M_L < 6$;
- 5 eventi con $4 \leq M_L < 5$;
- 527 eventi con $3 \leq M_L < 4$;
- 799 eventi con $0 < M_L < 3$;
- 148 eventi con $M_L = 0$.

Il catalogo PRESTo identifica 79 potenziali eventi ($M \geq 4.5$) per i quali si potrebbe diramare un'allerta. Come prima cosa si è proceduto ad effettuare un confronto con il catalogo dell'INGV [<http://terremoti.ingv.it/>, ultimo accesso 02/12/2021] per la medesima area ed il medesimo periodo.

Nello stesso periodo il catalogo INGV riporta 9788 eventi sismici con una magnitudo massima di 4 e. la seguente distribuzione (Figura 2, pannello a destra):

- 30 eventi con $M_L \geq 3$;
- 408 eventi con $2 \leq M_L < 3$;
- 5876 eventi con $1 \leq M_L < 2$;
- 3474 eventi con $0 \leq M_L < 1$.

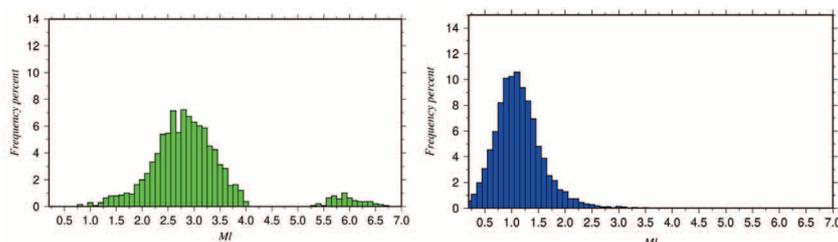


Figura 2 Distribuzione delle magnitudo dei due cataloghi. A sinistra: catalogo delle localizzazioni automatiche di PRESTo (istogramma verde); a destra: catalogo delle localizzazioni INGV (istogramma blu).

Figure 2 Magnitude distributions of the two catalogues. Left: automatic PRESTo localizations catalogue (green histogram); right: INGV localizations catalogue (blue histogram).

Ad una prima analisi si può notare come il catalogo PRESTo mediamente rilevi magnitudo più alte, essendo la sua distribuzione centrata intorno ad una M_L di ~ 2.7 mentre la distribuzione per il catalogo INGV risulta centrata su una M_L tra 0.7 e 1.2. Inoltre il catalogo PRESTo mostra una serie di eventi con magnitudo particolarmente elevata (tra 5.5 e 6.5) non presenti nel catalogo INGV che sono oggetto di indagine del presente lavoro in quanto potenziali eventi per un'allerta.

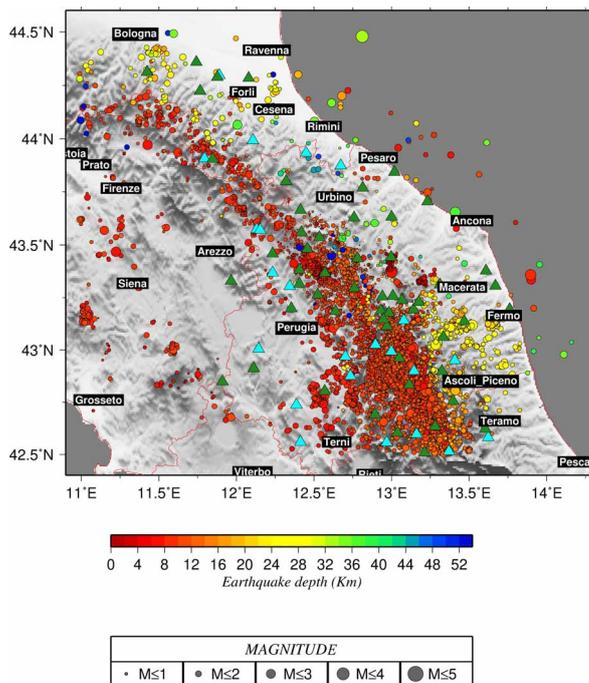


Figura 3 Distribuzione della sismicità del catalogo INGV per il periodo 30/07/2020-30/07/2021 in esame. I cerchi sono proporzionali alla magnitudo (ML) degli eventi; i colori rappresentano la profondità ipocentrale (rosso più superficiali, blu più profondi). Sono evidenziate le posizioni delle stazioni delle reti di monitoraggio acquisite presso il Centro Elaborazione Dati della sezione di Milano (triangoli verdi: rete IV-INGV; triangoli azzurri: rete IT-RAN).

Figure 3 INGV seismicity distribution for the examined period 30/07/2020-30/07/2021. The circles are proportional to the magnitude (ML) of the events; the colors represent the hypocentral depth (from the most superficial red to the deepest blue). The stations location of the monitoring networks, in the area, acquired by Data Processing Center of Milan, are also shown (green triangles: IV-INGV network; blue triangles: IT-RAN network).

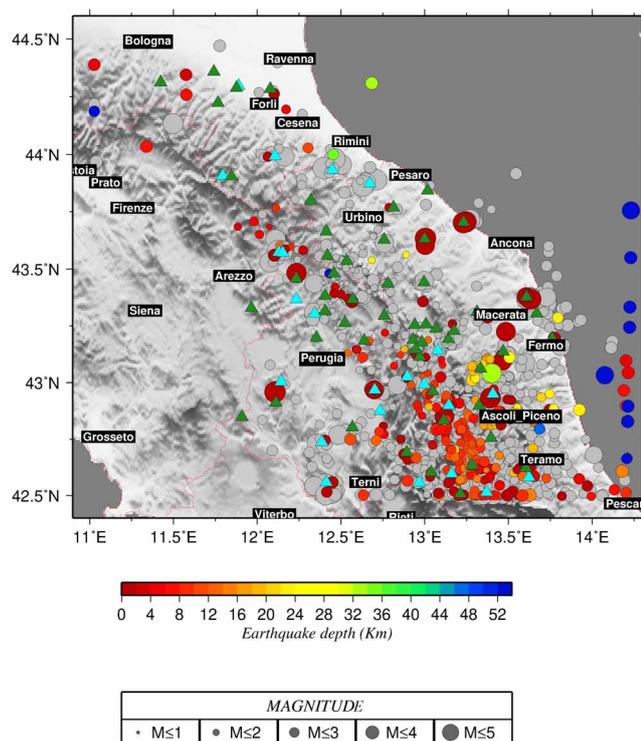


Figura 4 Distribuzione della sismicità del catalogo PRESTo nel periodo 30/07/2020-30/07/2021, in esame . I cerchi sono proporzionali alla magnitudo (ML) degli eventi; i colori rappresentano la profondità ipocentrale (rosso più superficiali, blu più profondi). Il colore grigio è associato alle localizzazioni di eventi con profondità fuori scala (localizzati in aria). Sono evidenziate le posizioni delle stazioni delle reti di monitoraggio acquisite presso il Centro Elaborazione Dati della sezione di Milano (triangoli verdi: rete IV-INGV; triangoli azzurri: rete IT-RAN).

Figure 4 PRESTo seismicity distribution for the period 30/07/2020-30/07/2021. The circles are proportional to the magnitude (ML) of the events; the colors represent the hypocentral depth (from the most superficial red to the deepest blue). The gray color is associated with localizations of events with depth out of range (located in the air). The stations location of the monitoring networks, in the area, acquired by Data Processing Center of Milan, are also shown (green triangles: IV-INGV network; blue triangles: IT-RAN network).

Le Figure 3 e 4 mostrano le distribuzioni delle stazioni della rete di monitoraggio utilizzata dal software (triangoli verdi rete IV-INGV; triangoli azzurri rete IT-RAN) e degli eventi dei cataloghi INGV e PRESTo, rispettivamente.

Dal catalogo INGV si può notare come la sismicità dell'area sia principalmente localizzata lungo l'arco appenninico e la profondità degli eventi aumenti man mano che ci si avvicina alla costa adriatica. La distribuzione del catalogo PRESTo, dove in grigio sono evidenziati tutti quegli eventi con profondità fuori scala (eventi in aria), pur mostrando un andamento simile a quello del catalogo INGV evidenzia anche una sismicità che si clusterizza, soprattutto nella zona a sud-est, lungo il bordo della griglia di calcolo. Questo, aggiunto ai valori anomali di profondità e magnitudo, suggerisce la presenza di numerosi falsi *trigger* o di eventi che, pur essendo reali e quindi giustamente triggerati, non vengono poi correttamente processati.

È importante segnalare che, nel caso dell'INGV, la fase di *trigger* e processamento dell'evento (stima di localizzazione, magnitudo, PGA e PGV) sono realizzate utilizzando anche stazioni velocimetriche o mediante il recupero postumo di segnali di stazioni non ricevute in tempo reale al momento dell'evento. Nell'effettuare un confronto tra i cataloghi occorre pertanto tener presente che potrebbero evidenziarsi discrepanze tra le due soluzioni anche in virtù di queste differenze.

3.1 Performance del software

Una volta assemblato il catalogo INGV per l'area ed il periodo in esame si è proceduto ad effettuare un primo confronto tra i due cataloghi verificando per quanti degli eventi del catalogo PRESTo fosse possibile trovare un riscontro e quindi classificarli come eventi sismici. L'analisi è stata realizzata ricercando una corrispondenza tra il tempo origine della localizzazione automatica PRESTo e quella INGV, utilizzando un intervallo di tolleranza di +/- 5 secondi.

Il confronto, come evidenziato anche in Figura 5, mostra che su 1562 eventi PRESTo (istogramma verde) in ben 1090 (istogramma giallo) casi si trova un riscontro nel catalogo INGV. Come si può notare dalla Figura 5, a destra, la maggior parte degli eventi con magnitudo anomala ($M_L \geq 5.0$) non trova invece riscontro (istogramma rosso) ad ulteriore conferma della loro natura di falsi *trigger*. In particolare, degli eventi che PRESTo cataloga con $M_L \geq 4.5$, solo due (con M_L 5.7 e 6.1) trovano corrispondenza (in termini di tempo origine) con due eventi INGV che però presentano M_L 1.0 e 0.9, rispettivamente.

Questo confronto suggerisce che il riscontro possa essere casuale oppure che, anche se questi eventi hanno innescato il *trigger*, il loro processamento non è avvenuto correttamente. Costituendo questi eventi potenziali fonti di allerta e non potendo, in tempo reale, assicurarsi della loro reale natura, occorre comprendere bene cosa determina la loro presenza nel catalogo ed, eventualmente, come sia possibile limitarne gli effetti in termini di falsa allerta.

Quanto osservato nel paragrafo precedente (Figura 2) relativamente ad una possibile sovrastima delle magnitudo da parte di PRESTo sembra confermato dal confronto tra i due cataloghi: la Figura 6 mostra infatti che nella corrispondenza 1 ad 1 tra eventi PRESTo ed eventi INGV, il sistema evidenzia una tendenza a sovrastimare le magnitudo in quanto la maggior parte dei cerchi blu si collocano nel quadrante superiore rispetto alla linea dello 0. Tale tendenza resta confermata anche dall'istogramma nel riquadro a destra che mostra la distribuzione delle differenze tra le due magnitudo ($M_{presto} - M_{ingv}$) per il medesimo evento: la distribuzione si posiziona in buona parte a destra della riga rossa tratteggiata che evidenzia lo zero ad indicare una predominanza di valori positivi e dunque di $M_{presto} > M_{ingv}$.

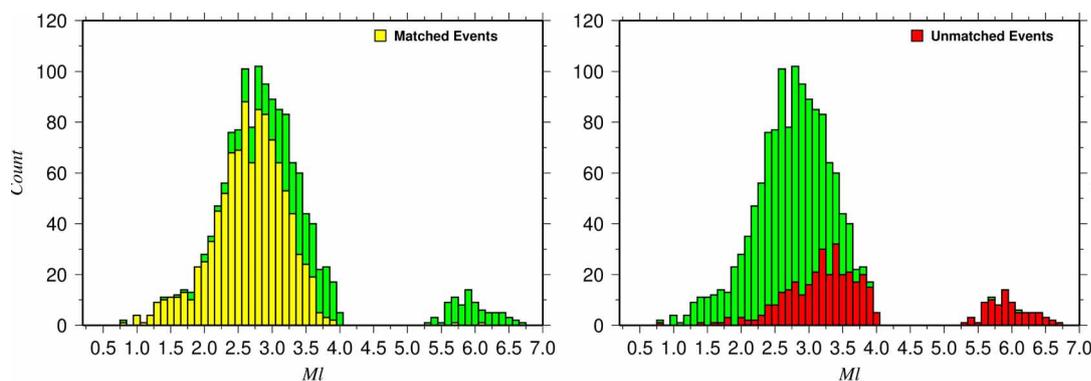


Figura 5 Distribuzione delle magnitudo del catalogo PRESTo. L'immagine a sinistra mostra la distribuzione delle magnitudo che trovano un riscontro con il catalogo INGV (istogramma giallo) rispetto al numero totale di eventi (istogramma verde). L'immagine a destra mostra la distribuzione delle magnitudo che non trovano riscontro nel catalogo INGV (istogramma rosso) rispetto alla medesima distribuzione (istogramma verde).

Figure 5 Magnitude distribution of the PRESTo catalogue. On the left side, the magnitude distribution with a correspondence in the INGV catalogue (yellow histogram) with respect to the total number of events (green histogram) is shown. On the right side, the magnitude distribution with no correspondence in the INGV catalogue (red histogram) compared to the same distribution (green histogram) is shown.

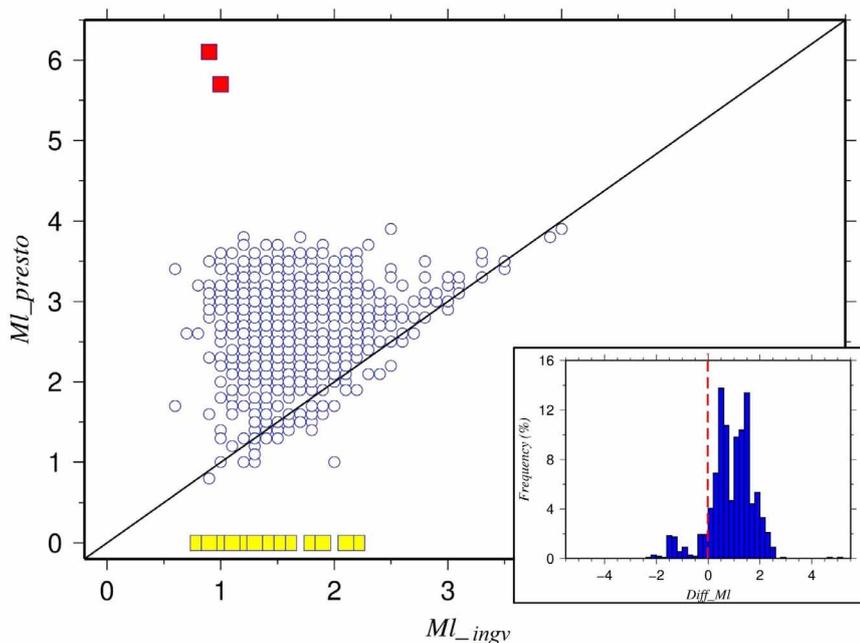


Figura 6 Confronto tra magnitudo PRESTo e INGV relative al medesimo evento. La predominanza di magnitudo al di sopra della linea dello zero indica una tendenza alla sovrastima da parte del sistema. I quadrati rossi e gialli evidenziano valori anomali di M_{presto} (magnitudo alte associate a basse magnitudo INGV e magnitudo nulle associate a magnitudo INGV non nulle, rispettivamente). Riquadro in basso a destra: distribuzione delle differenze tra le due magnitudo ($M_{presto}-M_{ingv}$). La distribuzione si posiziona in buona parte a destra della riga rossa tratteggiata (zero), ad indicare una predominanza di valori $M_{presto}>M_{ingv}$.

Figure 6 Comparison between PRESTo and INGV magnitude, related to the same event. The predominance of magnitude above the zero line indicates a tendency towards overestimation by the system. The red and yellow squares highlight outliers (high magnitude associated with low INGV magnitude and null magnitude associated with non-zero INGV magnitude, respectively). Bottom right box: distribution of the differences between the two magnitudes ($M_{presto}-M_{ingv}$). The distribution is positioned largely to the right of the dashed red line (zero), indicating a predominance of $M_{presto}>M_{ingv}$.

Nel paragrafo successivo particolare attenzione è stata rivolta all'analisi di alcuni casi particolari che sono stati evidenziati esaminando il catalogo generato da PRESTo, per comprenderne la natura, ovvero cosa ha attivato il sistema ed in che modo esso ha elaborato il dato. L'idea alla base delle analisi è quella di capire se sono il risultato di un errato processamento da parte del *software* o più semplicemente di una calibrazione non ancora completamente ottimizzata. Occorre sottolineare che nel periodo in esame, l'area non è stata interessata da forti terremoti per cui il catalogo INGV, come già evidenziato, presenta solo 30 eventi con $3.0 \leq M_L \leq 4.0$ (e dunque nessun evento potenzialmente da allerta in quanto, in generale, si considera una soglia $M_L \geq 4.5$). Di questi, 19 eventi sono stati rilevati anche da PRESTo e le stime di magnitudo e localizzazione da parte del *software* risultano in buon accordo con quelle del catalogo INGV, come è possibile notare dalla Tabella 2 in cui sono messe a confronto le due localizzazioni. Il buon accordo tra le localizzazioni è evidente anche dalla Figura 7 in cui, per ciascun evento (in ascissa numero progressivo associato all'evento) sono plottate, in ordinata, le differenze in tempo origine (in alto) e distanza epicentrale e profondità (i in basso). Tutti i valori in ordinata sono stati stimati effettuando la differenza tra i valori di PRESTo e quelli del catalogo INGV, mostrando in generale un ritardo nei tempi origine del sistema ed una sua tendenza a posizionare gli eventi più in superficie. Dal grafico in alto di Figura 7 si nota infatti che tutte le differenze nei tempi risultano positive, ad indicare un tempo origine di PRESTo in ritardo rispetto a quello INGV. Mentre il grafico in basso mostra come la maggior parte dei quadrati verdi risultano localizzati al di sotto dello zero ad indicare che la profondità di PRESTo è minore di quella del catalogo INGV. I quadrati azzurri, associati alla distanza epicentrale tra le due localizzazioni, evidenziano invece un allineamento lungo la linea dello zero, confermando il buon accordo tra le stime dei due cataloghi nella maggior parte dei casi esaminati.

Number EVENT	ORIGIN TIME PRESTo	LON	DLON	LAT	DLAT	DEPTH (km)	Dp (km)	MI	ORIGIN TIME INGV	LON	LAT	DEPTH (km)	MI
1	2020-08-16T23:15:54	13.2942	0.8	42.6645	0.5	11.08	1.6	3.2	2020-08-16T23:15:53	13.2982	42.6522	10.8	3.0
2	2020-08-22T10:50:08	13.3993	0.7	42.8155	1.0	16.87	2.0	3.3	2020-08-22T10:50:08	13.4117	42.8057	19.7	3.0
3	2020-08-27T02:46:28	12.9907	0.4	43.3574	0.7	0.57	2.8	3.3	2020-08-27T02:46:28	13.0027	43.3680	6.3	3.5
4	2020-08-27T15:09:43	13.2930	0.9	43.0204	0.4	22.66	1.4	3.2	2020-08-27T15:09:43	13.2860	43.0250	23.8	3.1
5	2020-08-27T17:15:37	13.2830	0.8	43.0112	0.9	20.83	2.5	3.5	2020-08-27T17:15:36	13.2935	43.0243	26.0	3.4
6	2020-10-10T17:11:11	13.2079	0.2	42.9095	0.2	4.68	1.6	3.2	2020-10-10T17:11:11	13.1987	42.9058	7.8	3.1
7	2020-12-02T18:02:48	13.2897	0.2	42.7017	0.6	12.30	1.9	3.3	2020-12-02T18:02:48	13.2852	42.6933	11.1	3.1
8	2020-12-21T01:22:58	13.5070	0.8	43.1118	0.8	26.62	1.9	3.5	2020-12-21T01:22:58	13.5207	43.1192	29.7	3.5
9	2021-01-27T21:46:08	13.7975	3.5	43.2856	2.2	23.57	7.5	3.4	2021-01-27T21:46:06	13.8973	43.3583	8.5	3.5
10	2021-01-28T01:21:28	13.7778	2.2	43.2951	1.4	25.40	4.2	3.1	2021-01-28T01:21:26	13.8997	43.3358	6.9	3.0
11	2021-03-03T08:02:06	12.4541	1.9	43.9998	4.0	34.85	5.2	3.3	2021-03-03T08:02:05	12.5033	44.0807	35.2	3.0
12	2021-04-18T17:26:00	13.0952	0.1	43.0244	0.1	3.46	1.3	3.3	2021-04-18T17:25:59	13.0923	43.0248	8.3	3.3
13	2021-05-15T07:56:02	12.5656	0.4	43.3564	0.6	1.03	3.1	3.8	2021-05-15T07:56:01	12.5662	43.3617	8.6	4.0
14	2021-05-15T08:07:21	12.5705	0.1	43.3595	0.7	1.03	2.0	3.1	2021-05-15T08:07:20	12.5645	43.3622	9.6	3.1
15	2021-06-07T07:51:15	11.9823	1.6	43.7087	1.1	5.45	3.8	2.9	2021-06-07T07:51:14	11.9648	43.7105	9.2	3.0
16	2021-06-27T13:27:17	12.5506	0.4	43.3687	0.4	1.94	1.1	3.0	2021-06-27T13:27:16	12.5538	43.3712	6.8	3.0
17	2021-07-11T10:56:24	12.6855	1.5	44.3093	4.4	33.63	4.9	3.9	2021-07-11T10:56:21	12.8108	44.4792	32.6	4.0
18	2021-07-16T08:00:50	13.0689	0.6	42.7925	0.3	8.06	1.7	3.6	2021-07-16T08:00:49	13.0677	42.7860	9.0	3.4
19	2021-07-22T14:06:23	12.5565	0.7	42.7499	0.3	11.08	1.4	3.5	2021-07-22T14:06:22	12.5588	42.7573	7.1	3.4

Tabella 2 Confronto tra le localizzazioni dei 19 eventi con $M_L \geq 3.0$ rilevati da PRESTo e presenti nel catalogo INGV. A partire da sinistra: tempo origine (Origin Time PRESTo), parametri ipocentrali con relativi errori (LON, DLON, LAT, DLAT, DEPTH, Dp) e M_L della localizzazione PRESTo. A destra: tempo origine (Origin Time INGV), parametri ipocentrali (LON, LAT, DEPTH) e M_L della localizzazione INGV.

Table 2 Comparison between the localizations of the 19 events with $M_L \geq 3.0$ detected by PRESTo and present in the INGV catalogue. Starting from the left: origin time (Origin Time PRESTo), hypocentral parameters with relative errors (LON, DLON, LAT, DLAT, DEPTH, Dp) and M_L of the PRESTo localization. On the right: origin time (Origin Time INGV), hypocentral parameters (LON, LAT, DEPTH) and M_L of the INGV location.

Per quanto riguarda gli altri eventi di $M_L \geq 3.0$ non rilevati dal sistema PRESTo:

- 9 sono assenti dal catalogo in quanto il sistema era in blocco e non ha processato i segnali in acquisizione;
- 2 invece non sono stati rilevati probabilmente perché con magnitudo 3.0 e localizzati al bordo della rete di monitoraggio. È quindi possibile che, pur essendo presenti dei trigger per

questi eventi non siano state poi soddisfatte le condizioni per la loro dichiarazione (vedi Tabella 1, sezione *Binder*).

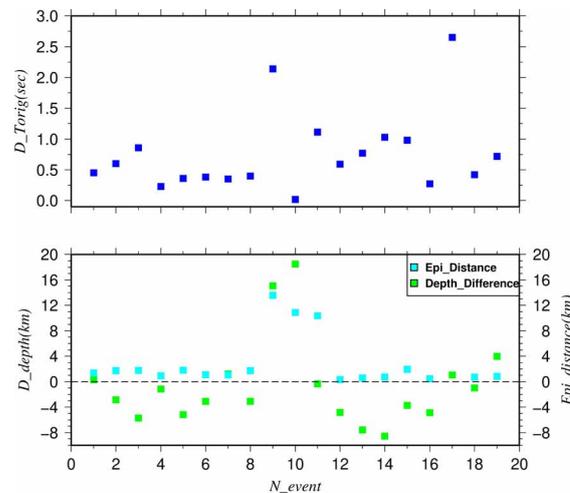


Figura 7 Grafico in alto: plot delle differenze nei tempi origini tra le stime di PRESTo e le stime INGV, per gli eventi di $M_L \geq 3.0$ comuni ad entrambi i cataloghi (in ascissa sono rappresentati i numeri progressivi associati agli eventi, Tabella 2). Grafico in basso: plot delle differenze tra le profondità di PRESTo e quelle INGV (quadrati azzurri) e delle distanze epicentrali (quadrati verdi) per i medesimi eventi.

Figure 7 Top: plot of the differences between the PRESTo and the INGV origin times, for events with $M_L \geq 3.0$, common to both catalogues (the progressive numbers associated with the events are represented on the abscissa, Table 2). Bottom: plot of the differences between the PRESTo and INGV depths (blue squares) and of the epicentral distances (green squares) for the same events.

3.2. Casi particolari

Come già accennato nel paragrafo precedente, nell'analizzare il catalogo di PRESTo sono stati evidenziati alcuni casi che destano perplessità o potrebbero costituire anomalie in vista di un futuro utilizzo in ambito early warning. In particolare:

1. 83 eventi del catalogo presentano $M_L \geq 4.5$, risultando quindi eventi per cui potenzialmente potrebbe essere diramata un'allerta. Di questi, solo due trovano riscontro, in termini di tempo origine, con eventi del catalogo INGV che però risultano avere magnitudo 1.0 e 0.9. Particolare attenzione si è prestata ad indagare sulle cause di valori così elevati di magnitudo e non giustificati;
2. 148 eventi presentano errori sulle localizzazioni pari a zero e M_L stimata pari a zero. In particolare in 64 casi si trova un riscontro tra questi eventi e quelli del catalogo INGV. Questi, pur non risultando un problema ai fini dell'early warning, costituiscono un caso su cui indagare perché potrebbero essere dovuti ad un errato processamento da parte del software o, eventualmente, qualora non risultassero effettivamente eventi, potrebbero indicare la presenza di un numero importante di falsi trigger in proporzione all'intero catalogo e dunque un problema nella calibrazione;
3. 1140 eventi presentano profondità negativa e dunque corrispondono ad eventi localizzati in aria. Di questi, 792 trovano riscontro con eventi del catalogo INGV e in 41 casi, in particolare, presentano anche errori sulla localizzazione e magnitudo pari a zero (caso 2). Poiché è impossibile che eventi sismici si presentino in aria, anche su questi casi si è deciso di effettuare delle indagini per capire se sono il risultato di un errato processamento da parte del software di eventi reali o falsi trigger.

Particolare attenzione si è rivolta all'analisi di questi tre casi perchè se nel primo caso magnitudo alte, senza un reale riscontro, risultano problematiche data la loro natura di potenziali allerte; inoltre tutti e tre i casi risultano essere sintomatici sia di un potenziale errato processamento dei dati da parte del sistema sia indicatori di possibili problemi di altra natura tra cui quello della perdita di informazione a seguito del processamento di fasi *trigger*.

Va sottolineato che tra i parametri all'interno del file di configurazione, vi è un parametro che setta il "tempo di inibizione", vale a dire la finestra temporale entro la quale il sistema non processa alcun segnale immediatamente dopo averne triggerato uno (parametro *binder_quakes_separation*). Questo significa che, anche in presenza di falsi *trigger*, il sistema potrebbe rimanere inibito e non processare un evento reale se questo si verificasse nella finestra temporale di inibizione.

Inoltre su 1562 eventi triggerati da PRESTo circa il 30% risultano già essere falsi *trigger* (non trovando riscontro nel catalogo INGV). Un ulteriore aumento del numero di falsi *trigger*, oltre a determinare la potenziale perdita di eventi che ricadono nella finestra temporale di inibizione, può ritenersi anche sintomatico di una configurazione del *software* non ancora correttamente ottimizzata.

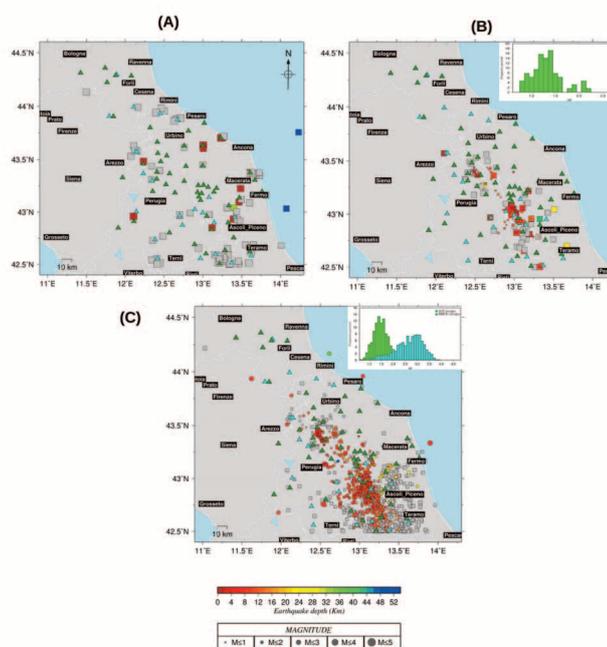


Figura 8 Distribuzione degli eventi del catalogo PRESTo e INGV per i tre casi particolari illustrati. A) Caso 1: eventi PRESTo con $M_L \geq 4.5$; non essendovi riscontro con il catalogo INGV la figura mostra solo le localizzazioni del sistema PRESTo. B) Caso 2: eventi con errori sulla localizzazione e magnitudo pari a zero e corrispondenti eventi del catalogo INGV. L'istogramma mostra la distribuzione delle magnitudo del catalogo INGV. C) Caso 3: eventi PRESTo con profondità negativa e corrispondenti eventi del catalogo INGV. L'istogramma mostra la distribuzione delle magnitudo di entrambi i cataloghi (verde: M_L INGV; azzurro: M_L PRESTo). Il colore grigio indica eventi localizzati in aria.

Figure 8 Event distributions of the PRESTo and INGV catalogue for the three special cases illustrated. A) Case 1: PRESTo events with $M_L \geq 4.5$; since there is no correspondence with the INGV catalogue, the figure only shows the automatic localizations. B) Case 2: events with errors on the localization and magnitude equal to zero and corresponding events of the INGV catalogue. The histogram shows the magnitude distribution of the INGV catalogue. C) Case 3: PRESTo events with negative depth and corresponding INGV events. The histogram shows the distribution of the magnitudes of both catalogues (green: M_L INGV; light blue: M_L PRESTo). The grey color indicates events located in the air.

3.2.1 - Caso 1

Del catalogo PRESTo 83 eventi presentano una $M_L \geq 4.5$, risultando quindi eventi per cui potenzialmente potrebbe essere diramata un'allerta. Di questi, solo due trovano riscontro, in termini di tempo origine, con eventi del catalogo INGV che risultano avere magnitudo 0.9 e 1.0, rispetto alle M_L 6.1 e 5.7 del catalogo PRESTo. La notevole differenza tra le magnitudo suggerisce che, almeno in questi due casi, la coincidenza sia puramente casuale.

Da notare che su 83 eventi ben 67 presentano profondità minori di zero, come risulta evidente anche dal numero elevato di quadrati grigi associati ad eventi localizzati in aria (Figura 8A). Questo suggerisce la possibilità, in prima istanza, di imporre un vincolo sulla profondità così da filtrare tali eventi, bloccando l'eventuale diramazione dell'allerta, fatta eccezione per 16 per i quali non è possibile applicare il medesimo criterio.

Focalizzandosi per il momento solo su questi ultimi, come prima cosa sono stati esaminati i file *mail.log*. Quello che si è potuto notare è che in 14 casi su 16, l'evento è stato rilevato e poi processato utilizzando un numero piuttosto esiguo di stazioni (tra 6 e 8). Inoltre quasi tutti questi eventi presentano diverse stazioni in comune (es. SSM1, FIU1, SEF1, GAG1, PIO1). Andando più in dettaglio sono stati esaminati i segnali delle sole stazioni che hanno piccato gli eventi. In ben 12 casi si è notata una peculiarità molto singolare che spiegherebbe perché il sistema ha dichiarato un evento stimando una magnitudo inspiegabilmente così alta: le stazioni "comuni" presentano tutte un segnale simile ad uno *spike*, perfettamente sincronizzato (box verde in Figura 9). Questo segnale, presente in tutti e 12 eventi ha innescato non solo il *trigger* ma, essendo mediamente presente su almeno 5 stazioni, ha permesso che fossero soddisfatte le condizioni per la dichiarazione dell'evento. La tabella di Figura 9 mostra che nelle stazioni di questi casi si riscontra inoltre una simultaneità dei *picking* delle fasi P, il che è inverosimile se teniamo conto che ci si riferisce a stazioni con interdistanza di circa 4 km.

Si è pertanto proceduto a realizzare alcune simulazioni per meglio comprendere perché tali segnali non fossero stati filtrati a priori dal sistema. Le simulazioni, i cui risultati non riportiamo per brevità, ci hanno permesso di verificare che, modificando il valore del parametro *picker_tUpEvent*, presente nella sezione *picker* del file di configurazione e portandolo a 0.5 secondi, gli eventi vengono in buona parte filtrati: il sistema li triggera ma poi non li dichiara come eventi e non li processa.

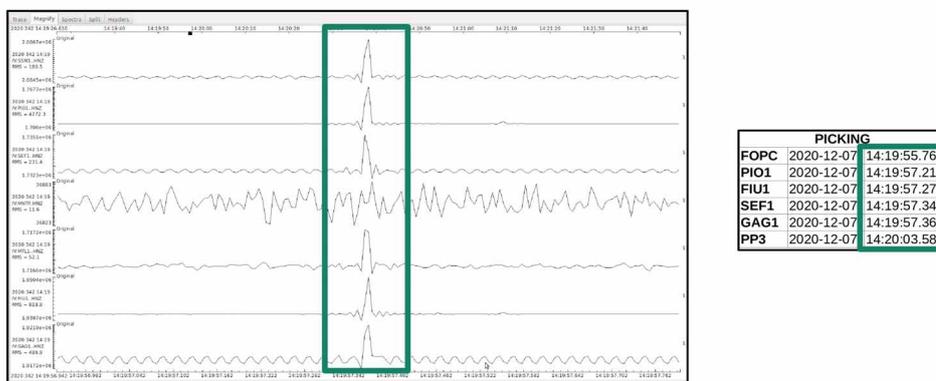
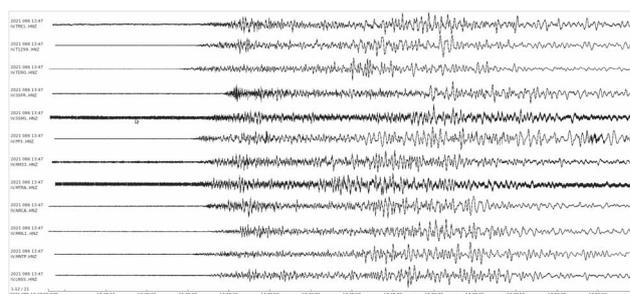


Figura 9 Segnale osservato in data 2020-12-07 11:34 UTC su alcune stazioni della rete e associato dal sistema ad un evento di con $M_L \geq 4.5$ e profondità maggiore di zero. Il segnale è presente sulle medesime stazioni in 12 casi dei 16 esaminati. La tabella riporta i *picking* delle prime stazioni del caso in esame.

Figure 9 Observed signal on 2020-12-07 11:34 UTC on some stations of monitoring network and associated by the software with an event of $M_L \geq 4.5$ and depth greater than zero. The signal is present on the same stations in 12 cases of the 16 examined. The table shows the picking deals at the first stations of the examined case.

Figura 10 Segnale registrato per l'evento del 27-03-2021 13:47:51 UTC di ML 5.6 e profondità di 11 km che presenta un numero elevato di *picking*. Si vede distintamente come quello registrato sia realmente un evento sismico di tipo regionale.

Figure 10 Signal recorded on the stations for the event of 03-27-2021 13:47:51 UTC of ML 5.6 and depth of 11 km which presents a high number of *picking*. It can be clearly seen that the one recorded is really a regional seismic event.



Come evidenziato in Tabella 2, questo parametro era stato testato in fase di calibrazione ma, limitandosi all'analisi di un *dataset* costituito esclusivamente da eventi reali, non ne era stata fatta evidenziata l'efficacia e l'impatto in caso di falsi *trigger*.

Negli altri 2 casi che presentano pochi *picking* i segnali risultano particolarmente rumorosi per cui è stato impossibile dare una spiegazione di cosa abbia effettivamente innescato il sistema. I due eventi in questione appaiono comunque con una profondità inferiore agli 800 m.

Gli ultimi 2 eventi dei 16 esaminati presentano invece un numero elevato di *picking* (28 e 36). Andando ad analizzare i segnali si è potuto notare distintamente che si tratta di terremoti ma non locali (Figura 10). Una ricerca più accurata nei cataloghi ha evidenziato che nel caso mostrato in Figura 10 si tratta di un evento presente sul catalogo INGV (27-03-2021 13:47:51 UTC) di ML 5.6 ma localizzato al largo del mare Adriatico, davanti alle coste della Croazia e che il sistema ha poi localizzato sulla Costa Marchigiana. Il secondo evento ha invece un riscontro nel catalogo CSEM (<https://www.emsc-csem.org/>[Godey et al., 2006]) con un evento (2020-11-01 13:15:42.3 UTC) di ML 4.6 localizzato in Croazia e che il sistema posiziona al largo del mare Adriatico ad una profondità di 73.8 km.

In quest'ultimi due casi ricadiamo in una problematica già nota nell'ambito dell'*early warning* e ancora ampiamente dibattuta, ovvero quella degli eventi fuori rete cioè eventi che, pur essendo ben al di fuori della rete di monitoraggio, vengono comunque rilevati e poi localizzati dal sistema all'interno dell'area di monitoraggio.

Ovviamente, dato il numero molto più elevato degli eventi con $ML \geq 4.5$ e profondità negativa (67) non è stato possibile realizzare un'analisi simile a quella appena esposta (simulazione e analisi delle singole forme d'onda). Andando però ad esaminare i file *mail.log* si è potuto osservare che:

- gli eventi presentano tutti un numero piuttosto basso di trigger, tra 5 e 11, con una predominanza di 6, 7 e 8 *picking* per evento (~82%). Tenendo conto che il sistema li classifica come eventi con $ML \geq 4.5$, questi dovrebbero essere risentiti su un'ampia area e dunque, salvo malfunzionamenti, essere rilevati da un numero molto più alto di stazioni;
- nei *picking* molto spesso appaiono le stazioni già evidenziate negli eventi precedenti. È presumibile pensare, data la stima elevata di magnitudo, che anche per questi eventi queste stazioni registrino un segnale tipo spike sincronizzato (Figura 9) che determina il trigger e la successiva dichiarazione di eventi con elevate magnitudo.

3.2.2 - Caso 2

Nel caso degli eventi con magnitudo ed errori di localizzazioni pari a zero con riscontro nel catalogo INGV (64 su 148), andando a visualizzare la distribuzione dei due cataloghi (Figura 8B; quadrati: eventi del catalogo PRESTo; cerchi: eventi del catalogo INGV) la prima cosa che si

evidenza è che la maggior parte degli eventi del catalogo INGV si localizza nella zona appenninica e dunque al centro della rete di monitoraggio utilizzata nelle analisi. Questi eventi sono caratterizzati da una magnitudo relativamente bassa (0.8 - 2.2) come si può notare anche dall'istogramma in alto a destra in Figura 8B che mostra la distribuzione delle magnitudo. Questo suggerisce che il sistema, pur essendo in grado di rilevare e dichiarare gli eventi proprio perché localizzati in posizione favorevole rispetto alla rete di monitoraggio, non è poi in grado di processarli correttamente probabilmente a causa della loro bassa magnitudo. Particolare attenzione era stata rivolta a questo aspetto in fase di calibrazione [Carannante et al., 2022], di modo che il *software* fosse in grado di triggerare e localizzare correttamente eventi sopra una certa soglia di interesse per l'*early warning* (orientativamente $M_L \geq 4.5$) risultando invece "sordo" ad eventi di bassa magnitudo.

Questo risultato suggerisce quindi la possibilità, come già accennato, che la calibrazione scelta non risulti ancora pienamente ottimizzata.

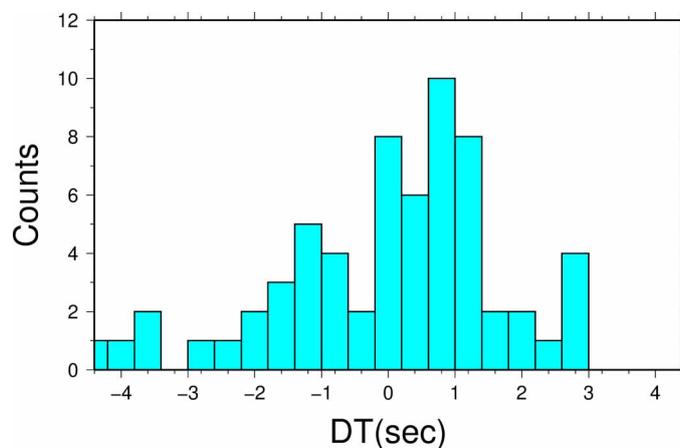


Figura 11 Stima della differenza tra il tempo origine di PRESTo e quello del catalogo INGV per gli eventi con $M_L=0$ ed errori pari a zero ($DT=T_{\text{presto}}-T_{\text{ingv}}$). Valori negativi di DT sono indicativi di un tempo origine di PRESTo antecedente a quello INGV.

Figure 11 Estimate of the difference between the PRESTo origin time and INGV catalogue time for events with $M_L=0$ and errors equal to zero ($DT=T_{\text{presto}}-T_{\text{ingv}}$). Negative values of DT indicate a PRESTo origin time sooner with respect to INGV one.

Il fatto che magnitudo ed errori pari a zero interessino principalmente eventi di bassa magnitudo fa ipotizzare che i medesimi problemi non affliggono eventi di magnitudo più elevata. Ne è conferma il fatto che per i 19 eventi del catalogo INGV con $M \geq 3.0$ (Tabella 2) gli errori di PRESTo sulla localizzazione siano accettabili e magnitudo e profondità ipocentrali siano consistenti con quelli stimati dall'INGV.

Effettuando ulteriori analisi sui 64 eventi con riscontro si è inoltre notato che:

- in 6 casi il tempo di processamento (inteso come la differenza tra il tempo di inizio dell'elaborazione ed il primo *picking*) risulta superiore a 30 secondi. Questo risultato rende questi eventi particolarmente sospetti e dunque ragionevolmente classificabili come falsi trigger in cui la coincidenza è puramente casuale;
- la differenza tra il tempo origine dell'evento stimato da PRESTo ed il corrispettivo del catalogo INGV oscilla principalmente in un intervallo tra -3 e 3 secondi (Figura 11) con più del 50% dei valori compresi in un intervallo (-1.2; 1.2). Questo suggerisce che, potenzialmente gli eventi triggerati siano eventi reali che il sistema non riesce a localizzare correttamente. Va sottolineato che differenze nel tempo origine tra i due cataloghi sono

comunque inevitabili se si tiene conto che le localizzazioni del catalogo INGV, in buona parte, sono ottenute mediante revisione manuale di dati velocimetrici e accelerometrici congiunti mentre quelle di PRESTo sono ricavate in maniera automatica esclusivamente da dati accelerometrici in *real time*;

- in 41 casi si trova una profondità negativa che rende le localizzazioni errate.

Tutte queste osservazioni risultano essere una conferma all'ipotesi che il sistema è in grado di rilevare questi eventi data la loro posizione favorevole ma non è in grado di analizzarli correttamente. Dato che il problema riguarda esclusivamente eventi di bassa magnitudo e che il risultato dell'analisi conduce a valori nulli della magnitudo da parte del sistema è possibile concludere che, in termini di *early warning*, questi casi non costituiscono un problema. Di contro maggiore attenzione deve essere rivolta alla calibrazione del sistema per limitare il numero di eventi triggerati con magnitudo sotto la soglia di interesse o di falsi *trigger*.

3.2.3 - Caso 3

In questo ultimo caso se si va ad esaminare la distribuzione dei 792 eventi che trovano riscontro nel catalogo INGV ma che il sistema PRESTo localizza con una profondità negativa, si possono osservare alcune peculiarità che rendono le localizzazioni sospette (Figura 8C).

Innanzitutto il riscontro è con eventi INGV che hanno una magnitudo media 1.5 e dunque bassa (come dimostra sia l'istogramma verde di Figura 8C sia la dimensione dei cerchi, proporzionali alla magnitudo). Inoltre, mentre gli eventi INGV sono per la maggior parte localizzati lungo la catena appenninica, buona parte degli eventi del catalogo PRESTo si clusterizzano o lungo i lati sud-est della griglia di calcolo o lontano dalla fascia appenninica. Questa distribuzione anomala può essere ascrivibile a due possibili cause:

- gli eventi del catalogo PRESTo corrispondono effettivamente a quelli con cui trovano riscontro nel catalogo INGV ma sono di fatto non correttamente processati così che i loro parametri ipocentrali (latitudine, longitudine e profondità) risultano errati. In questo caso si ricade nelle considerazioni già sostenute nel caso 2: parlando di eventi con M piccola, il *software* non è calibrato per la loro detezione e processamento per cui riesce a rilevarli perché sono nel centro della rete ma poi non riesce a completare correttamente l'analisi. Il motivo per il quale la maggior parte di questi eventi tenda a clusterizzarsi lungo i bordi della griglia di calcolo non è chiaro. Va però sottolineato che attualmente, il sistema utilizza un modello 1D per la localizzazione e nessun tipo di analisi è stata realizzata ancora per determinare l'influenza sulle localizzazioni dell'utilizzo di un modello 3D rispetto ad un modello 1D;
- gli eventi non sono realmente quelli presenti nel catalogo INGV e il fatto che vi sia un riscontro con il tempo origine costituisce una coincidenza. In questo caso, è plausibile pensare che a produrre il *trigger* non sia stato un evento sismico ma un evento transiente o un segnale di natura antropica con conseguente localizzazione dell'evento in aria proprio perché non naturale.

Ovviamente, parlando comunque di un catalogo di 792 eventi è ragionevole pensare che entrambe le casistiche (eventi mal localizzati e falsi *trigger*) possano presentare contemporaneamente.

Avendo constatato che il problema riguarda essenzialmente eventi del catalogo INGV sotto la soglia di una possibile allerta e che, come risulta evidente dall'istogramma azzurro (Figura 8C), anche i corrispettivi eventi PRESTo hanno magnitudo inferiori alla soglia di 4.5, se ne può dedurre che, come nel caso 2, questi eventi non costituiscono un reale problema in termini di allerta sismica.

3.3 La sequenza 2022 Costa Marchigiana Pesarese

Nel presente lavoro sono stati illustrati i risultati delle analisi della risposta di PRESTo relativa ad un anno di sperimentazione. Nel contempo è stato possibile esaminare anche il comportamento del *software* durante la sequenza sismica avvenuta lungo la costa marchigiana-pesarese nel periodo dal 09/11/2022 al 13/11/2022 (e dunque in una reale situazione di allerta rapida).

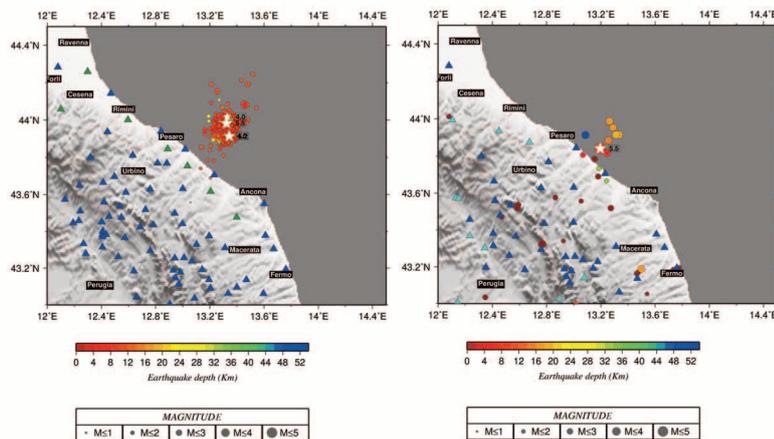


Figura 12 Pannello a sinistra: distribuzione degli eventi del catalogo INGV, relativi alla sequenza sismica, per i 4 giorni in esame. I colori indicano le profondità degli eventi mentre le dimensioni dei cerchi sono proporzionali alla M_L dell'evento. Le stelle indicano i 4 eventi con $M_L \geq 4.0$. I triangoli blu indicano le stazioni della IV-INGV mentre i triangoli verdi indicano le posizioni delle stazioni temporanee installate dal Gruppo Operativo INGV - SISMICO (SISMICO working group 2022) a seguito dell'emergenza. Pannello a destra: distribuzione degli eventi del catalogo PRESTo per il medesimo periodo, stessa convenzione per colore e dimensioni del catalogo INGV a sinistra. I triangoli blu indicano le stazioni della rete IV-INGV attualmente utilizzate da PRESTo, i triangoli azzurri quelli della rete IT-RAN.

Figure 12 Left panel - INGV catalogue events distribution, related to the seismic sequence, for the 4 examined days. The colors indicate the depths while the dimensions of the circles are proportional to the M_L of the event. The stars indicate the 4 events with $M_L \geq 4.0$. The blue triangles indicate the IV-INGV stations while the green triangles indicate the positions of the temporary stations installed by Gruppo Operativo INGV - SISMICO (SISMICO working group 2022) following the emergency. Right panel - distribution of PRESTo catalog events for the same period. Same convention for color and size. The blue triangles indicate the IV-INGV network stations currently used by PRESTo, the blue triangles those of the IT-RAN network.

La sequenza è proseguita oltre il periodo indicato ma al momento del lavoro abbiamo limitato l'analisi a questi 4 giorni poiché interessati dagli eventi di magnitudo più alta. Inoltre, tale intervallo di tempo è stato scelto anche perché il sistema ha subito un blocco con la conseguente perdita dell'evento di M_L 4.3 avvenuto il 20/11/2022 alle ore 05:20:30 (UTC).

Poiché il dataset su cui sono state effettuate le analisi precedenti non presenta eventi di $M_L \geq 4.0$, l'utilizzo dei dati relativi alla sequenza ha permesso di testare l'efficacia di PRESTo come sistema di *early warning* sismico. La sequenza ha infatti avuto inizio il 09/11/2022 con un evento alle ore 06:07:25 (UTC) di M_w 5.5 (M_L 5.7), a cui hanno fatto seguito alle 06:08:28 (UTC) un evento di M_L 5.2 e altri due eventi pari a M_L 4.0 (il 09/11/2022) e M_L 4.1 (il 10/11/2022) (fonte <http://terremoti.ingv.it/>). Limitandosi ad analizzare i soli eventi della sequenza, il catalogo INGV, nei 4 giorni analizzati, riporta un totale di 311 eventi (ultimo accesso 14/11/2022) con M_L nell'intervallo (0.9, 5.7) (Figura 12, sinistra).

A partire dal 28/09/2022 PRESTo ha lavorato in maniera continuativa, senza subire alcun blocco grafico e perdita di dati fino alla data del 16/11/2022. Questo ha permesso al sistema di registrare parte della sequenza, triggerando un totale di 46 potenziali eventi con $0 \leq M_L \leq 6.6$, (Figura 12, destra). Essendo la sequenza avvenuta in mare, la geometria della rete di monitoraggio che attualmente utilizza il *software* è poco idonea alla localizzazione di questa tipologia di eventi, essendo le stazioni di monitoraggio installate lungo la costa o nell'entroterra (triangoli in Figura 12). Nonostante ciò, ad una prima analisi, si è potuto già verificare che il sistema ha triggerato e correttamente localizzato l'evento di Mw 5.5 (09/11/2022 06:07:25 UTC): l'evento appare localizzato più vicino alla costa (stella in Figura 12, pannello a destra) ma con profondità (5.2 km) e magnitudo (M_L 5.5) stimati dal *software* consistenti con quelli del catalogo INGV (5.0 km, M_L 5.7). Effettuando la ricerca della coincidenza temporale tra i tempi origine di PRESTo e quelli INGV, utilizzando un intervallo di confidenza di ± 5 secondi, si trova un riscontro per 26 eventi di PRESTo, 17 dei quali appartengono alla sequenza. Il catalogo PRESTo presenta inoltre solo altri due eventi con $M \geq 4.0$ (un evento di M_L 6.6 e uno di M_L 4.0). Entrambi trovano riscontro con eventi del catalogo INGV ma con magnitudo inferiore (2.4 e 3.1, rispettivamente). Come già evidenziato nei paragrafi precedenti, il sistema nuovamente riesce a triggerare questi due eventi ma poi non li processa correttamente: gli eventi infatti non compaiono nella Figura 12 perchè, essendo l'immagine centrata sulla sequenza, sono di fatto localizzati fuori dall'area visualizzata. Per quanto riguarda gli eventi della sequenza con $M_L \geq 4.0$:

- l'evento del 09/11/2022 di M_L 5.2, avvenuto alle ore 06:08:28, ad appena 1 minuto dal primo, non è stato rilevato dal sistema. Ad una prima analisi del file mail.log, la causa sembrerebbe dovuta al tempo di inibizione; benchè questo tempo sia fissato attualmente a 30 secondi, immediatamente dopo l'evento principale, il sistema ha cominciato ad elaborare un secondo presunto evento (che però non è stato dichiarato come tale), finendo con l'essere temporaneamente inibito quando è giunto il secondo evento (reale) della sequenza;
- l'evento del 09/11/2022 di $M_L=4.1$, avvenuto alle ore 06:12:57 e ad un primo confronto non trova riscontro. Questo perché, andando meglio ad analizzare il catalogo PRESTo, si è notato che l'evento è stato triggerato dal sistema ma con un tempo origine la cui differenza rispetto al tempo INGV supera i 5 secondi di tolleranza prefissati. Le due localizzazioni non risultano comunque consistenti con l'evento posizionato in aria dal sistema;
- per l'evento del 10/11/2022 avvenuto alle 17:54:12: il sistema PRESTo lo ha rilevato. L'evento è classificato con $M_L=3.9$, latitudine e longitudine sono coerenti con quelle INGV ma l'evento è localizzato a 18 km di profondità contro i 6.4 km del catalogo dell'INGV.

In linea di principio tenendo conto che, dei due eventi da allerta rilevati dal sistema, uno (M_L 6.6) è risultato un evento mal processato (localizzato con profondità negativa) e l'altro (M_L 5.5) è effettivamente il primo evento della sequenza, localizzato correttamente, si può concludere che il sistema ha lavorato correttamente in termini di *early warning*.

4. Criticità del sistema PRESTo: discussione e conclusioni

Durante la fase di calibrazione di PRESTo descritta in Carannante et al. [2022] si erano già potute constatare le prime difficoltà legate principalmente alla gestione dei parametri che configurano il sistema e che rendono, di fatto, estremamente complessa la calibrazione e l'ottimizzazione dell'intero sistema. A questo va aggiunta l'incapacità del sistema di gestire i metadati delle stazioni: il *software* non è infatti in grado di ricostruire la storia strumentale ma deve essere premura dell'operatore inserire, manualmente, eventuali aggiornamenti. Se questo non dovesse avvenire e quindi il sistema elabora con dati errati o obsoleti relativi alla strumentazione questo potrebbe impattare sulla risposta del sistema.

Non di minor importanza è anche la problematica (almeno per quel che riguarda il sistema operativo su cui opera il *software* presso la sezione INGV di Milano) legata ai numerosi blocchi grafici che il sistema ha subito nell'anno di analisi e che hanno determinato la perdita di informazioni, tra cui il *trigger* di diversi eventi.

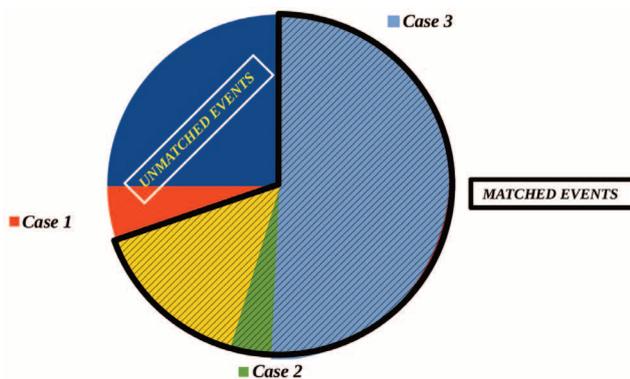


Figura 13 Sintesi della tipologia di eventi localizzati dal catalogo PRESTo.

Figure 13 Summary of the localized event typology from the PRESTo catalogue.

Il grafico di Figura 13, sintetizza quanto illustrato in questo lavoro. Come si può notare effettivamente la maggior parte degli eventi triggerati dal sistema PRESTo (~70%) trovano potenzialmente riscontro con eventi reali (parte contornata e tratteggiata in nero in Figura 13); di questi il 72.7% viene localizzato in aria (area azzurra) e una piccola parte, il 5.9% (area verde) si presenta con valori anomali ($ML=0$ e $ERR=0$). Circa il 30% degli eventi di PRESTo non trova riscontro e di questi il 17% (area arancione) si presenta con valori di $ML \geq 4.5$ e quindi potrebbero generare un'allerta.

Le osservazioni del presente lavoro confermano che il sistema in termini di *early warning* lavora correttamente rivelando buona parte degli eventi nell'area di studio e localizzando in maniera appropriata (in quanto la differenza tra le due localizzazioni PRESTo e INGV possono ritenersi consistenti).

Tanto più se si considera che dei casi anomali esaminati, il secondo ed il terzo non sembrano costituire un problema ai fini dell'allerta sismica in quanto le loro magnitudo restano comunque al di sotto della soglia di allerta e che, nel primo caso è possibile, eventualmente, filtrare la maggior parte di questi eventi o imponendo un vincolo a posteriori sulla profondità o calibrando meglio il sistema.

Restano comunque aperte alcune questioni che richiedono un maggior approfondimento:

- la presenza di un numero considerevole di eventi che sono o associabili ad eventi di bassa magnitudo o classificabili come *falsi trigger*. Questo induce a sospettare una calibrazione del sistema non ancora del tutto ottimizzata. Come già evidenziato questo porta il sistema a tempi di inibizione in fase di elaborazione che potrebbero determinare la perdita di eventi di maggior importanza;
- l'eventuale presenza e natura di falsi eventi dichiarati con una magnitudo superiore a quella di soglia che porterebbero alla diramazione di un'allerta;
- le cause che portano al blocco grafico con conseguente cessazione dell'elaborazione e perdita di informazioni/eventi;
- l'effetto di alcuni fattori (esempio modello 3D vs 1D, utilizzo anche di stazioni velocimetriche) sulle prestazioni del *software*.

Ringraziamenti

Si ringraziano i colleghi Alessandro Amato della Sezione INGV-ONT e Marco Massa della Sezione di Milano, responsabili del Progetto Premiale ART-IT, nell'ambito del quale è stato portato avanti

il seguente lavoro, per il supporto ed i preziosi consigli. Ringraziamo inoltre il collega Ezio D'Alema, della Sezione di Milano, per il supporto nella fase di gestione dell'acquisizione dei dati e per le numerose consulenze.

Bibliografia

- Alcik H., Ozel O., Apaydin N. and Erdik M., (2009). *A Study on Warning Algorithms for Istanbul Earthquake Early Warning System*, Geophys. Res. Lett., 36, L00B05, <https://doi.org/10.1029/2008GL036659>
- Allen R. M., Brown H., Hellweg M., Khainovski O., Lombard P. and Neuhauser D., (2009). *Real-time Earthquake Detection and Hazard Assessment by ElarmS across California*, Geophys. Res. Lett., 36, L00B08, <https://doi.org/10.1029/2008GL036766>
- Allen R. M. and Kanamori H., (2003). *The Potential for Earthquake Early Warning in Southern California*, Science, 300, 786–789, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12730599/>
- Amato A., Azzara R., Chiarabba C., Cimini G.B., Cocco M., Di Bona M., Margheriti L., Mazza S., Mele F., Selvaggi G., Basili A., Boschi E., Corboux F., Deschamps A., Gaffet S., Bittarelli G., Chiaraluce L., Piccinini D. and Ripepe M., (1998). *The 1997 Umbria-Marche, Italy, earthquake sequence: a first look at the main shocks and aftershocks*, Geophys. Res. Lett., 25, 2861–2864, <https://doi.org/10.1029/98GL51842>
- Böse M., Ionescu C. and Wenzel F., (2007). *Earthquake Early Warning for Bucharest, Romania: Novel and Revised Scaling Relations*, Geophys. Res. Lett., 34, L07302, <https://doi.org/10.1029/2007GL029396>
- Carannante S., Massa M., Amato A., D'Alema E., (2022). *Configurazione del sistema PRESTo per l'allerta rapida di eventi sismici (early warning sismico)*, Rapp. Tec. INGV, 455, 1-34, <https://doi.org/10.13127/rpt/455>
- Carranza M., Buforn E. and Zollo A., (2017). *Performance of a Network-Based Earthquake Early Warning System in the Ibero-Maghrebian Region*, Seismological Res. Lett., 88 (6), 1499–1507, <https://www.researchgate.net/publication/320749559>
- Chiarabba C., Amato A., Anselmi M., Baccheschi P., Bianchi I., Cattaneo M., Cecere G., Chiaraluce L., Ciaccio M. G., De Gori P., De Luca G., Di Bona M., Di Stefano R., Faenza L., Govoni A., Improta L., Lucente F. P., Marchetti A., Margheriti L., Mele F., Michelini A., Monachesi G., Moretti M., Pastori M., Piana Agostinetti N., Piccinini D., Roselli P., Seccia D. and Valoroso L., (2009). *The 2009 L'Aquila (Central Italy) Mw 6.3 earthquake: Main shock and aftershocks*, Geophysical Research Letters, 36, L18308, <https://doi.org/10.1029/2009GL039627>
- Chiaraluce L., Amato A., Carannante S., Castelli V., Cattaneo M., Cocco M., Collettini C., D'Alema E., Di Stefano R., Latorre D., Marzorati S., Mirabella F., Monachesi G., Piccinini D., Nardi A., Piersanti A., Stramondo S. and Valoroso L., (2014). *The Alto Tiberina Near Fault Observatory (northern Apennines, Italy)*, Ann. Geophys, 57, 3, <https://www.researchgate.net/publication/263472793>
- Chiaraluce L., Di Stefano R., Tinti E., Scognamiglio L., Michele M., Casarotti E., Cattaneo M., De Gori P., Chiarabba C., Monachesi G., Lombardi A., Valoroso L., Latorre D., Marzorati S., (2017). *The 2016 Central Italy seismic sequence: A first look at the mainshocks, aftershocks and source models*, Seismological Research Letters, 88(3), 757–771, <https://doi.org/10.1785/0220160221>
- Clinton J., Zollo A., Marmureanu A., Zulfikar C. and Parolai S., (2016). *State of the Art and Future of Earthquake Early Warning in the European Region*, Bull. Earthquake Eng, 14, 2441–2458, <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9922-7>
- Colombelli S., Amoroso O., Zollo A. and Kanamori H., (2012). *Test of a Threshold-Based Earthquake Early-Warning Method Using Japanese Data*, Bull. Seismological Soc. America, 102, 1266–1275, <https://doi.org/10.1785/0120110149>
- Colombelli S., Zollo A., Festa G. and Kanamori H., (2012b). *Early Magnitude and Potential Damage Zone Estimates for the Great Mw 9 Tohoku-Oki Earthquake*, Geophys. Res. Lett., 39, 22, <https://doi.org/10.1029/2012GL053923>

- Cua G., Fischer M., Heaton T. and Wiemer S., (2009). *Real-time Performance of the Virtual Seismologist Earthquake Early Warning Algorithm in Southern California*, Seismological Res. Lett., 80, 5, 740–747, <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.740>
- De Luca G., Cattaneo M., Monachesi G. and Amato A., (2009), *Seismicity in central and northern Apennines integrating the Italian national and national network*, Tectonophysics, 476, 121–135, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.11.032>
- Enferadi S., Shomali Z.H., Niksejel A., (2021). *Feasibility study of earthquake early warning in Tehran, Iran*, J Seismol (2021) 25, 1127–1140 (2021), <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10014-3>
- Erdik M., Fahjan Y., Ozel O., Alcik H., Mert A. and Gul M., (2003). *Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System*, Bull. Earthquake Eng., 1, 157–163, <https://doi.org/10.1023/A:1024813612271>
- Festa G., Picozzi M., Caruso A., Colombelli S., Cattaneo M., Chiaraluce L., Elia L., Martino C., Marzorati S., Supino M. and Zollo A., (2018). *Performance of Earthquake Early Warning Systems during the 2016–2017 Mw 5–6.5 Central Italy Sequence*, Seism. Res. Lett., 89, 1, 1–12, <https://doi.org/10.1785/0220170150>
- Galasso C., Zuccolo E., Aljawhari K., Cremen G., Melis N.S., (2023). *Assessing the potential implementation of earthquake early warning for schools in the patras region, Greece*, International Journal of Disaster Risk Reduction, 90, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103610>
- Godey S., Bossu R., Guilbert J. and Mazet-Roux G., (2006). *The Euro-Mediterranean bulletin: a comprehensive seismological bulletin at regional scale*, Seism. Res. Lett., 77, 460–474, <https://doi.org/10.1785/gssrl.77.4.460>
- Gorini A., Nicoletti M., Marsan P., Bianconi R., De Nardis R., Filippi L., Marcucci S., Palma F. and Zambonelli E., (2010). *The Italian Strong Motion Network*, Bull. Earthquake Eng., 8, 1075–1090, <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9141-6>
- Hsiao N.-C., Wu Y.-M., Shin T.-C., Zhao L. and Teng T.-L., (2009). *Development of Earthquake Early Warning System in Taiwan*, Geophys. Res. Lett., 36, 5, L00B02, <https://doi.org/10.1029/2008GL036596>
- Iannaccone G., Zollo A., Elia L., Convertito V., Satriano C., Martino C., Festa G., Lancieri M., Bobbio A., Stabile T.A., Vassallo M. and Emolo A., (2010). *A prototype system for earthquake early warning and alert management in southern Italy*, Bull. Earthquake Eng., <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9131-8>
- Kohler M.D., Smith D.E., Andrews J., Chung A.I., Hartog R., Henson I., Given D.D., de Groot R., Guiwits S., (2020). *Earthquake Early Warning ShakeAlert 2.0: Public Rollout*, Seismol. Res. Lett., 91, 3, 1763–1775, <https://doi.org/10.1785/0220190245>
- Ladina C., Marzorati S., Amato A. and Cattaneo M., (2021). *Feasibility Study of an Earthquake Early Warning System in Eastern Central Italy*, Front. Earth Sci., 9, 685751, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.685751>
- Lancieri M. and Zollo A., (2008). *A Bayesian approach to the real-time estimation of magnitude from the early P and S wave displacement peaks*, J. Geophys. Res., 113, B12302, <https://doi.org/10.1029/2007JB005386>
- Lomax A., Virieux J., Volant P. and Berge C., (2000). *Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations*, in Advances in Seismic Event Location Thurber, C.H., and N. Rabinowitz (eds.), Kluwer, Amsterdam, 101-134, https://doi.org/10.1007/978-94-015-9536-0_5
- Lomax A. and Curtis A., (2001). *Fast, probabilistic earthquake location in 3D models using Oct-tree importance sampling*, Geophys. Res. Abstr., 3, 955, <https://www.researchgate.net/publication/302951135>
- Lomax A., Satriano C. and Vassallo M., (2012). *Automatic picker developments and optimization: FilterPicker—A robust, broadband picker for real-time seismic monitoring and earthquake early warning*, Seismol. Res Lett., 83, 3, 531–540, <https://doi.org/10.1785/gssrl.83.3.531>
- Massin F., Clinton J. F. and Böse M., (2021). *Status of Earthquake Early Warning in Switzerland*, Front. Earth Sci., 9, 707654, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.707654>

- Nof R.N., Lior I. and Kurzon I., (2021). *Earthquake Early Warning System in Israel—Towards an Operational Stage*, *Front. Earth Sci.*, 9, 684421, <https://doi.org/10.3389/feart.2021.684421>
- Odaka T., Ashiya K., Tsukada S., Sato S., Ohtake K. and Nozaka D., (2003). *A New Method of Quickly Estimating Epicentral Distance and Magnitude from a Single Seismic Record*, *Bull. Seismological Soc. America* 93, 1, 526–532, <https://doi.org/10.1785/0120020008>
- Olivieri M., Allen R.M. and Wurman G., (2008). *The potential for earthquake early warning in Italy using ElarmS*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 1, 495–503., <https://doi.org/10.1785/0120070054>
- Picozzi M., Zollo A., Brondi P., Colombelli S., Elia L. and Martino C., (2015). *Exploring the Feasibility of a Nationwide Earthquake Early Warning System in Italy*, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 4, <https://doi.org/10.1002/2014JB011669>
- Satriano C., Elia L., Martino C., Lancieri M., Zollo A. and Iannaccone G., (2011). *PRESTo, the Earthquake Early Warning System for Southern Italy: Concepts, Capabilities and Future Perspectives*, *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 31, 2, 137–153, <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.008>
- Satriano C., Lomax A. and Zollo A., (2008). *Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning*, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 98, 3, 1482–1494, <https://doi.org/10.1785/0120060159>
- SISMIKO working group, (2022). *Rapporto di sintesi del Gruppo Operativo SISMIKO a seguito del terremoto al largo della costa marchigiana settentrionale (Italia). MW 5.5 del 09-11-2022 ore 06:07 UTC*. Pubblicato il 06/12/2022, <http://hdl.handle.net/2122/15811>
- Suarez G., Novelo D., and Mansilla E., (2009). *Performance Evaluation of the Seismic Alert System (SAS) in Mexico City: A Seismological and a Social Perspective*, *Seismological Res. Lett.*, 80, 5, 707–716, <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.707>
- RAN-IT. Presidency of Council of Ministers - Civil Protection Department., (1972). *Italian Strong Motion Network [Data set]*. *International Federation of Digital Seismograph Networks*, <https://doi.org/10.7914/SN/IT>
- RSN-IV. INGV Seismological Data Centre, (2006, January 1). *Rete Sismica Nazionale (RSN)*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Italy. <https://doi.org/10.13127/SD/X0FXNH7QFY>
- Velazquez O., Pescaroli G., Cremen G. and Galasso C., (2020). *A Review of the Technical and Socio-Organizational Components of Earthquake Early Warning Systems*. *Front. Earth Sci.*, 8, 533498, <https://doi.org/10.3389/feart.2020.533498>
- Wu Y.-M. and Teng T. L., (2002). *A Virtual Subnetwork Approach to Earthquake Early Warning*, *Bull. Seismological Soc. America*, 92, 5, 2008–2018, <https://doi.org/10.1785/0120010217>
- Zollo A., Amoroso O., Lancieri M., Wu Y. M. and Kanamori H., (2010). *A Threshold-Based Earthquake Early Warning Using Dense Accelerometer Networks*, *Geophys. J. Int.*, 183, 963–974, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04765.x>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

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

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

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

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

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

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

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

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

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

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

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

Coordinamento editoriale

Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione

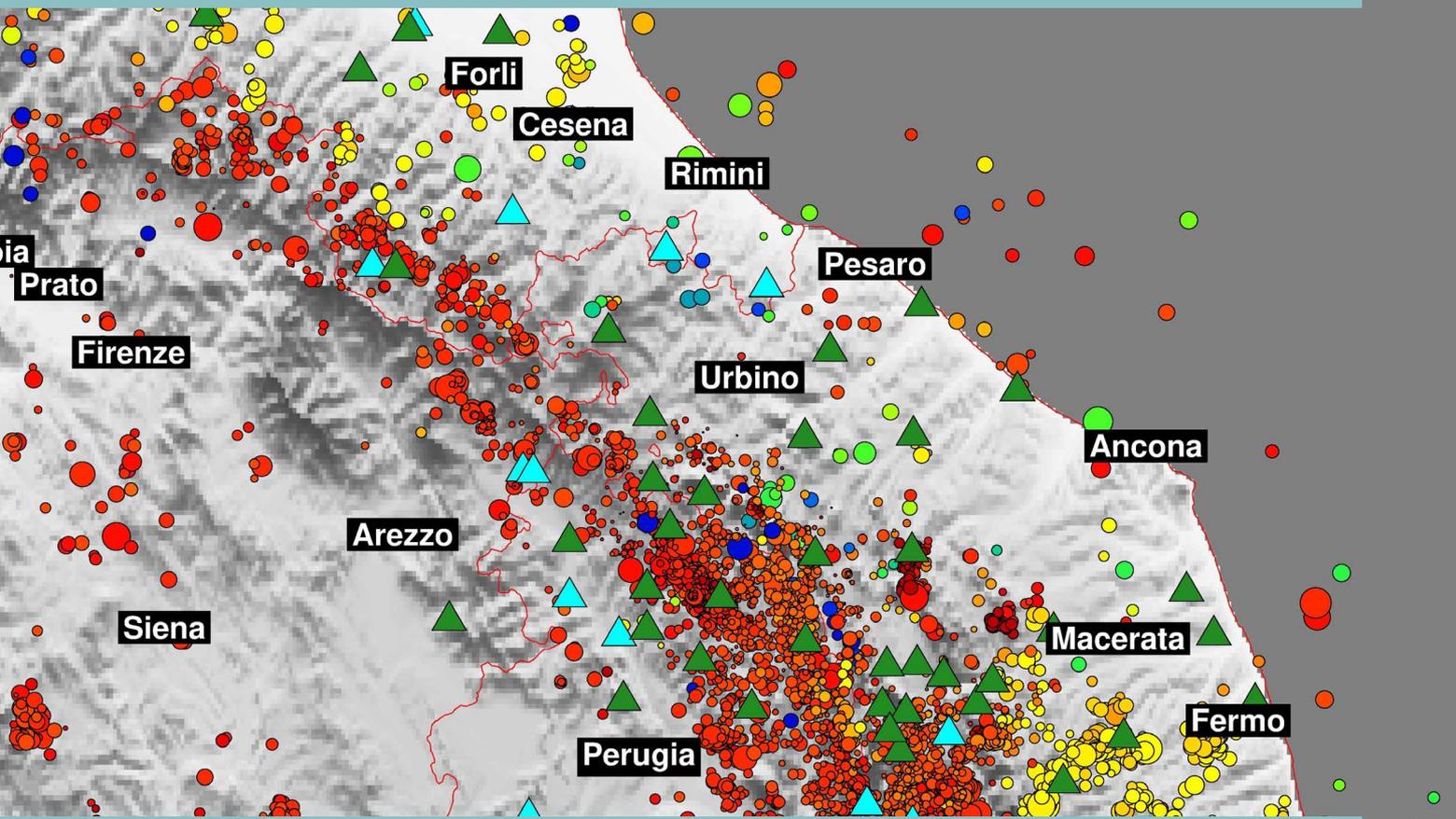
Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2023
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

