



**Accordo tra Arpa Piemonte e Università degli Studi  
di Genova - Dipartimento di Scienza della Terra,  
dell'Ambiente e della Vita**

**“Sviluppo dei sistemi di monitoraggio e analisi della sismicità regionale  
nell'ambito delle attività previste nel progetto RISVAL”**

*Relazione attività svolte  
(DICEMBRE 2020)*

**Relazione Finale**

***Responsabile Scientifico:***  
*Prof. Spallarossa D.*

***Personale DISTAV***  
*Ferretti G., Scafidi D., Barani S., Turino C.*

## **Premessa**

In attuazione dell'Intesa tra la Arpa Piemonte e il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DISTAV) dell'Università degli Studi di Genova, per la collaborazione reciproca nell'ambito del progetto RISVAL le attività di ricerca hanno riguardato i seguenti temi:

- A. Revisione dei meccanismi focali in Italia Nord Occidentale ed area Interfrontaliera;
- B. Revisione del catalogo sismico e validazione modelli di velocità.
- C. Momento sismico ed energia

## **Attività A: Meccanismi focali**

Nell'ambito dell'attività svolta nel progetto RISVAL, sono stati selezionati 25 terremoti registrati tra il 2014 e il 2018 per cui è stato possibile calcolare il meccanismo focale. Questi terremoti hanno una  $M_L \geq 3.0$  (Tabella 1).

Per garantire una buona copertura azimutale delle stazioni sismiche che hanno registrato i terremoti sopracitati, sono state integrate tutte le forme d'onda a disposizione, registrate da:

- Rete Sismica Regionale dell'Italia Nord-occidentale (RSNI) dell'Università degli Studi di Genova (<http://www.ditav.unige.it/rsni/>)
- Osservatorio Nazionale Terremoti (ONT) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (<http://cnt.rm.ingv.it/>)
- Swiss Seismological Service (SED) dell'ETH di Zurigo (Svizzera)
- RESIF – Réseau Sismologique et géodésique Français

Per ciascun evento sismico sono state estratte le forme d'onda registrate dalle stazioni sismiche posizionate entro 150 km dall'epicentro. Le forme d'onda sono state scaricate dall'archivio EIDA (European Integrated Data Archive; <https://www.orfeus-eu.org/data/eida/>), che distribuisce i dati sismici registrati dalle reti sopra menzionate.

La determinazione dei tempi di arrivo delle fasi P ed S (phase picking) è stata effettuata manualmente utilizzando una Graphic User Interface (GUI) specificatamente dedicata all'interpretazione dei segnali sismici. Indicativamente, per tutti gli eventi selezionati è stato

possibile interpretare i segnali registrati dalle stazioni ubicate entro 150 km dall'epicentro. Generalmente per localizzare correttamente un evento sismico, si considerano segnali registrati dalle stazioni entro 100 km, ma per i terremoti più forti e per registrazioni con elevato rapporto segnale/disturbo, la lettura dei tempi di primo arrivo è stata effettuata anche per stazioni di registrazione a distanze maggiori. La distanza massima alla quale si può arrivare per la determinazione dei tempi di arrivo dipende, infatti, non solo dalla magnitudo dei terremoti ma anche dal rapporto segnale/disturbo specifico per ciascuna stazione. Ad ogni fase sismica è stato associato un "peso" che ne determina la qualità e che viene utilizzato dalla procedura di localizzazione. Infine, ove possibile, è stata interpretata la polarità (UP o DOWN) del primo arrivo sulla componente verticale delle registrazioni sismiche. Questo dato è stato impiegato per la determinazione dei meccanismi focali di questi terremoti.

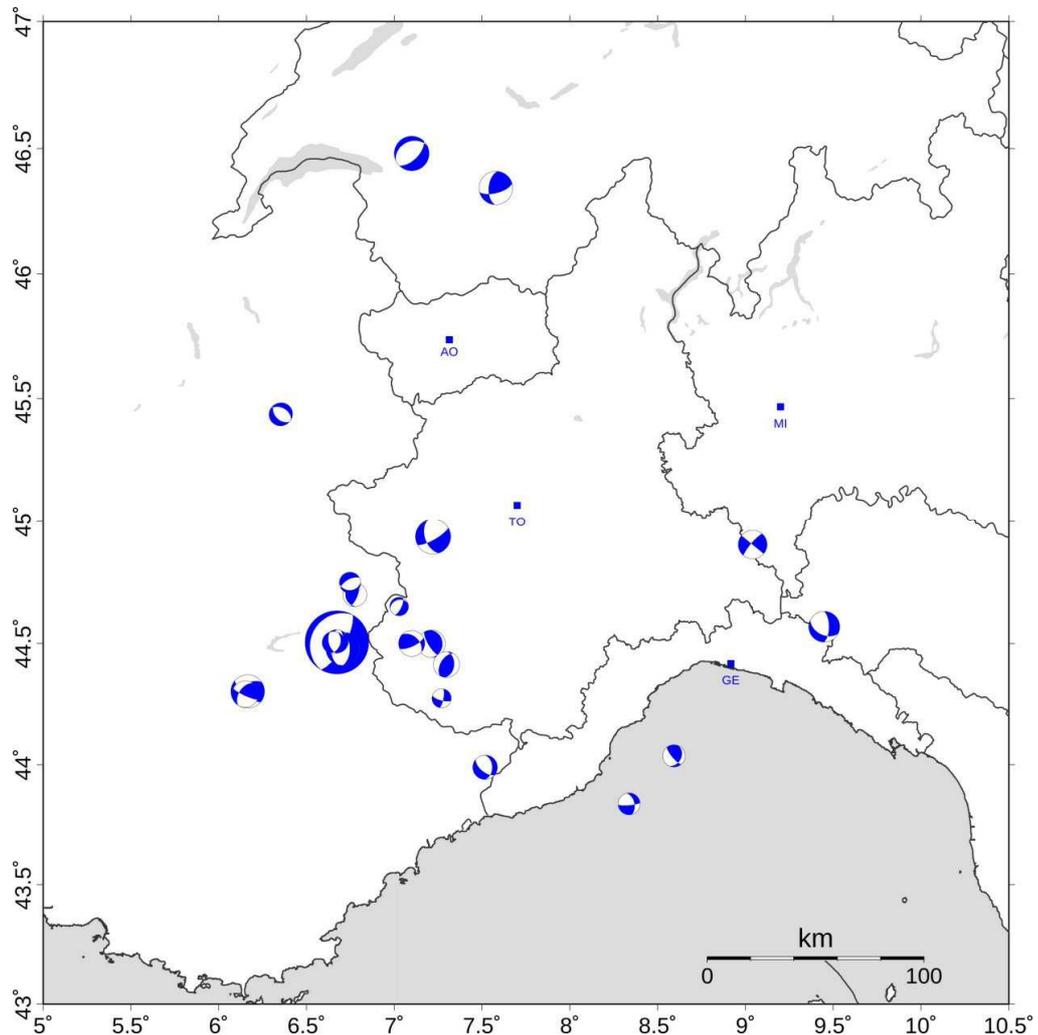
Per quanto concerne la localizzazione dei terremoti, è stato impiegato il programma Non Linear Localization – NonLinLoc (Lomax, 2001), il quale affronta il problema della localizzazione di un terremoto secondo un approccio di tipo probabilistico. I vantaggi di questo programma, adottato da molti laboratori a livello mondiale, risiedono 1) nell'uso di un algoritmo di calcolo non lineare che garantisce soluzioni ipocentrali più affidabili nonché una stima più accurata degli errori ad essi associati (utili per studi sismotettonici di dettaglio) e 2) nella possibilità di utilizzare un modello tridimensionale di velocità delle onde sismiche per la crosta terrestre (che ne approssima meglio la reale struttura). Il modello tomografico tridimensionale che è stato utilizzato per questo studio, è quello correntemente in esercizio presso il Laboratorio di Sismologia dell'Università di Genova che gestisce la rete RSNI. Per ottenere tale modello di velocità è stato utilizzato l'algoritmo di inversione numerica Simulps 14 (Thurber, 1983).

Contestualmente alla localizzazione, è stata calcolata la magnitudo locale ( $M_L$ ) di ciascun terremoto selezionato, così da ottenere un catalogo omogeneo sia per quanto concerne le soluzioni ipocentrali che i valori di magnitudo. A tal scopo è stata impiegata la legge calibrata per il nord Italia da Spallarossa et al. (2002).

Il software utilizzato per il calcolo dei meccanismi focali è FPFIT (Reasenberg & Oppenheimer, 1985). Il programma di calcolo elabora le soluzioni focali (due per ogni evento) a partire dalle polarità dei primi impulsi delle onde P (verso l'alto o verso il basso) individuati sulle registrazioni di uno stesso terremoto registrato da più stazioni.

<b>DATA</b>	<b>LATITUDINE</b>	<b>LONGITUDINE</b>	<b>PROFONDITÀ (km)</b>	<b>MAGNITUDO (M<sub>L</sub>)</b>
2014-04-03 10:33:25	44.016	8.606	8.39	3.4
2014-04-07 19:26:59	44.508	6.677	6.00	4.9
2014-06-12 11:46:48	44.698	6.775	5.60	3.5
2014-06-22 01:32:14	44.508	6.672	6.00	3.5
2014-07-13 10:05:40	44.492	7.213	4.06	3.7
2014-07-14 03:09:25	44.503	6.654	7.40	3.4
2014-11-30 09:34:25	44.568	9.454	6.0	3.9
2014-12-06 17:40:40	44.880	9.020	11.0	3.8
2015-11-06 04:03:03	44.478	6.706	6.00	4.0
2015-12-31 20:42:00	44.748	6.748	4.10	3.3
2016-03-14 13:36:11	44.413	7.296	6.00	3.6
2016-07-30 20:21:38	44.949	7.196	5.57	4.0
2016-09-03 19:14:54	43.968	7.527	4.40	3.5
2016-10-08 21:37:19	43.836	8.338	9.80	3.4
2016-10-24 14:44:10	46.333	7.598	10.00	4.0
2016-11-09 15:35:11	44.294	6.151	3.75	3.7
2016-11-10 02:48:13	44.302	6.165	8.00	4.0
2016-11-11 05:38:55	44.653	7.048	3.00	3.1
2017-04-08 09:52:34	44.274	7.270	11.60	3.2
2017-07-01 08:10:34	46.440	7.130	7.00	4.0
2017-10-25 03:41:16	43.438	6.357	10.8	3.4
2017-10-27 01:09:50	45.366	6.352	9.70	3.4
2018-02-18 04:47:22	43.500	6.650	20.0	3.3
2018-07-17 18:13:44	44.496	7.107	8.00	3.6
2018-11-21 17:08:54	46.137	5.029	1.83	3.8

**Tabella 1** – Elenco degli eventi sismici con relativa localizzazione e magnitudo locale per cui è stato possibile calcolare il meccanismo focale.



**Figura 1** – Rappresentazione in mappa dei meccanismi focali calcolati.

In figura 1 vengono mostrati i meccanismi focali calcolati in questo studio. Alcuni di questi meccanismi focali sono stati confrontati con le soluzioni focali ottenute tramite una inversione delle forme d'onda (FMNEAR) (Delouis, 2014). Il metodo FMNEAR si basa sia su un'inversione delle forme d'onda delle registrazioni sismiche vicine alla sorgente sia su un modello lineare a sorgente finita. I parametri della sorgente che vengono determinati sono l'ampiezza del momento sismico ( $M_w$ ), il meccanismo focale a doppia coppia (strike, dip e rake) e la distribuzione del momento sismico lungo lo strike, che fornisce una stima della lunghezza e della direttività della rottura. Viene anche fornita una stima della profondità della sorgente. Un

vantaggio di questa metodologia risiede nel fatto che il modello a sorgenti finite viene utilizzato direttamente all'interno della ricerca del calcolo del meccanismo focale.

Il confronto dei meccanismi ottenuti tramite il software FPFIT e di quelli ottenuti con FMNEAR ha mostrato un buon accordo delle soluzioni focali, indice di una buona stabilità del risultato.

## **Attività B: Catalogo Sismico**

### Premessa

L'attività di ricerca è stata indirizzata a sviluppare delle ricerche utili alla verifica e validazione delle procedure di localizzazione degli eventi sismici attualmente in utilizzo presso il CED del Laboratorio di Sismologia del Distav. Le procedure in utilizzo nelle attività di routine relative alla revisione manuale della attività sismica in Italia Nord Occidentale prevedono un picking manuale delle fasi sismiche (di norma questa attività viene condotta da personale esperto) e una localizzazione degli eventi utilizzando il software *NonLinLoc* (Lomax et al. 2000). *NonLinLoc*, è un codice di inversione dei tempi di arrivo delle fasi *P* e *S*, per il cui funzionamento è necessario disporre di un modello di velocità. Attualmente le tutte le procedure di localizzazione attive presso il Laboratorio di Sismologia del Distav utilizzano un modello di propagazione 3D che è stato sviluppato solo negli ultimi anni nell'ambito di specifici progetti di ricerca sviluppati per lo studio del sistema crosta/mantello in Italia Nord Occidentale.

*NonLinLoc* è basato su un approccio probabilistico non lineare volto alla minimizzazione della norma 1 dei residui dei tempi di percorrenza e all'ottenimento di una soluzione completa del problema di localizzazione, comprensiva di informazioni relative alle incertezze. Il codice di calcolo permette, tramite la modellazione del sistema investigato attraverso una griglia tridimensionale di nodi e adottando una tecnica di ricerca su griglia dei parametri incogniti, di effettuare un'efficiente ricerca globale dello spazio dei parametri; ciò consente di ottenere una stima della funzione densità di probabilità a posteriori, che fornisce una descrizione dettagliata e completa della localizzazione e delle sue incertezze (Goldberg, 1989; Whitley, 1994). A partire dai tempi di arrivo delle fasi sismiche alle diverse stazioni e dal modello di velocità, vengono calcolati i tempi di percorrenza impiegati dalle onde sismiche a collegare ogni nodo della griglia alle stazioni che costituiscono la rete sismica. I parametri ipocentrali si ottengono attraverso la ricerca, nella griglia, dei nodi che restituiscono il miglior accordo (ovvero la minimizzazione della funzione di *misfit*) tra i dati osservati e quelli calcolati. Altri parametri rilevanti che concorrono all'ottimale descrizione del sistema fisico sono rappresentati dalle coordinate delle stazioni, ipotizzate sufficientemente accurate da poter essere trattate come costanti, e i parametri

che definiscono la struttura di velocità, anch'essi considerati costanti.

La procedura di localizzazione attualmente in uso presso il Laboratorio di Sismologia del Distav, che viene utilizzata sia dal sistema automatico di detezione e qualificazione degli eventi sismici (attivo h24) sia nell'ambito della revisione manuale, è stata tuttavia resa completamente funzionante ed operativa solo negli ultimi anni: l'elaborazione sia manuale che automatica degli eventi sismici registrati dalla Rete sismica Dell'Italia Nord Occidentale (RSNI) nell'ultimo decennio è stata quindi condotta utilizzando sistemi di interpretazione/analisi non omogenei. Nello specifico, nel recente passato la procedura di localizzazione veniva effettuata utilizzando il codice di calcolo Hypoellipse [Lahr, 1999] che nella sua specifica configurazione prevedeva una parametrizzazione del modello di velocità a strati paralleli

### Attività e risultati

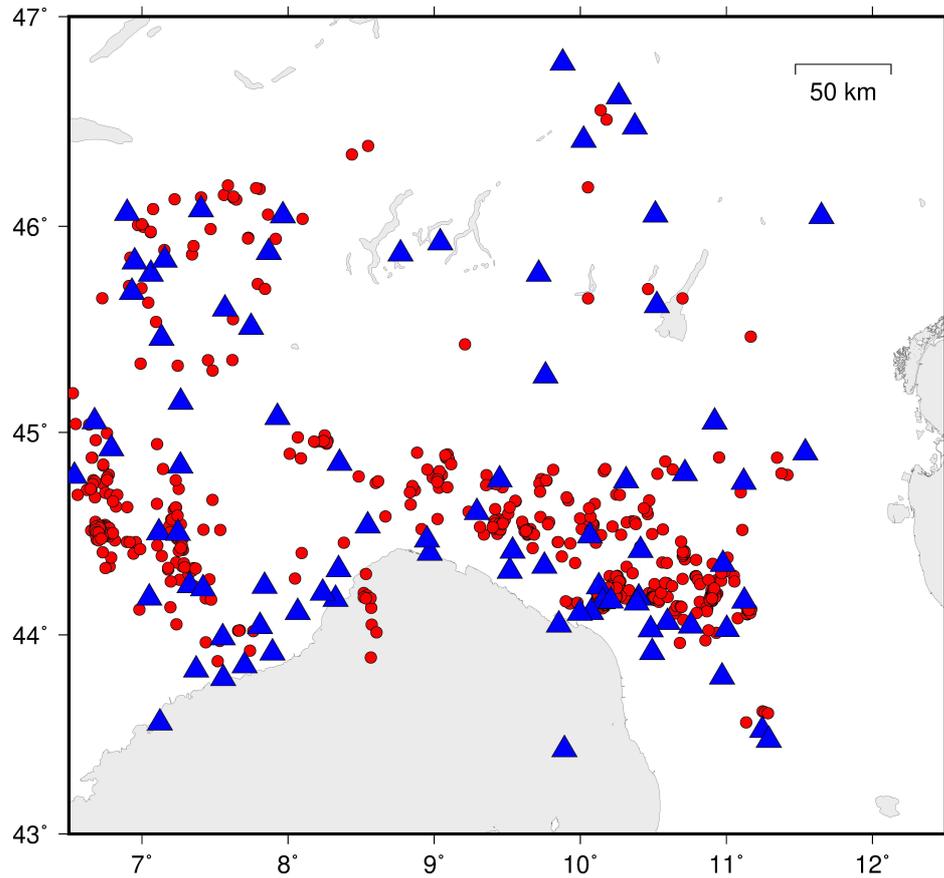
Le attività di ricerca hanno avuto il duplice scopo di produrre un catalogo omogeneo, per quanto riguarda le procedure di localizzazione utilizzate, e di fornire dati utili alla validazione del modello 3D attualmente utilizzato presso il CEDS.

Le attività sono state realizzate secondo il seguente schema:

- (a) Selezione del catalogo;
- (b) Localizzazione degli eventi selezionati utilizzando *NonLinLoc*;
- (c) Confronto tra localizzazioni "precedenti" e quelle attuali;
- (d) Analisi dei residui di tempo per specifiche stazioni;

Sono stati quindi selezionati 1548 eventi nel periodo 1-01-2012 e 31-12-2019 di magnitudo compresa tra 1.95 e 5.7 e ri-localizzati utilizzando le procedure aggiornate. Nello specifico è stata utilizzata una configurazione utile a valorizzare in modo ottimale la configurazione spaziale delle stazioni sismiche presente in Italia Nord-Occidentale e zone limitrofe: la localizzazione di un evento sismico in generale è principalmente vincolata dalle stazioni più vicine all'epicentro, poste indicativamente a distanza inferiore a 70 km: per questo motivo è necessario dare la massima influenza ai dati forniti dalle stazioni più vicine utilizzando un appropriato meccanismo di peso *a priori* in funzione della distanza. Tramite un apposito *file* di controllo, la procedura di localizzazione con *NonLinLoc* è stata effettuata applicando le seguenti impostazioni: la distanza massima, a cui è attribuito un peso pari a 1.0 ( $X_{near}$ ), è pari a 70 km, mentre la distanza massima, a cui corrisponde un peso pari a 0.0 ( $X_{far}$ ), è 120 km; tra le due distanze  $X_{near}$  ed  $X_{far}$ , il peso *a priori* applicato diminuisce progressivamente secondo un criterio di *downweight* lineare. In Figura 2 è riportata la mappa degli eventi ri-localizzati: in rosso posizione epicentrale degli

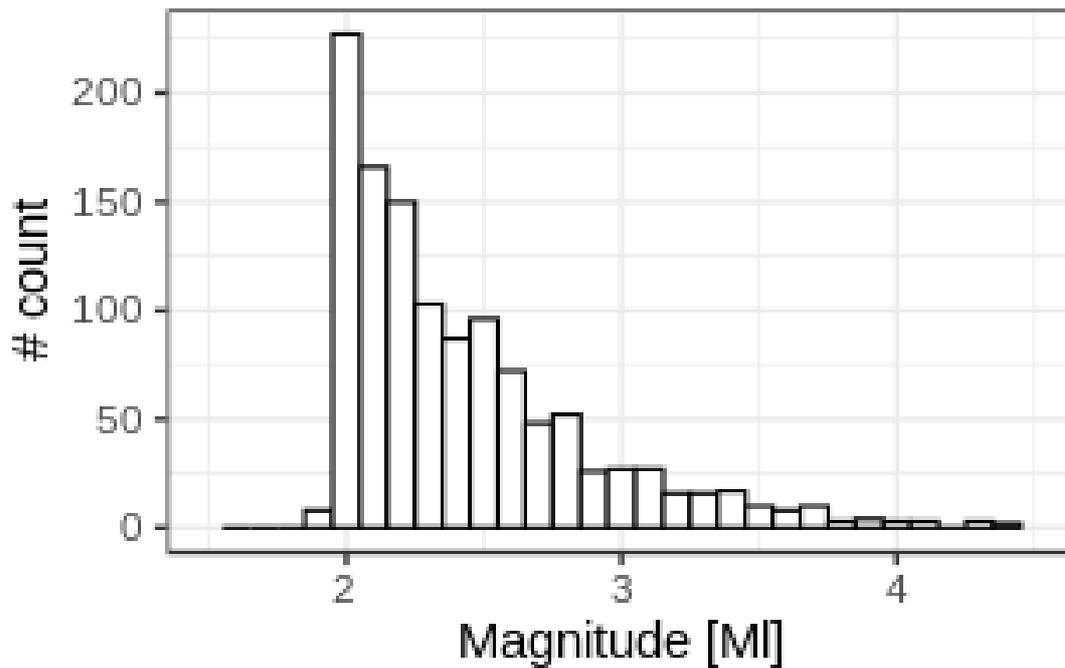
eventi ed in blu posizione delle stazioni utilizzate (>80). In allegato alla presente relazione viene fornito il file “Catal.txt” che fornisce le principali caratteristiche del catalogo ri-localizzato. In appendice vengono fornite le specifiche dei campi riportati nel file “Catal.txt”



**Figura 2** – Rappresentazione in mappa degli eventi sismici selezionati

La magnitudo locale degli eventi,  $M_l$ , (Richter, 1935) stata anche essa rivalutata utilizzando la procedura descritta in Spallarossa *et al.* (2002), dopo aver opportunamente filtrato i segnali sismici sulla base dei risultati ricavati da analisi *signal-to-noise*. Tale operazione di filtraggio si rende necessaria perché il calcolo della magnitudo locale di eventi a bassa energia potrebbe essere affetta da errori significativi e notevoli incertezze legati ai metodi di processamento adottati per la correzione della risposta strumentale.

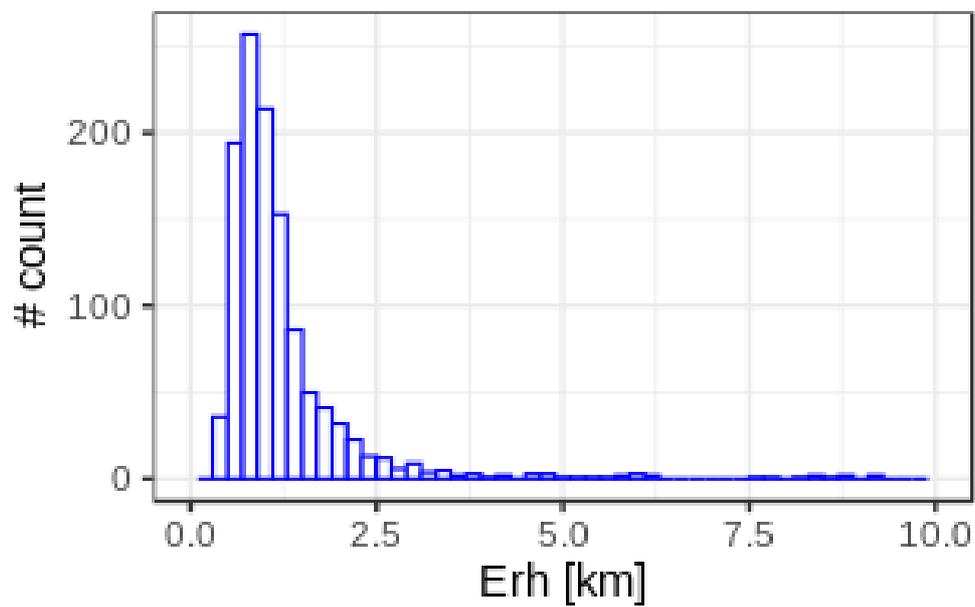
In Figura 3 è riportata la distribuzione della  $M_l$  per il catalogo selezionato.



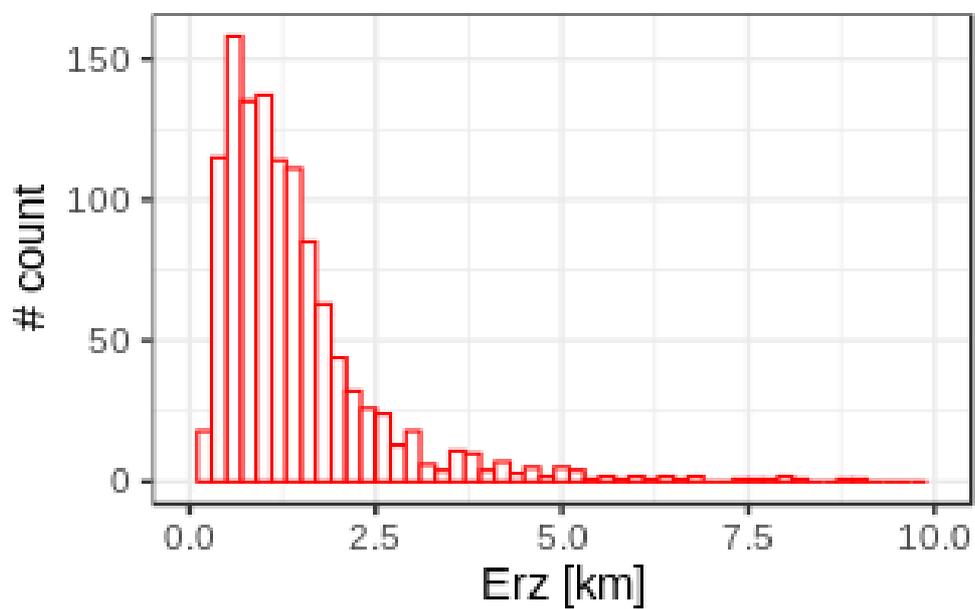
**Figura 3** – Distribuzione della  $M_l$  per il catalogo selezionato.

Il software di localizzazione fornisce diversi parametri utili alla verifica della qualità delle localizzazioni ottenute, Nel presente studio sono stati presi in considerazione: il valore dell'errore statistico di localizzazione orizzontale ( $Er_h$  [km]), quello verticale ( $Er_z$  [km]), ed il Gap azimutale ( $Gap$  [Deg]).

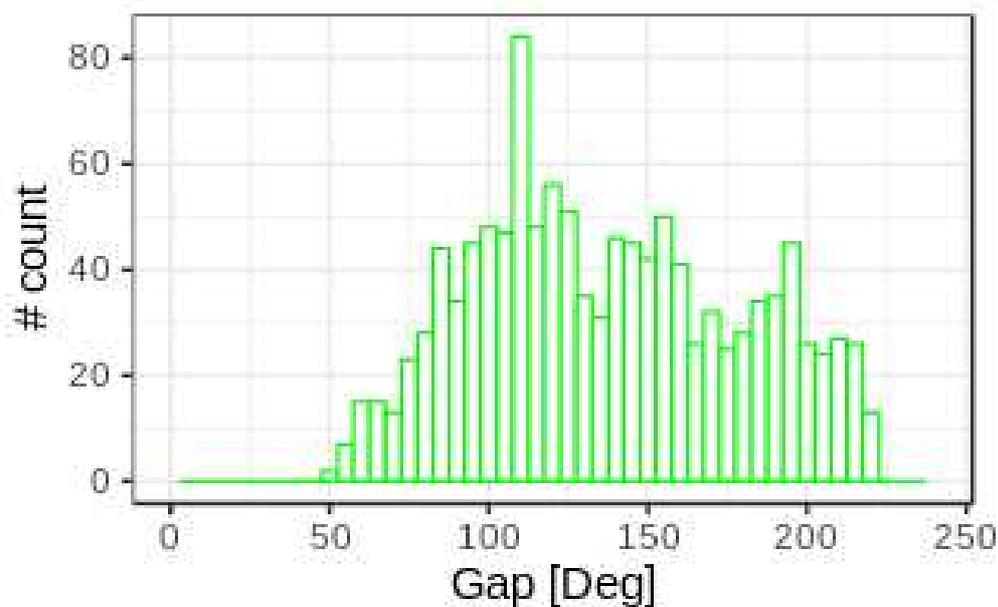
In Figura 4 è riportata la distribuzione di  $Er_h$  per il catalogo selezionato, in Figura 5 è riportata la distribuzione di  $Er_z$  ed in Figura 6 la distribuzione del Gap azimutale.



**Figura 4** – Distribuzione di Erh per il catalogo selezionato.



**Figura 5** – Distribuzione di Erz per il catalogo selezionato.



**Figura 6** – Distribuzione del Gap azimutale per il catalogo selezionato.

Le Figure 4,5 e 6 confermano la buona qualità delle localizzazioni ottenute: più del 50% degli eventi mostra un Erh < di 1.5 km un Erz inferiore ai 2 Km ed un Gap azimutale < di 150 Deg.

In base ai parametri numerici rappresentativi della qualità degli eventi (in questo caso Erh ed Erz), a ciascun evento riportato nel catalogo è stata assegnata un codice di qualità variabile da A (eventi ben localizzati) ad E (eventi di “pessima” qualità). Il codice di qualità è riportato nel file “Catal.txt” alla colonna “Q”

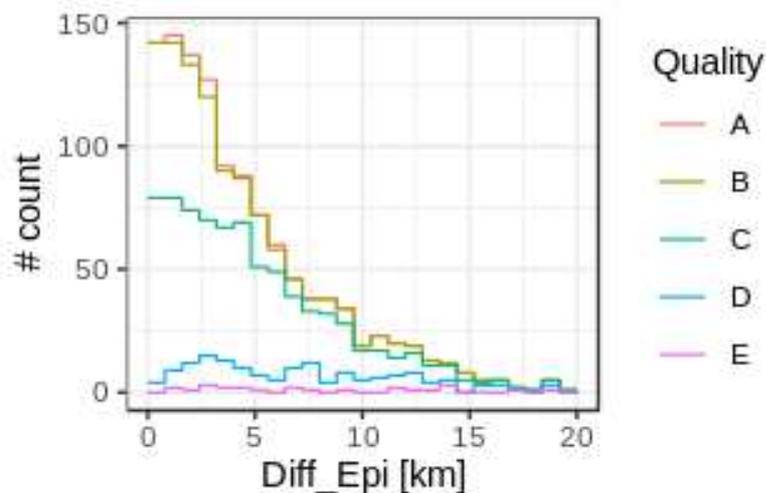
Le localizzazioni relative al nuovo catalogo sono state successivamente confrontate con le localizzazioni presenti nel catalogo originario. In Figura 7 è rappresentato un istogramma della distribuzione delle distanza (Diff\_Epi [km], misurata in pianta) tra la localizzazione originaria e la nuova localizzazione in funzione della qualità di localizzazione (scala cromatica): la distribuzione delle differenze di localizzazione dimostra che per più del 50% degli eventi tale differenza è maggiore di 2 km.

In Figura 8 è rappresentato un istogramma della distribuzione della differenza di profondità (Diff\_Depth [km]) tra la localizzazione originaria e la nuova localizzazione in funzione della qualità di localizzazione (scala cromatica): la distribuzione delle differenze di profondità dimostra che per di più del 50% degli eventi tale differenza è maggiore di 2.5 km.

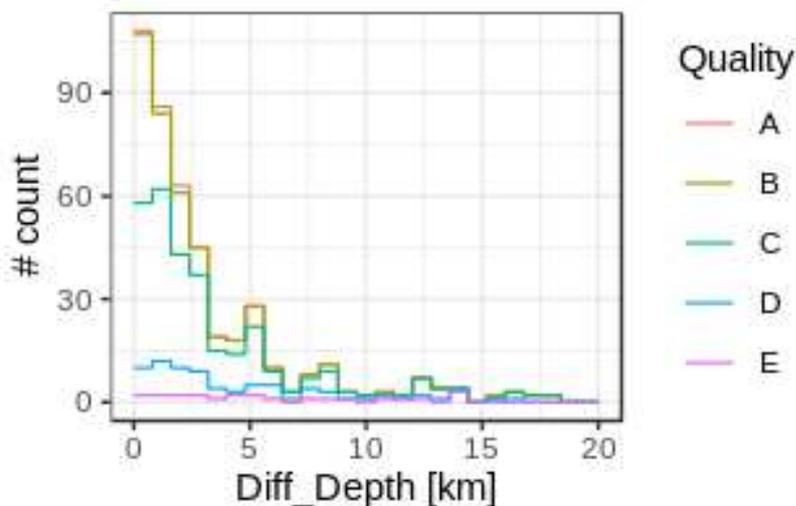
In generale i risultati ottenuti mostrano differenze di localizzazioni statisticamente significative (differenze in genere maggiori dell’errore di localizzazione) sia per quanto riguarda le posizioni

epicentrali sia per quanto riguarda la distribuzione degli eventi con la profondità. Tali differenze sono evidenti sia per i terremoti di maggiore “qualità” (A) sia per eventi di qualità inferiore (B e C): tali evidenze confermano che il modello di velocità, in aree caratterizzate da forti eterogeneità crostali, gioca un ruolo fondamentale nella determinazione delle posizioni epicentrali.

L’assetto strutturale del Nord Italia e di tutto l’arco Alpino comporta variazioni laterali di velocità sismiche che in alcuni casi possono raggiungere il 5%: è evidente che in tali contesti localizzazioni sismiche affidabili possono essere ottenute solo se si implementano modelli di velocità 3D possibilmente vincolati anche da dati geologici



**Figura 7** – Distribuzione delle distanza in pianta tra la localizzazione originaria e la nuova localizzazione



**Figura 8** – Distribuzione della differenza di profondità tra la localizzazione originaria e la nuova localizzazione

## localizzazione

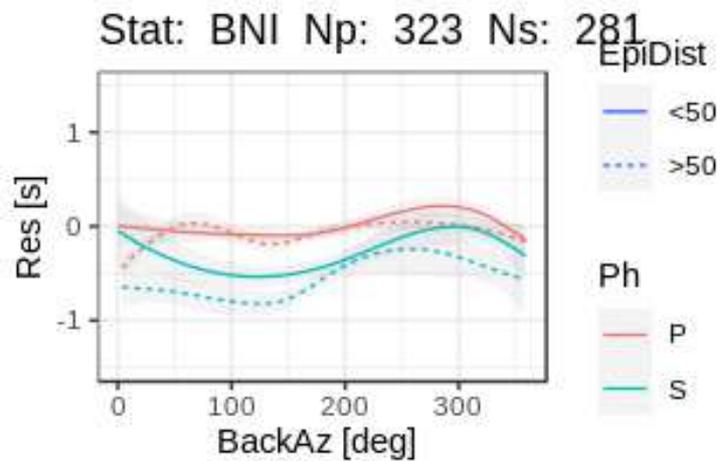
La fase successiva della ricerca è stata indirizzata alla validazione del modello di velocità attualmente in uso mediante lo studio dei residui di tempo delle fasi sismiche P ed S derivanti dalla procedura di localizzazione. Il residuo di tempo (Res [s]) rappresenta la differenza di tempo tra la “travel time” osservata (derivante dalla operazione di interpretazione manuale del segnale sismico e rappresentata dalla differenza di tempo tra l’arrivo della fase P ed il tempo origine) e la “travel time” calcolata in base alla posizione ipocentrale ed il modello di velocità utilizzato dal software di localizzazione.

Lo studio delle variazioni spaziali dei residui di tempo (variabilità di stazione) in funzione della distanza ipocentrale e del “Back Azimuth” (“direzione di provenienza dei raggi sismici alla stazione”) alle stazioni può essere di grande utilità per stabilire la “bontà” del modello di velocità in relazione alla procedura di localizzazione utilizzata. L’analisi dei residui di tempo è stata condotta per tutte le stazioni considerate sia per le fasi P che S.

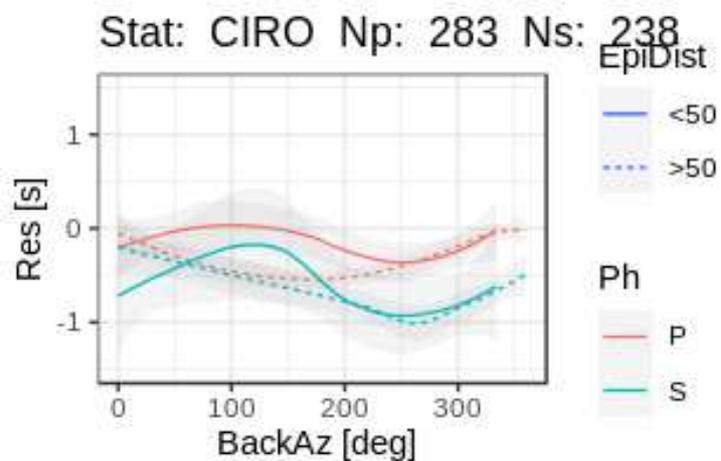
Nelle figure seguenti (9-17) vengono riportati, a titolo di esempio, i grafici dei residui di tempo (Res [s]) in funzione del back-azimut, del tipo di fase sismica (Fase P=rosso, Fase S=Verde) e della distanza epicentro stazione (> 50 km linea tratteggiata, < 50 km linea continua), per alcune stazioni poste in Italia Nord Occidentale ed in zona interfrontaliere.

Nello specifico vengono riportati i grafici per le stazioni:

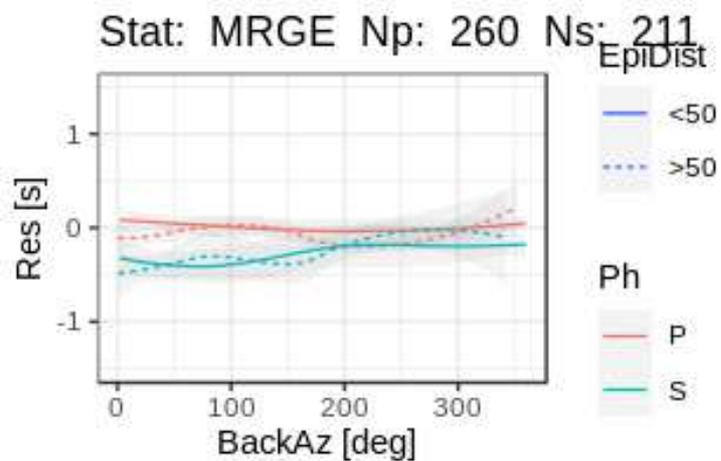
- BNI, Bardonecchia;
- CIRO, Cimetta Rossa;
- MRGE, Morgex;
- LSD, Lago del Serrù;
- RSP, Reno Superiore;
- SAOF, Saorge;
- ENR, Entraque;
- PZZ, Stropo;
- STV. Sant’Anna di Valdieri.



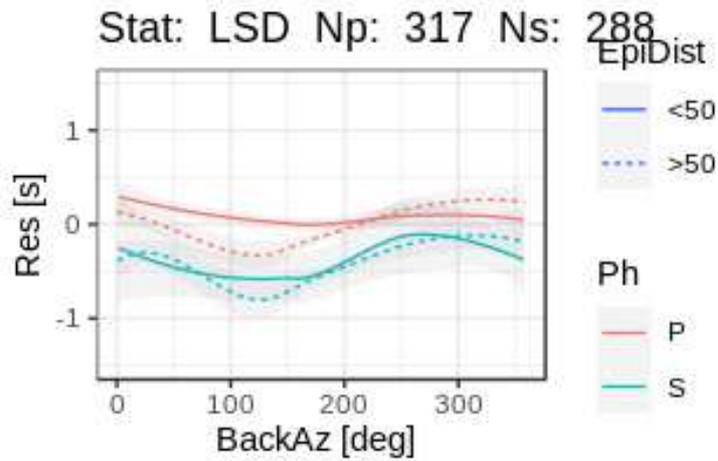
**Figura 9** – Distribuzione dei residui di tempo per BNI.



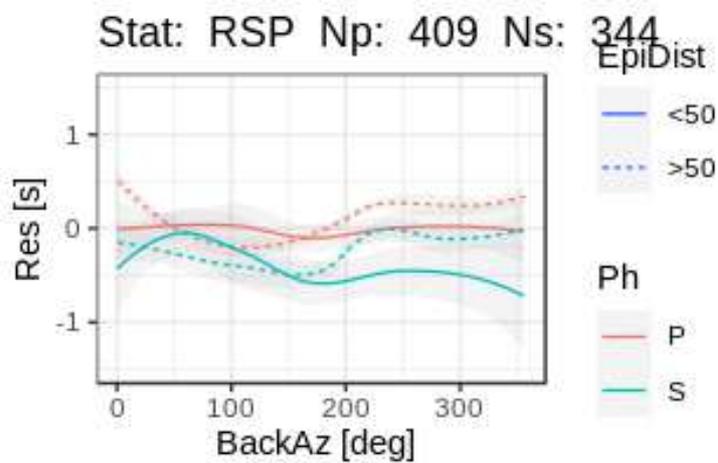
**Figura 10** – Distribuzione dei residui di tempo per CIRO



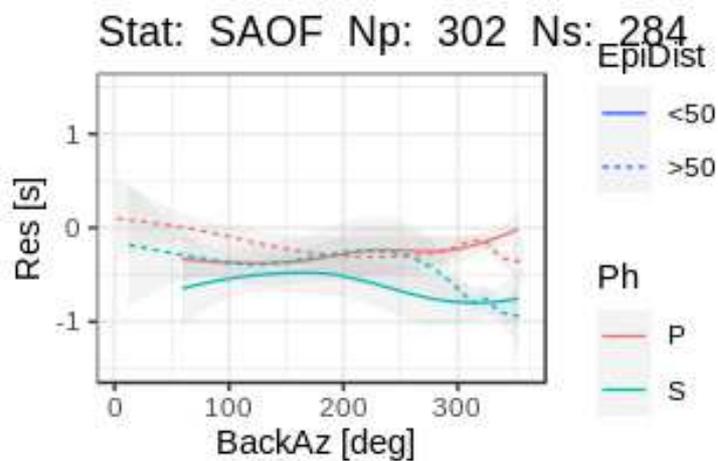
**Figura 11** – Distribuzione dei residui di tempo per MRGE



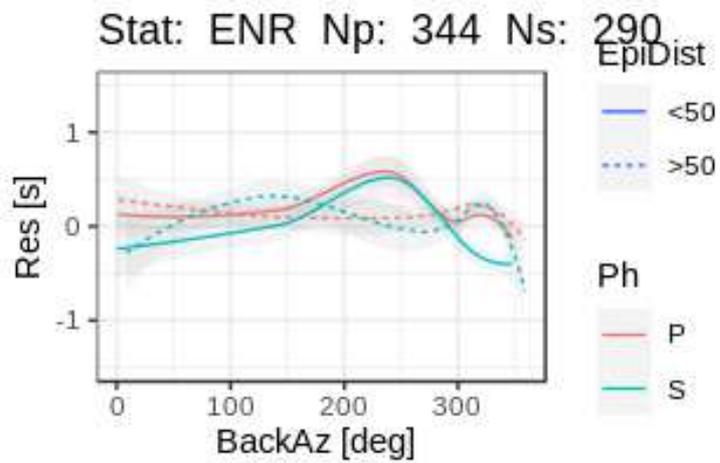
**Figura 12** – Distribuzione dei residui di tempo per LSD



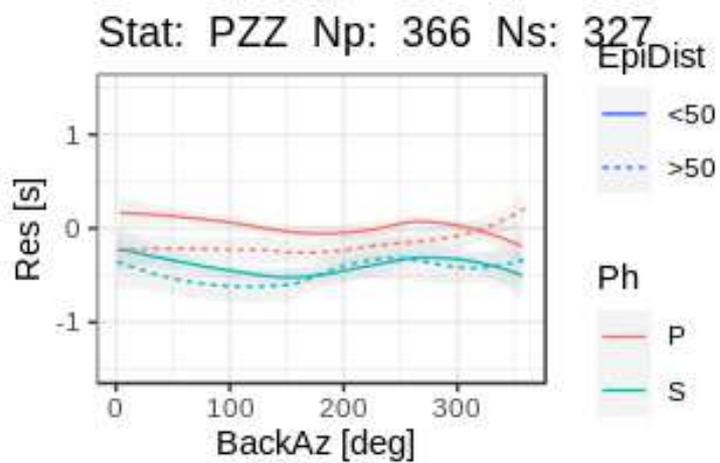
**Figura 13** – Distribuzione dei residui di tempo per RSP



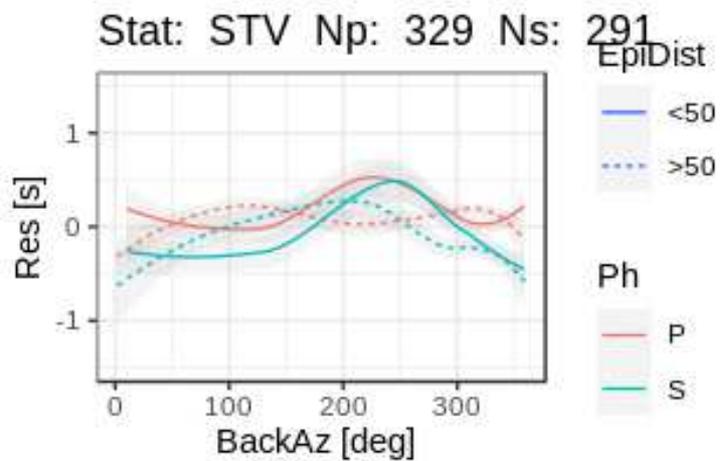
**Figura 14** – Distribuzione dei residui di tempo per SAOF



**Figura 15** – Distribuzione dei residui di tempo per ENR



**Figura 16** – Distribuzione dei residui di tempo per PZZ



**Figura 17** – Distribuzione dei residui di tempo per STV

Una prima analisi qualitativa dei residui di tempo mostra evidenti differenze tra le fasi P ed S: queste ultime forniscono, nella maggior parte dei casi, residui di tempo negativi che, per alcune stazioni (CIRO ad esempio), possono essere anche superiori (in valore assoluto) ad 1 s.

In generale, considerando sia le fasi P che S e le stazioni maggiormente campionate, si osservano residui di tempo mediamente negativi: tale comportamento è più evidente per le fasi S rispetto alle fasi P.

I residui di tempo, anche in considerazione delle distanze ipocentrali considerate (inferiori agli 80 km), sono statisticamente significativi e suggeriscono l'esigenza di una calibrazione di un nuovo modello di velocità 3D da ottenersi in prima istanza utilizzando tecniche di tomografia sismica e dati di sismica passiva registrati negli ultimi anni comprensivi di registrazioni derivanti da tutte le reti sismiche operanti nell'area indagata.

### **Attività C: Momento sismico ed energia**

#### Premessa

L'attività di ricerca è stata indirizzata a fornire una prima validazione di tecniche di analisi dei dati sismici sviluppate per la stima di parametri fisici statici e dinamici caratteristici della sorgente sismica. In questo ambito, in base a specifiche esperienze maturate nell'ambito dell'Earthquake Early Warning, sono state sviluppate nuove tecniche di analisi che consentono di fornire una prima valutazione (ambito "Rapid Response") del Momento Sismico Scalare  $M_0$  e dell'energia sismica Radiata  $E_r$ : il "Peak Displacement" (Pd) misurato sulla fase S (corretto per l'attenuazione) è proporzionale al Momento sismico, mentre l'integrale al quadrato delle Velocità (IV2) calcolato sulla fase S (anch' esso corretto per l'attenuazione) è proporzionale alla Energia sismica radiata  $E_r$ .

In un recente studio (Picozzi et al. 2018, Picozzi et al. 2019) sono state sviluppate e calibrate per il Centro e Sud Italia leggi empiriche, del tutto analoghe alla relazione che fornisce la Magnitudo Richter in funzione dell'ampiezza WoodAnderson, che consentono di stimare sia  $M_0$  sia  $E_r$  utilizzando misure di Pd ed IV2. Da una collaborazione tra i ricercatori di Università di Genova, Università di Napoli, INGV-Milano e GFZ-Potsdam è nato il progetto Ramones (Rapid Assessment of MOmeNt and Energy Service): nell'ambito di tale progetto è stato sviluppato un servizio ed un portale web (<http://www.distav.unige.it/rsni/ramones.php?lang=it>) che, utilizzando i metodi e le leggi empiriche calibrate in precedenti studi, fornisce su base giornaliera una stima di  $M_0$  ed  $E_r$  per gli eventi del Centro Italia di  $M_l > 1.7$ .

## Attività e risultati

Le attività di ricerca hanno avuto il principale obiettivo di fornire elementi utili per verificare l'applicabilità dei metodi precedentemente sviluppati per il Centro Italia al contesto territoriale oggetto del presente studio. La prima fase si è concretizzata nell'utilizzo delle leggi empiriche (Porxy) sviluppate e calibrate per il Centro Italia per stimare  $M_0$  ed  $E_r$  di alcuni terremoti significativi occorsi in Italia Nord Occidentale e nella area interfrontaliera.

Sono stati quindi selezionati 77 eventi di  $M_L \geq 3.2$  eventi nel periodo 2015-2020; in Figura 18 è riportata la mappa di tali eventi.

Infine, in base alla numerosità segnali sismici registrati per ogni evento e tenendo conto anche della qualità di tali segnali, sono stati selezionati 12 eventi (stelle gialle in figura 18) da utilizzare per la fase successiva

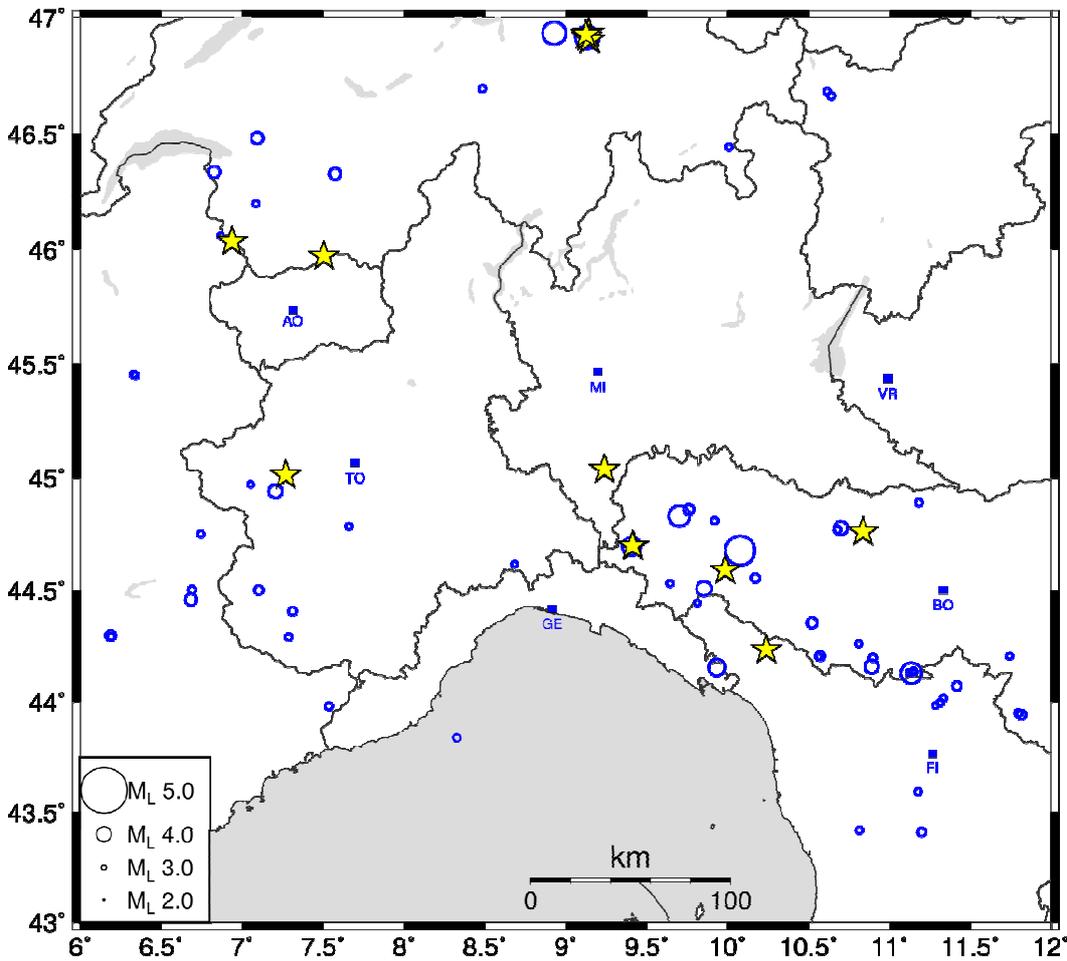


Figura 18 – Mappa degli eventi selezionati per la stima del  $M_0$  ed  $E_r$

I segnali sismici relativi agli eventi selezionati sono stati elaborati ed i relativi risultati sono riportati in tabella 2.

In tale tabella è riportato l'Id identificativo dell'evento, i parametri di riferimento forniti da Ingv (Lat/Lon, Depth, MI ed Mw) e Mw ed LogEr (Log 10 di Er) stimati nel presente studio (Proxy)

Id	Lat/Lon (Ingv)	Depth [km] (Ingv)	MI (Ingv)	Mw (Ingv)	Mw (Proxy)	Log <sub>10</sub> Er (Proxy)
200222133113	44.7458/10.8097	28.4	3.3		3.34	8.70
200329071109	44.9953/7.2732	20.3	3.4		3.45	9.45
200415200154	44.6525/9.3923	7.1	3.5		3.59	9.49
200416111618	44.6985/9.4130	5.91	3.5	3.2	3.42	9.14
200419095319	45.0328/9.2108	25.0	3.7		3.63	9.60
200623062421	46.0113/6.9753	9.1	3.4		3.37	9.31
201005132700	44.5915/9.8962	67.7	3.5		3.88	10.10
201025193524	46.9273/9.1195	8.2	4.2	3.9	3.96	10.24
201025194242	46.9337/9.1378	9.9	3.0		3.18	8.82
201108235551	45.9442/7.5023	0.8	3.2		3.28	8.83
201110125123	46.9422/9.1108	11.2	3.6		3.56	9.45
201207045438	44.2023/10.2203	6.3	3.2		3.26	8.82

**Tabella 2** –Parametri significativi degli eventi utilizzati per la stima di Mo ed Er.

I risultati di questo primo test, riportati in tabella 2, evidenziano un buon accordo tra le Mw e le MI ed Mw pubblicate dall'INGV anche in considerazione del fatto che di norma l'incertezza (deviazione standard) associata ad una stima di Magnitudo non è inferiore a 0.25 unità di magnitudo. Vale la pena notare che le stime di M0 ed Er sono state ottenute utilizzando delle relazioni "proxy" calibrate per il Centro Italia e quindi rappresentative della attenuazione crostale in tale area e delle condizioni di sito relative alle stazioni ivi installate (le relazioni proxy comprendono anche correzioni specifiche di stazioni): è quindi ragionevole immaginare che calibrazioni specifiche per l'area oggetto del presente studio consentiranno di ottenere stime affidabili di Mo ed Er anche per eventi sismici di MI inferiore 2.0.

## **APPENDICE**

Il Catalogo sismico ottenuto attraverso la procedura di ri-localizzazione è fornito nel file “Catal.txt”. Specifiche delle informazioni presente nel file.

- Lon: Longitudine (Riferimento WGS84)
- Lat: Latitudine (Riferimento WGS84)
- Dpt: Profondità (espressa in Km)
- MI: Magnitudo Locale (Richter)
- StdMI: deviazione standard relativa ad MI
- Id: Identificativo dell'evento (codice alfanumerico)
- yymmddhhmmss.ss: Tempo Origine (UTC)
- Jul: Giorno Giuliano
- Erh: Errore orizzontale (espresso in Km)
- Erz: Errore verticale (espresso in Km)
- Rms: Root mean square dei residui di tempo di localizzazione (espresso in s)
- Gap: Gap azimutale espresso in gradi
- Np: Numero di fasi P utilizzate per la localizzazione
- Ns: Numero di fasi S utilizzate per la localizzazione
- Ntot: Numero di fasi totali utilizzate per la localizzazione
- Q: indice di Qualità (codice alfanumerico)

## **BIBLIOGRAFIA**

Delouis B. (2014), FMNEAR: Determination of Focal Mechanism and First Estimate of Rupture Directivity Using Near-Source Records and a Linear Distribution of Point Sources, *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (3): 1479-1500

Lomax A. (2001), Probabilistic, Non-Linear, Global-Search Earthquake Location in 3D Media, <http://alomax.free.fr/nlloc/index.html>

Picozzi, M.; Bindi, D.; Spallarossa, D.; Di Giacomo, D.; Zollo, A (2018) "A rapid response magnitude scale for timely assessment of the high frequency seismic radiation." DOI:10.1038/s41598-018-26938-9. pp.1-10. In *SCIENTIFIC REPORTS* - ISSN:2045-2322 vol. 8.

Picozzi, M., Bindi, D., Spallarossa, D., Oth, A., Di Giacomo, D., Zollo, A. (2019), "Moment and energy magnitudes: diversity of views on earthquake shaking potential and earthquake statistics", *Geophysical Journal International*, Volume 216, Issue 2, February 2019, Pages 1245–1259, <https://doi.org/10.1093/gji/ggy488>

Reasenber, P.A., e D. Oppenheimer (1985), Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, USGS Open File Rept., 85/739, 109 pp.

Spallarossa D., Bindi D., Augliera P., Cattaneo M. (2002), An ML Scale in Northwestern Italy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92 (6), 2205-2216