



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

MiSE/RER/Stogit S.p.A.: Protocollo Operativo – Attività di sperimentazione degli indirizzi e linee guida per il monitoraggio della concessione “Minerbio Stoccaggio”, Regione Emilia-Romagna, DGR 11 Aprile 2016, N. 488

Concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio stoccaggio” (BO) Struttura Preposta al Monitoraggio

Relazione Finale



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

Progetto: SPERIMENTAZIONE ILG MINERBIO STOCCAGGIO

(Codice progetto: 913; Codice CUP: D81I18000300004)

Luglio 2019

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA
Progetto: SPERIMENTAZIONE ILG MINERBIO STOCCAGGIO
(Codice progetto: 913; Codice CUP: D81I18000300004)

Concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio stoccaggio” (BO)
Struttura Preposta al Monitoraggio
Relazione Finale

A cura di:

Parte 1: Simona Carannante, Ezio D’Alema, Gianlorenzo Franceschina (INGV, Sezione Milano)

Parte 2: Letizia Anderlini, Enrico Serpelloni (INGV, Sezione Bologna)

Parte 3: Giuseppe Pezzo (INGV, Sezione Osservatorio Nazionale Terremoti – Roma)

Responsabile Scientifico
Paolo Augliera (INGV, Sezione Milano)

Ringraziamenti

L’attività descritta nella presente relazione ha avuto inizio a maggio 2016. Tantissime persone si sono adoperate per raggiungere gli scopi del progetto, considerando anche molti colleghi dell’INGV qui non citati, che hanno collaborato ai vari report trimestrali o che sono stati contattati per suggerimenti amministrativi, gestionali, scientifici e tecnici. L’elenco sarebbe veramente lunghissimo. Grazie a tutti!

Ringrazio tutti i colleghi Stogit-Snam, che a vario titolo hanno partecipato alle varie iniziative e con cui è stato instaurato un ottimo rapporto di collaborazione, sempre tenendo distinta e ben presente la terzietà del nostro Istituto nella valutazione dei sistemi di monitoraggio in analisi.

Un ringraziamento ai colleghi della Regione Emilia-Romagna e in particolare al Dott. Paolo Severi e al Dott. Luca Martelli della Direzione Generale Cura del Territorio e dell’Ambiente – Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, con cui abbiamo condiviso numerose riunioni e incontri a vari livelli.

Grazie all’Ing. Giancarlo Giacchetta (MiSE, DGS-UNMIG, Bologna) che ha coordinato e diretto i lavori del “Comitato Protocollo Operativo Minerbio” e ha fornito un continuo supporto nelle varie fasi del progetto.

Un ringraziamento al Comune di Minerbio e, in particolare, al Sindaco Avv. Lorenzo Minganti, grazie al cui impegno è stato possibile avviare le attività previste dalla Convenzione.

Paolo Augliera

Milano, 28 giugno 2019

Sommario

Studio INGV area stoccaggio di Minerbio (Sintesi Divulgativa).....	5
Elenco rendiconti attività	8
PARTE 1.....	9
1.1 Introduzione: la concessione di stoccaggio	9
1.2 Inquadramento geologico strutturale e definizione dei domini di rilevazione	11
1.3 Monitoraggio microsismico	17
1.4 Rete di monitoraggio sismica integrata.....	22
1.5 Sistema di acquisizione.....	25
1.6 Funzionamento sistema di acquisizione e trasmissione dati, strumentazione sismica	27
1.7 Analisi di rumore sismico ambientale	30
1.8 Analisi di detezione: metodo.....	33
1.8.1 Analisi di detezione: validazione parametri utilizzati	47
1.8.2 Analisi di detezione: risultati (mappe magnitudo minima per la localizzazione).....	50
1.8.3 Analisi di detezione: sintesi risultati e considerazioni	58
1.9 Sismicità registrata	63
1.10 Dati dal monitoraggio delle pressioni di poro	78
1.11 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG.....	80
Parte sismologica.....	80

Studio INGV area stoccaggio di Minerbio (Sintesi Divulgativa)

Le attività svolte dai ricercatori, tecnologi e tecnici dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), nell'ambito della Convenzione stipulata con il Comune di Minerbio, riguardano la valutazione dei sistemi di monitoraggio attivi nell'area di stoccaggio di gas naturale nella "Concessione Minerbio Stoccaggio" e l'analisi dei dati registrati.

In particolare, considerando le stazioni di rilevamento messe in opera direttamente dal Concessionario (STOGIT), si è proceduto alla verifica della configurazione delle reti di monitoraggio (sismico e delle deformazioni del suolo) allo scopo di suggerire eventuali implementazioni e modifiche della strumentazione in uso.

Per quanto riguarda il monitoraggio sismico, una prima fase del progetto ha riguardato uno studio approfondito per determinare quale fosse il numero ottimale di stazioni sismiche da installare, rispetto a quelle già esistenti, e dove fosse opportuno collocarle.

Lo scopo principale è di aumentare la capacità di registrare eventuali eventi sismici anche se di bassissima energia (individuabili quindi solo dagli strumenti e non avvertibili dalla popolazione) e poterli poi localizzare nella maniera più precisa possibile.

Nell'area in esame il rumore sismico ambientale è molto elevato, visto che ci troviamo in una zona con alta antropizzazione, caratterizzata dalla presenza di molteplici attività industriali e con alta densità delle vie di comunicazione stradale.

Per cercare di ridurre l'influenza del rumore sismico ambientale, che è maggiormente presente per le stazioni in superficie, si è quindi proposto di installare anche alcune delle nuove stazioni in pozzetti posizionati in profondità.

All'inizio del progetto le stazioni delle rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", gestite direttamente dal Concessionario, erano 4. La stazione centrale (MI04) è posizionata al centro del campo di stoccaggio e, opportunamente, in un pozzetto a 100 m per ridurre il disturbo antropico.

In un'ottica di gradualità di sviluppo della rete microsismica e in accordo con quanto previsto dal Protocollo Operativo, il Concessionario ha installato nell'area della concessione durante il progetto altre 4 stazioni (di cui 3 in pozzetto, a 150 m di profondità).

La rete del Concessionario consiste quindi attualmente in 8 stazioni sismiche velocimetriche di cui 4 in superficie e 4 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 3 a 150 m di profondità).

Nel corso del progetto il sito MI04 è stato inoltre attrezzato per ospitare un accelerometro in superficie.

Utilizzando anche i dati provenienti dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN) dell'INGV si è quindi realizzata, nell'ambito del progetto, una rete sismica integrata con le stazioni di proprietà Stogit. In particolare, per la RSN sono state selezionate tutte le stazioni con distanza da Minerbio entro un raggio di 55 km: entro tale distanza ricadono altre 13 stazioni sismiche.

Nel corso del progetto quindi, oltre ai segnali delle stazioni sismiche INGV installate nell'area, anche i segnali delle stazioni di proprietà del Concessionario sono stati trasmessi e ricevuti in tempo reale al centro di elaborazione dati INGV di Milano. Le fasi di acquisizione, memorizzazione e analisi sono svolte in maniera assolutamente indipendente rispetto a quanto viene effettuato dal Concessionario.

Le analisi effettuate, condotte con modellazioni teoriche e confronti approfonditi, indicano che la nuova configurazione della rete sismica del Concessionario permette teoricamente di individuare nell'area di stoccaggio eventuali eventi sismici molto deboli, anche inferiori a magnitudo 1.

Nel periodo dal 01/01/2018 al 31/05/2019 sono stati riconosciuti dalla rete sismica integrata 256 eventi sismici, 224 dei quali erano già presenti nel catalogo degli eventi registrati unicamente dalla RSN.

Nell'area della Concessione non sono stati registrati eventi sismici, di magnitudo superiore alle soglie di rilevamento individuate nel corso del progetto, che siano correlabili alle attività di stoccaggio/estrazione.

Per quanto riguarda il monitoraggio della deformazione del suolo ci si è occupati di verificare le elaborazioni dei dati GPS e dell'interferometria SAR (dati satellitari).

Nell'area di stoccaggio è posizionata una stazione GPS a doppia frequenza.

Per prima cosa è stata effettuata una valutazione della qualità del dato registrato dalla stazione di proprietà del Concessionario, oltre a rielaborare in maniera indipendente tutte le acquisizioni del segnale a partire da gennaio 2009, effettuando ad esempio l'analisi delle serie temporali di spostamento e delle velocità di spostamento.

La stazione di Minerbio risulta conforme alle specifiche richieste per una stazione di monitoraggio GPS sia dal punto di vista della qualità del dato registrato che della continuità delle registrazioni.

I valori dei tassi di spostamento nelle tre direzioni, E-W, N-S e Verticale, ottenuti dall'analisi delle serie temporali di spostamento aggiornati al 30 marzo 2019 rimangono del tutto consistenti con quelli misurati dalle altre stazioni CGPS attive nell'area.

La serie temporale di spostamento, corretta per il trend lineare, gli offset co-sismici e la deformazione post-sismica, mostra un andamento stagionale con periodo annuale, la cui ampiezza massima è osservata nella componente nord (~5 mm).

La velocità media (negativa, ossia in subsidenza) stimata dai dati GPS MINE è pari a -0.744 ± 0.2 mm/anno.

In generale, una ulteriore stazione GPS permanente, ubicata più a Nord, tra il centro e il limite settentrionale del giacimento, migliorerebbe la stima della deformazione lungo la componente orizzontale N-S, non rilevabile da interferometria SAR, e fornirebbe una informazione utile per la scomposizione geometrica degli spostamenti lungo la linea di vista nelle componenti E-W e verticale.

Questa osservazione è stata pienamente condivisa dal Concessionario che si è immediatamente reso disponibile e attivato per valutare le condizioni logistiche che agevolino l'installazione di una nuova stazione GPS permanente.

Nel mese di aprile 2019 è stato effettuato un sopralluogo congiunto al fine di valutare, tra le varie soluzioni proposte dal Concessionario, il sito più idoneo dal punto di vista della logistica (verificando ad esempio l'esistenza di siti attrezzati, recintati, forniti di energia elettrica). Sono stati quindi identificati due possibili siti, il Cluster A e il Cluster E, localizzati in posizioni utili per la misura di deformazioni stagionali nelle varie componenti.

Sono state acquisite le elaborazioni effettuate con i dati relativi alla interferometria SAR e si è proceduto alla verifica e al confronto dei risultati ottenuti dal Concessionario e da INGV.

L'analisi interferometrica si è basata sull'elaborazione congiunta delle immagini radar acquisite in geometria ascendente e discendente dai satelliti Radarsat-1 e 2 e del sensore Sentinel-1 nel periodo Ottobre 2003 - Novembre 2018.

Per la validazione del dataset fornito dal concessionario sono stati processati i dati Sentinel-1.

Come ulteriore validazione dei risultati, INGV ha effettuato l'analisi dei dati utilizzando la tecnica *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA), che condivide alcune caratteristiche dei due principali approcci di elaborazione del dato SAR, quali *Persistent Scatterer* (PS) e *Small Baseline Subsets* (SBS).

I risultati ottenuti sono in accordo tra loro, mostrando differenze entro 1 mm/anno.

È importante rimarcare come anche l'analisi InSAR effettuata dall'INGV sia del tutto indipendente da quella della STOGIT e differente nella modalità di trattamento del dato.

L'utilizzo di algoritmo e parametri di data processing differenti restituiscono tuttavia risultati e valori misurati coerenti tra loro, validandone e rafforzandone l'affidabilità.

Sono inoltre resi disponibili dal Concessionario anche i valori relativi alle pressioni di poro e ai dati di produzione in modo da poter verificare eventuali andamenti stagionali dei parametri strumentali,

connessi al ciclo annuale di stoccaggio che consiste in una fase di iniezione di gas nel sottosuolo (in genere durante il periodo aprile-ottobre) e una fase di erogazione (nel periodo novembre-marzo). Le attività sopra descritte sono utili per valutare l'effettiva applicabilità delle indicazioni contenute nel documento, predisposto dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) nel 2014, "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" (ILG).

In questo rapporto finale saranno riportate molte delle considerazioni già espresse nei precedenti report trimestrali. Alcune analisi sono invece presentate per la prima volta, essendo state effettuate considerando tutto il periodo in esame.

Nella maggior parte dei casi si è preferito comunque illustrare pienamente l'attività svolta (piuttosto che presentare soltanto aspetti riassuntivi o riportare unicamente gli aggiornamenti o le conclusioni) in modo da poter permettere anche la lettura indipendente di questo documento, senza obbligare il lettore a ricercare informazioni essenziali nei report precedentemente pubblicati.

Elenco rendiconti attività

Il monitoraggio della sismicità dell'area, unitamente a quello delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro, viene effettuato dal Concessionario per la verifica delle condizioni di sicurezza di esercizio dei giacimenti anche in riferimento alle indicazioni contenute nel documento MiSE "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" (MiSE-DGS-UNMIG, 2014), da qui in poi denominato "ILG". Quest'ultimo prescrive in particolare l'individuazione di una struttura preposta al monitoraggio (denominata "SPM") e lo svolgimento di un'attività di sperimentazione del monitoraggio di attività antropiche come, ad esempio, lo stoccaggio di gas naturale in sottoterraneo. In data 5/5/2016, il "Protocollo Operativo – Attività di Sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione *Minerbio Stoccaggio*", sottoscritto da MiSE, Regione Emilia Romagna (RER) e Concessionario, individua l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) come SPM (RER, 2016a; 2016b).

Il Protocollo Operativo, avviato ufficialmente in data 11/7/2016 per la durata di due anni, viene poi attuato mediante la stipula di una convenzione della durata di un anno tra Comune di Minerbio e INGV, avviata ufficialmente in data 17/5/2018 (INGV, 2018a).

La Convenzione riconosce anche tutta l'attività svolta nel periodo precedente alla stipula.

L'attività svolta nel periodo 2016-2017 è stata rendicontata nel rapporto "Concessione di stoccaggio di gas naturale Minerbio Stoccaggio (BO). SPM - Monitoraggio Sismico – Anno di esercizio 2017 – Relazione N.01" (INGV-MI, 2017a), nel documento di sintesi inviato da INGV a MiSE, RER e Concessionario in data 27/7/2017 (INGV-MI, 2017b) e nel documento "Sintesi attività svolta nel periodo Luglio-Dicembre 2017 nell'ambito del Protocollo Operativo" (INGV-MI, 2018).

A partire da Gennaio 2018, l'attività svolta dalla SPM viene rendicontata mediante relazioni trimestrali corredate da allegati tecnici che illustrano le singole attività di monitoraggio.

L'attività condotta nel primo trimestre 2018 è stata dunque sintetizzata nella Relazione Trimestrale N.1/2018 (INGV, 2018b) e in particolare, gli allegati A e B della suddetta relazione illustrano dettagliatamente il monitoraggio sismico (INGV, 2018c) e il monitoraggio delle deformazioni del suolo da stazioni GPS in continuo (INGV, 2018d). I trimestri successivi sono invece stati rendicontati nelle Relazioni Trimestrali N.2/2018 (INGV, 2018e), N.3/2018 (INGV, 2018f), N.4/2018 (INGV, 2019), N. 1/2019 (INGV, 2019b).

Le attività svolte sono state inoltre presentate ai cittadini in occasioni di incontri pubblici, organizzati dal Sindaco del Comune di Minerbio, svoltisi a Palazzo Minerva il 14 gennaio 2019 e il 18 maggio 2019.

PARTE 1

1.1 Introduzione: la concessione di stoccaggio

La concessione di stoccaggio di gas naturale “Minerbio Stoccaggio”, con istanza di concessione conferita dal Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) a STOGIT S.p.A. in data 1/1/1997, interessa un’area di 68.61 km² situata in provincia di Bologna (MiSE-DGS-UNMIG, 2017). Il 65% dell’area della concessione viene a trovarsi nel territorio comunale di Minerbio mentre la restante parte è suddivisa tra i comuni di Malalbergo, Bentivoglio, Granarolo dell’Emilia, Budrio e Baricella. La concessione è ubicata circa 18 km a nord-est di Bologna e viene a trovarsi in una zona caratterizzata da intensa attività antropica, legata sia ad attività produttive che alla presenza di importanti vie di comunicazione (l’autostrada Bologna-Padova (A13) affianca l’area della concessione mentre la strada statale SS64 la attraversa).

Il giacimento di stoccaggio, situato ad una profondità media di 1270 m, appartiene alla categoria dei giacimenti a gas esauriti (Depleted Field), ossia sfruttato in passato durante la fase di produzione primaria, protrattasi sino al 1971 con la perforazione di 36 pozzi, di cui 24 produttivi e, dal 1975, convertito all’attività di stoccaggio. Quest’ultima si avvale attualmente di 51 pozzi di iniezione/erogazione organizzati in clusters e di 6 pozzi-spia per il monitoraggio delle pressioni di giacimento. L’intervallo stratigrafico di interesse minerario, attualmente adibito all’attività di stoccaggio, è denominato Pool C ed è rappresentato da una serie di livelli sabbiosi di natura torbiditica appartenenti alla Formazione Porto Garibaldi con spessore di circa 80 m, ai quali si interpongono livelli argillosi di limitato spessore. La traccia del contatto gas-acqua originario (localizzato a 1370 m di profondità) individua un’area di circa 8 km² la cui superficie è situata per circa l’80% nel comune di Minerbio (Fig. 1).

In data 8/1/2013, STOGIT S.p.A. (da qui in poi denominato “Concessionario”), ha avviato presso il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) una procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) per “Ampliamento capacità di stoccaggio mediante incremento della pressione massima di esercizio (p_{max}) oltre la pressione statica (p_i) di fondo originaria del giacimento (p_{max} = 1,07p_i)” (MATTM, 2013). La procedura è stata avviata a seguito della realizzazione di un progetto di fattibilità, condotto dal Concessionario, comprendente una serie di studi e di interventi operativi, finalizzati alla raccolta dei dati per una accurata descrizione delle principali caratteristiche del giacimento: acquisizione di un rilievo sismico 3D per la caratterizzazione complessiva del giacimento (geometria, assetto strutturale), perforazione di un pozzo geognostico dedicato (prelievo di carote di fondo, log geofisici, misure geomeccaniche in situ), studi per la caratterizzazione petrofisica e geomeccanica della formazione argillosa di copertura, valutazione dell’integrità dei pozzi e delle facilities di superficie. I risultati dello studio geologico-strutturale dettagliato del campo, le analisi delle carote per la caratterizzazione della formazione argillosa di copertura, il conseguente studio di modellizzazione geomeccanica del giacimento e i risultati di un periodo di esercizio di sperimentazione in sovrappressione autorizzato dal MiSE, hanno assicurato la possibilità tecnica di raggiungere nel giacimento di Minerbio, in condizioni di totale sicurezza, un incremento di pressione statica di giacimento fino al 107% della pressione di scoperta (STOGIT, 2012).

Acquisito il parere positivo della Commissione Tecnica di Verifica dell’Impatto Ambientale, del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, e della Regione Emilia Romagna (RER), in data 14/3/2017 è stata decretata la compatibilità ambientale del progetto, subordinatamente al rispetto di una serie di prescrizioni (MATTM, 2017).

In particolare, le prescrizioni indicate da RER richiedono la realizzazione di attività di monitoraggio da svolgere in accordo con quanto definito nel “Protocollo Operativo – Attività di Sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione Minerbio Stoccaggio”, sottoscritto da MiSE, RER e Concessionario in data 5/5/2016, che individua l’Istituto

Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) come Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) (RER, 2016a).

L'individuazione delle SPM per le attività antropiche di sottosuolo è stata prevista dal MiSE nel documento "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" (da qui in poi denominati "ILG") che prescrive appunto un'attività di sperimentazione sia per le attività antropiche che prevedono la reiniezione in sottosuolo dei fluidi di strato separati dagli idrocarburi prodotti, sia per lo stoccaggio di gas naturale in sottosuolo (MiSE-DGS-UNMIG, 2014). Per quanto riguarda il monitoraggio della sismicità, gli ILG introducono due distinti volumi crostali di rilevazione: il Dominio Interno (DI) e il Dominio Esteso (DE). DI definisce il volume crostale all'interno del quale si ritiene possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta. Esso rappresenta perciò il volume di riferimento per il quale l'eventuale sismicità deve essere monitorata e analizzata con la massima sensibilità. DE viene introdotto invece allo scopo di contestualizzare i fenomeni di sismicità monitorati. Per le attività di stoccaggio, DI comprende la zona mineralizzata e una ulteriore fascia nell'intorno del giacimento fino ad una distanza di 2-3 km, in funzione dell'estensione del giacimento stesso. DE si deve estendere invece oltre DI per una fascia di ampiezza compresa tra 5 e 10 km, a seconda delle dimensioni del giacimento.

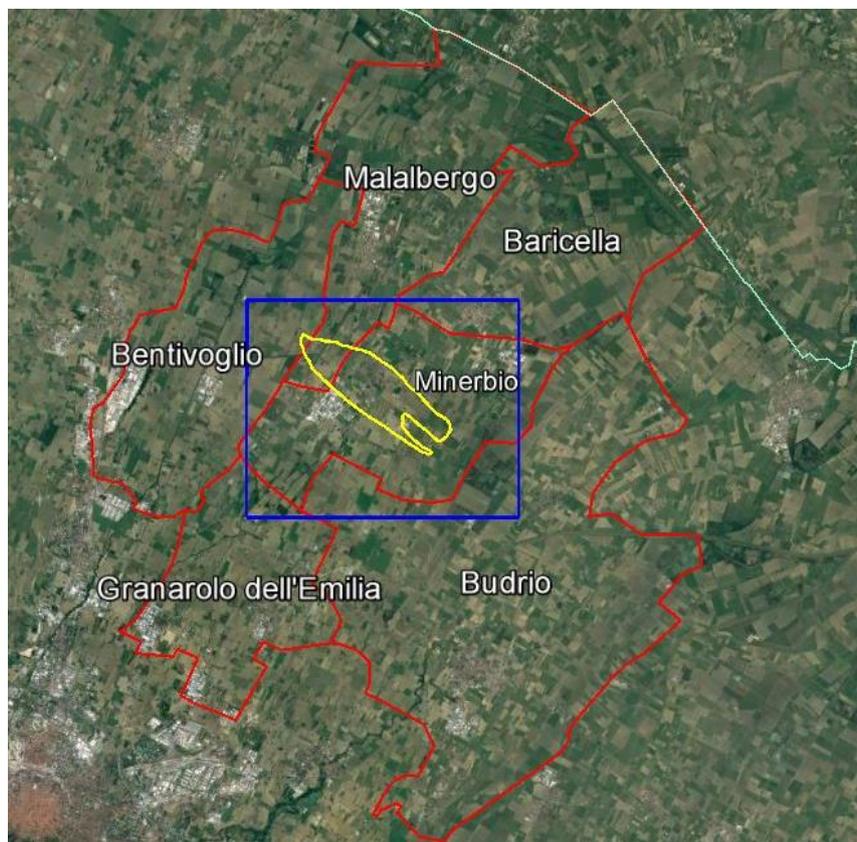


Figura 1. Concessione di stoccaggio di gas naturale "Minerbio Stoccaggio" (rettangolo blu) e proiezione in superficie del contatto gas-acqua (GWC) originario del reservoir (linea gialla). Il contatto GWC è localizzato a 1370 m di profondità e corrisponde ad un'area di circa 8 km². Vengono mostrati i confini dei comuni interessati dalla concessione di stoccaggio. La linea chiara in alto a destra indica il confine tra le provincie di Bologna e Ferrara.

Il protocollo sottoscritto da MiSE, RER e Concessionario (RER, 2016a) si propone di:

- 1) applicare in via sperimentale gli ILG alla concessione “Minerbio stoccaggio”, quale caso pilota, al fine della loro prova in campo, regolando l’adeguamento e l’eventuale potenziamento della rete di monitoraggio esistente e disciplinando la conduzione dei monitoraggi;
- 2) condurre per almeno un anno il monitoraggio con la rete rispondente ai criteri indicati nelle linee guida allo scopo di definire le caratteristiche sismo-tettoniche dell’area;
- 3) fornire gli elementi necessari per un eventuale aggiornamento degli ILG in base all’esperienza acquisita, così come previsto dagli ILG stessi (RER, 2016b).

Le fasi della sperimentazione prevedono:

- a) la verifica delle reti di monitoraggio esistenti;
- b) la programmazione dell’eventuale implementazione e potenziamento progressivo delle reti di monitoraggio, in base ai criteri degli ILG, con un approccio graduale e sulla base dei risultati sperimentali che verranno acquisiti;
- c) la trasmissione diretta dei dati rilevati dalle reti di monitoraggio;
- d) l’elaborazione ed interpretazione dei dati acquisiti durante il monitoraggio e l’utilizzo dei dati di produzione e stoccaggio, geologici e di sottosuolo forniti dal Concessionario, unitamente ai risultati dei monitoraggi fin qui condotti dal Concessionario stesso.

1.2 Inquadramento geologico strutturale e definizione dei domini di rilevazione

Il campo di Minerbio si colloca all’interno del sistema di pieghe romagnole dell’Appennino Emiliano-Romagnolo, nella parte meridionale della Pianura Padana centro-orientale. In quest’area, attraverso una serie di fasi tettoniche successive, la collisione tra la placca Europea e la microplacca Adria e la conseguente evoluzione del bacino di avanfossa (*Foreland basin*) dell’Appennino settentrionale, hanno portato ad una graduale migrazione verso l’esterno della catena Appenninica a "pieghe e faglie" e allo sviluppo di depositi di accrezione asimmetrici. Dal Messiniano fino ad oggi, l’avanfossa appenninica può essere divisa in grandi e indipendenti depocentri strutturali, in corrispondenza dei quali la sedimentazione delle unità terrigene plio-quadernarie può raggiungere spessori rilevanti (fino a diverse migliaia di metri). Il depocentro della Pianura Padana - Avanfossa Adriatica, al quale appartiene l’area del serbatoio di Minerbio, è caratterizzato da spesse successioni di depositi torbiditici del Messiniano, Pliocene e Pleistocene (Ghielmi et al., 2013).

Questa regione ha subito una forte attività tettonica che, durante gran parte del Pliocene e nel Pleistocene Inferiore, ha portato alla deformazione, sollevamento, inclinazione e fagliazione dell’area che ospita il reservoir. Tale deformazione è cominciata nel tardo Pliocene inferiore, mentre nell’avanfossa si stavano depositando dei sedimenti torbiditici (sintettonici), che hanno portato alla genesi delle formazioni di Porto Corsini e Porto Garibaldi. Successivamente, durante il Pliocene superiore – Pleistocene inferiore, un altro evento tettonico ha portato alla completa strutturazione della dorsale sepolta a "pieghe e faglie" di Ferrara e al sollevamento e al tilt dell’attuale zona di Bologna (Ghielmi et al., 2013).

La Fig. 2, estratta dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna, mostra lo schema tettonico dell’area mentre in Fig. 3 viene illustrata la sezione C-C’ che affianca il lato ovest della concessione (Boccaletti et al., 2004).

La struttura che ospita il giacimento rappresenta la parte nord-occidentale di un’anticlinale fortemente asimmetrica allungata in direzione NW-SE, delimitata a NE da faglie inverse nord-vergenti (thrust di Selva-Minerbio) con dimensioni più o meno rilevanti, che creano notevoli

dislocamenti verticali (fino a centinaia di metri) degli strati più profondi, probabilmente a seguito dell'evento tettonico del Pliocene superiore - Pleistocene.

La chiusura mineraria della struttura è legata ad una trappola di tipo misto (stratigrafico-strutturale), nella quale gli elementi stratigrafici (geometrie lenticolari dei livelli sabbiosi con progressiva chiusura stratigrafica) si combinano alle strutture tettoniche plastiche (anticlinali asimmetriche) e rigide (faglie marginali nord-orientali) di cui sopra (POLITO-DITAG, 2011). In particolare, la copertura del giacimento è garantita dalla facies argilloso-siltosa del membro superiore della Formazione (F.ne) Argille del Santerno, che è presente sull'intera area del giacimento con uno spessore medio di circa 120 m e che costituisce una sigillatura continua.

Il giacimento, mineralizzato a gas, è composto da diversi livelli sabbiosi isolati compresi nella F.ne di Porto Garibaldi (livelli C, D ed E) e nelle Argille del Santerno inferiore (livello F), interposte tra la F.ne di Porto Garibaldi e la F.ne Porto Corsini. Nelle coperture sono presenti altri corpi sabbiosi mineralizzati a gas, noti come livelli PLQ1, A1, A2 e B. In Tab.1 viene riportata schematicamente la successione stratigrafica attraversata dai pozzi del campo (POLITO-DITAG, 2011).

Il reservoir principale del campo di Minerbio è rappresentato dal Pool C, un corpo sedimentario composto da più sequenze sabbiose di genesi torbidityca, caratterizzate dalla presenza di livelli argillosi di spessori variabili (F.ne Porto Garibaldi) che si sedimentarono tra il Pliocene medio ed il Pliocene superiore su un alto strutturale (Argille del Santerno inferiore).

Il Pool C comprende 4 corpi sabbiosi principali, indicati come livelli C1, C2, C3, C3-1. Un quinto livello poroso (C3-2) è presente nella zona basale del pool, ma risulta saturo in acqua. Interposti ai livelli principali vi sono 3 layers argillosi, correlabili su tutto il campo.

L'acquifero che delimita il Pool C agisce soprattutto da nord-est e da sud e l'originale contatto gas-acqua (GWC) è stato riconosciuto ad una profondità di 1370 m.

Il Pool C è anche l'intervallo stratigrafico attualmente adibito all'attività di stoccaggio, realizzato interno di livelli sabbiosi di origine torbidityca che raggiungono uno spessore complessivo di circa 80 m (POLITO-DITAG, 2012).

In Fig. 4 vengono mostrate la topografia del livello sommitale del Pool C (F.ne Porto Garibaldi – top strutturale) e una sezione in direzione EW del giacimento (STOGIT, 2012).

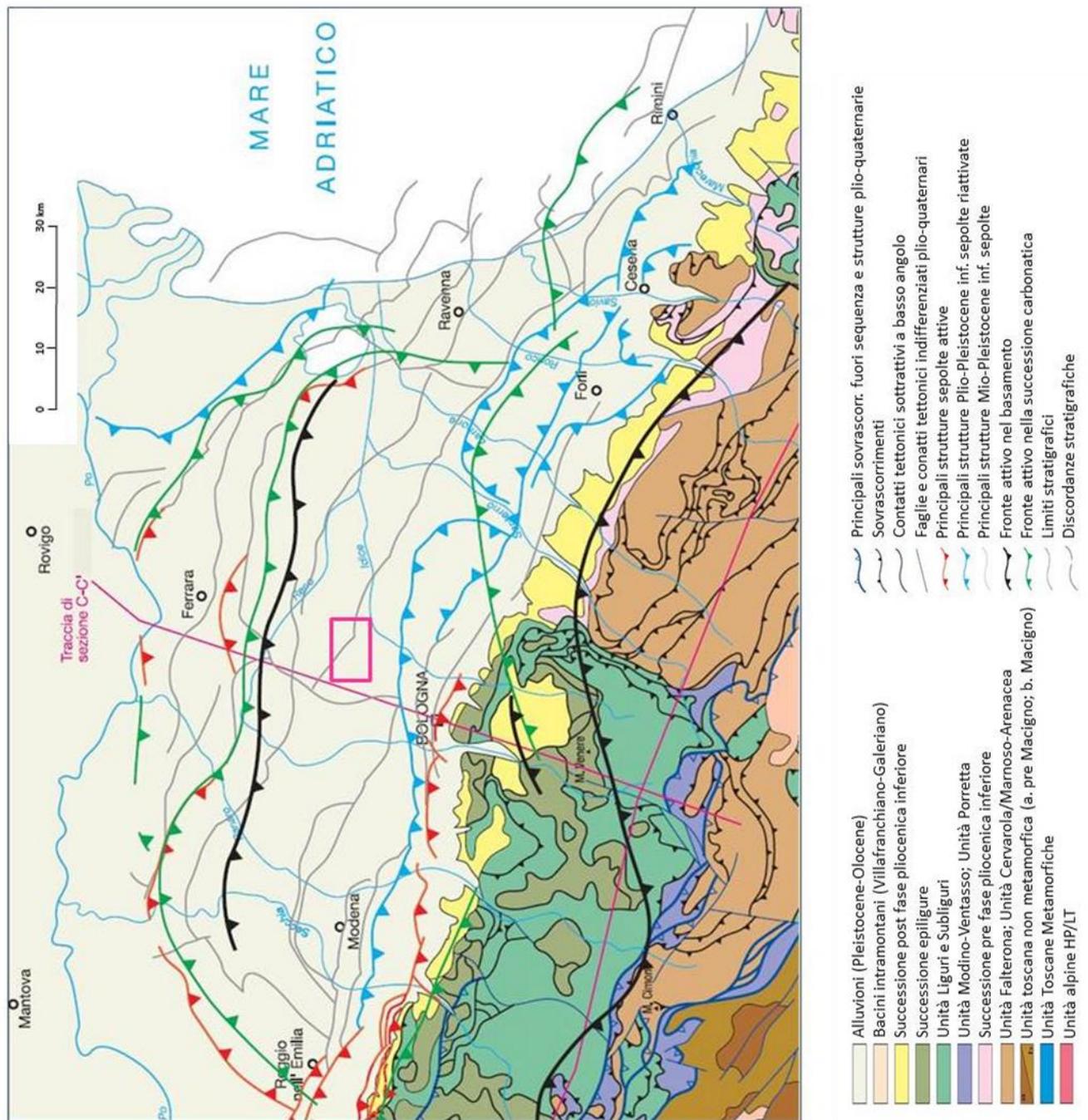


Figura 2. Impostazione strutturale nell'intorno della concessione "Minerbio Stocaggio" (rettangolo viola). Viene indicata la traccia della sezione C-C' mostrata in Fig.3 (modificata da Boccaletti et al., 2004).

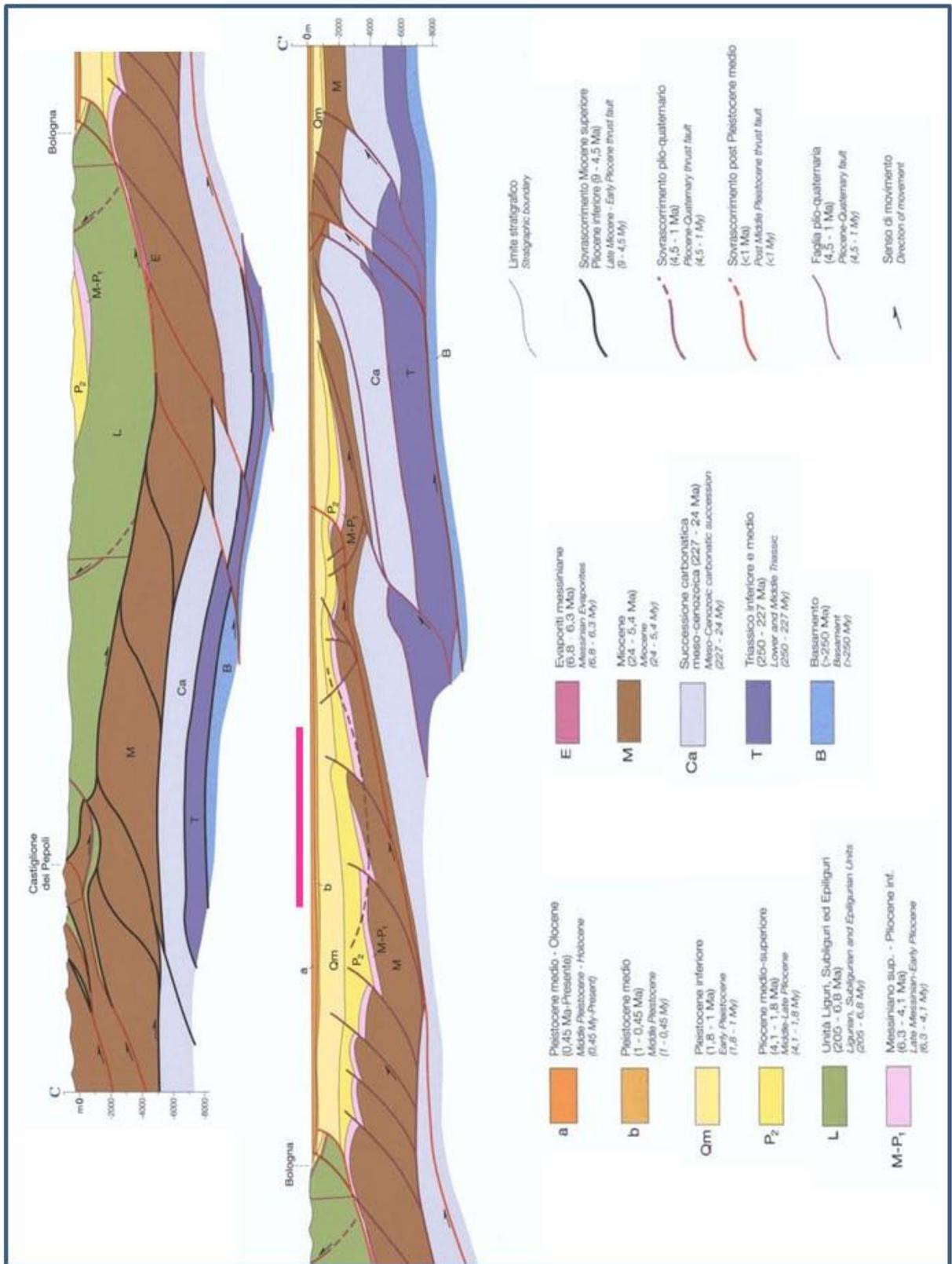


Figura 3. Linea C-C' del lavoro di Boccaletti *et al.* (2004), sulla quale è stata evidenziata la posizione della concessione “Minerbio Stocaggio” (linea viola) (cfr. Fig.2).

ETA'	FORMAZIONE	Spessori (m)	LIVELLO e mineralizzazione	POOL	
Quaternario	Alluvioni recenti e attuali	200			
Pleistocene	Sabbie d'Asti	800			
Pliocene medio - superiore	Argille del Santerno (sup.)	200	gas	PLQ1,A1,A2,B	
	Fm. Porto Garibaldi	300	C1	gas	POOL C
			C2		
			C3		
			C3-1	acqua	POOL D, E
			C3-2		
C3-3	gas				
C3-4					
C3-5					
Pliocene inferiore	Argille del Santerno (Inf.)	100	gas	POOL F	
	Fm. Porto Corsini	>150	<i>unconformity</i>		
Messiniano	Fm. Fusignano				

Tabella 1. Schema stratigrafico e nomenclatura dei livelli principali del campo di Minerbio (modificata da POLITO-DITAG, 2011).

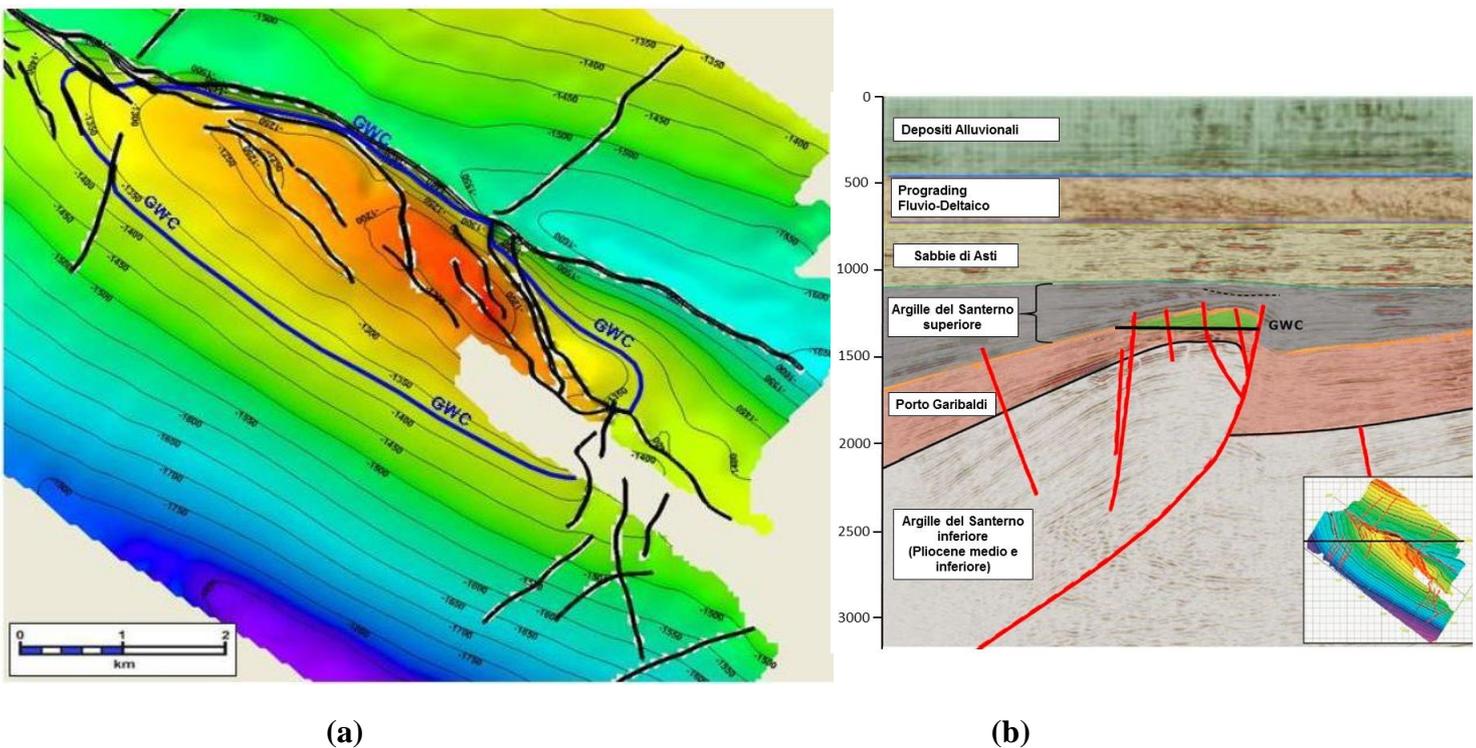


Figura 4. (a) mappa del top strutturale del giacimento di Minerbio; (b) sezione tettono-stratigrafica in direzione EW della struttura che ospita il giacimento (modificate da POLITO-DITAG, 2012).

In accordo con le prescrizioni contenute negli ILG, la definizione dei domini di rilevazione interno ed esteso, DI e DE rispettivamente, è stata stabilita a partire dalla profondità e dall'estensione areale del GWC. Le dimensioni lineari della superficie interna alla linea GWC sono di circa 2 e 6 km nelle direzioni NE-SW e NW-SE, rispettivamente. Di conseguenza, considerata la proiezione in superficie del punto centrale, C, si definisce come DI un volume crostale di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ la cui proiezione in superficie risulta centrata attorno a C. Il volume DE viene definito estendendo DI in superficie e in profondità di 6 km, per un volume complessivo pari a $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$. Nelle Fig. 5 e 6 vengono mostrate la mappa delle proiezioni in superficie dei domini di rilevazione e le proiezioni di tali domini sulla sezione C-C' di Boccaletti et al. (2004).

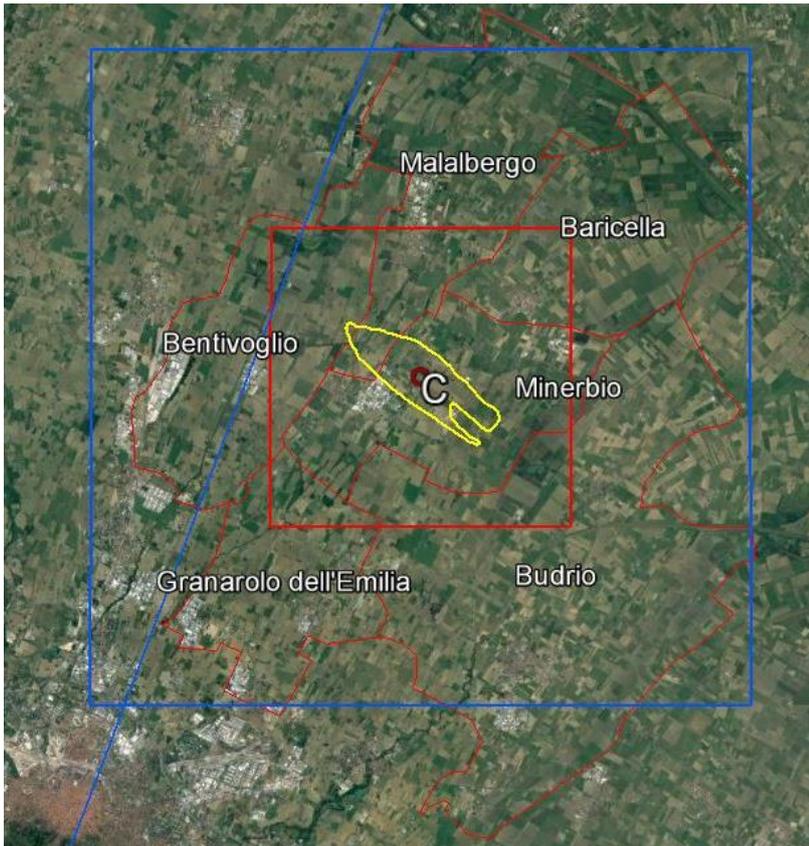


Figura 5. Proiezione in superficie dei domini di rilevazione interno (DI) ed esteso (DE) (box rosso e box blu, rispettivamente). DI e DE hanno dimensioni di $(10 \times 10 \times 5) \text{ km}^3$ e $(22 \times 22 \times 11) \text{ km}^3$ rispettivamente. Vengono mostrati la proiezione in superficie del contatto GWC, i confini dei comuni interessati dalla concessione “Minerbio Stoccaggio” e la posizione di C, il punto centrale delle proiezioni in superficie dei domini di rilevazione, di coordinate: 44.623 N; 11.490 E. La linea blu che affianca il lato ovest del dominio interno corrisponde alla traccia della sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004).

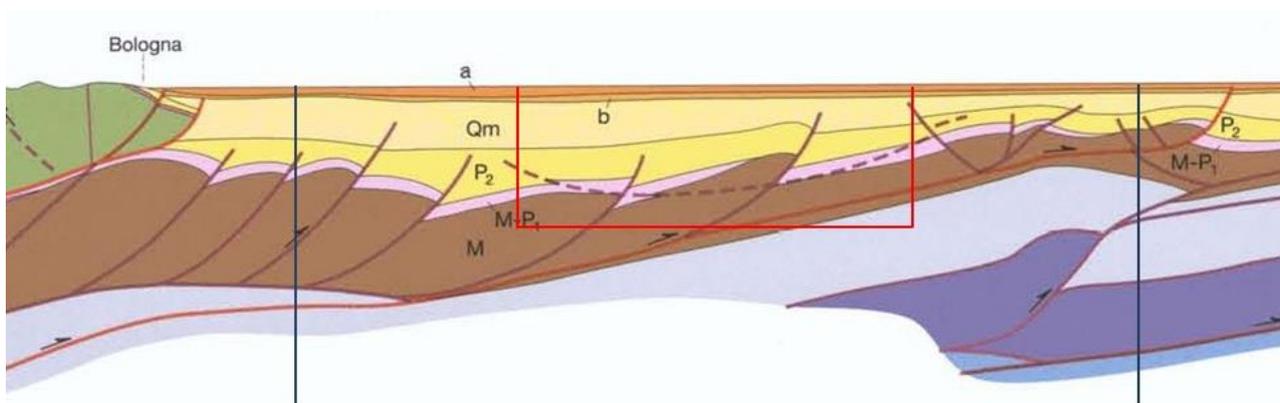


Figura 6. Proiezioni dei domini di rilevazione sulla sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004). Linea rossa: dominio interno; linea blu: dominio esteso. Le profondità dei domini DI e DE sono di 5 e 11 km, rispettivamente

1.3 Monitoraggio microsismico

La concessione “Minerbio Stoccaggio” è situata in un’area nella quale, considerando quanto riportato in letteratura, la Rete Sismica Nazionale (RSN) dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia consente di ottenere una magnitudo minima di localizzazione pari a 2.0 e una probabilità inferiore al 50% di localizzare eventi di magnitudo locale pari a 1.5 (Schorlemmer et al., 2010).

Nel seguito, in particolare nel paragrafo dedicato alla capacità di detezione della rete sismica, vedremo in maggior dettaglio le stime - aggiornate all’attuale configurazione della RSN - relative ai valori di magnitudo minima di localizzazione relativamente alle stazioni della RSN, alla rete sismica costituita dalle stazioni gestite dal Concessionario e alla rete sismica ottenuta integrando le stazioni del Concessionario con quelle della RSN.

Durante lo svolgimento della Convenzione, in un’area di dimensioni (110x110) km², centrata attorno alla proiezione in superficie del giacimento, 13 siti erano monitorati con stazioni della RSN (Fig. 7).

In particolare sono presenti 11 sensori velocimetrici (**NDIM, SERM, CAVE, RAVA, FIU, IMOL, ZCCA, MTRZ, BRIS**) e 10 accelerometri (**NDIM, SERM, FERS, MODE, CMPO, FAEN, IMOL, ZCCA, MTRZ, BRIS**). 6 siti (quelli evidenziati in grassetto nei precedenti elenchi) sono equipaggiati con un doppio sensore e, tra questi, SERM e IMOL sono dotati di sensore velocimetrico installato in pozzetto (a 135 e 175 m di profondità, rispettivamente). La stazione FIU è collocata a pochi decimetri di distanza da una delle stazioni della rete sismica del Concessionario (MI01), risultando molto utile in varie fasi del progetto per operare opportune tarature e confronti.

Durante lo svolgimento della Convenzione erano inoltre disponibili altre due stazioni sismiche (A307A, A308A) dedicate al progetto internazionale AlpArray (AlpArray, 2016), di cui INGV è membro. Si è ottenuto il permesso di utilizzare i dati di queste due stazioni temporanee per questo studio.

La media della minima distanza inter-stazione della Rete Sismica Nazionale è di circa 21 km (Tab. 2) (coordinate stazioni in INGV-CNT, 2019a).

Come suggerito in MiSE-DGS-UNMIG (2014) e rispettando le indicazioni, *tali stazioni sono state integrate nella rete microsismica “Minerbio Stoccaggio” allo scopo di aumentare le capacità di rilevazione, soprattutto nel dominio esteso.*

	FIU	BRIS	CAVE	CMPO	FAEN	FERS	IMOL	MODE	MTRZ	NDIM	RAVA	SERM	ZCCA
FIU		51.09	45.98	25.72	49.57	29.53	37.00	42.90	36.76	54.24	32.13	43.90	51.96
BRIS	51.09		93.47	39.72	11.42	77.55	15.13	78.97	28.92	100.75	78.26	94.91	64.41
CAVE	45.98	93.47		70.85	94.32	42.53	81.17	26.58	69.94	8.56	15.25	28.06	57.27
CMPO	25.72	39.72	70.85		32.88	41.52	25.09	67.99	42.43	79.29	57.67	62.38	70.55
FAEN	49.57	11.42	94.32	32.88		73.27	13.27	82.80	36.12	102.07	79.39	92.35	71.98
FERS	29.53	77.55	42.53	41.52	73.27		62.53	55.71	66.29	50.57	37.08	22.60	75.92
IMOL	37.00	15.13	81.17	25.09	13.27	62.53		69.69	25.78	88.86	66.18	80.45	60.88
MODE	42.90	78.97	26.58	67.99	82.80	55.71	69.69		51.61	28.90	19.40	50.33	31.07
MTRZ	36.76	28.92	69.94	42.43	36.12	66.29	25.78	51.61		76.23	54.89	78.15	35.89
NDIM	54.24	100.75	8.56	79.29	102.07	50.57	88.86	28.90	76.23		22.68	34.08	59.94
RAVA	32.13	78.26	15.25	57.67	79.39	37.08	66.18	19.40	54.89	22.68		31.49	46.40
SERM	43.90	94.91	28.06	62.38	92.35	22.60	80.45	50.33	78.15	34.08	31.49		77.48
ZCCA	51.96	64.41	57.27	70.55	71.98	75.92	60.88	31.07	35.89	59.94	46.40	77.48	

Tabella 2 – Inter-distanze (km) tra le stazioni della RSN gestite da INGV

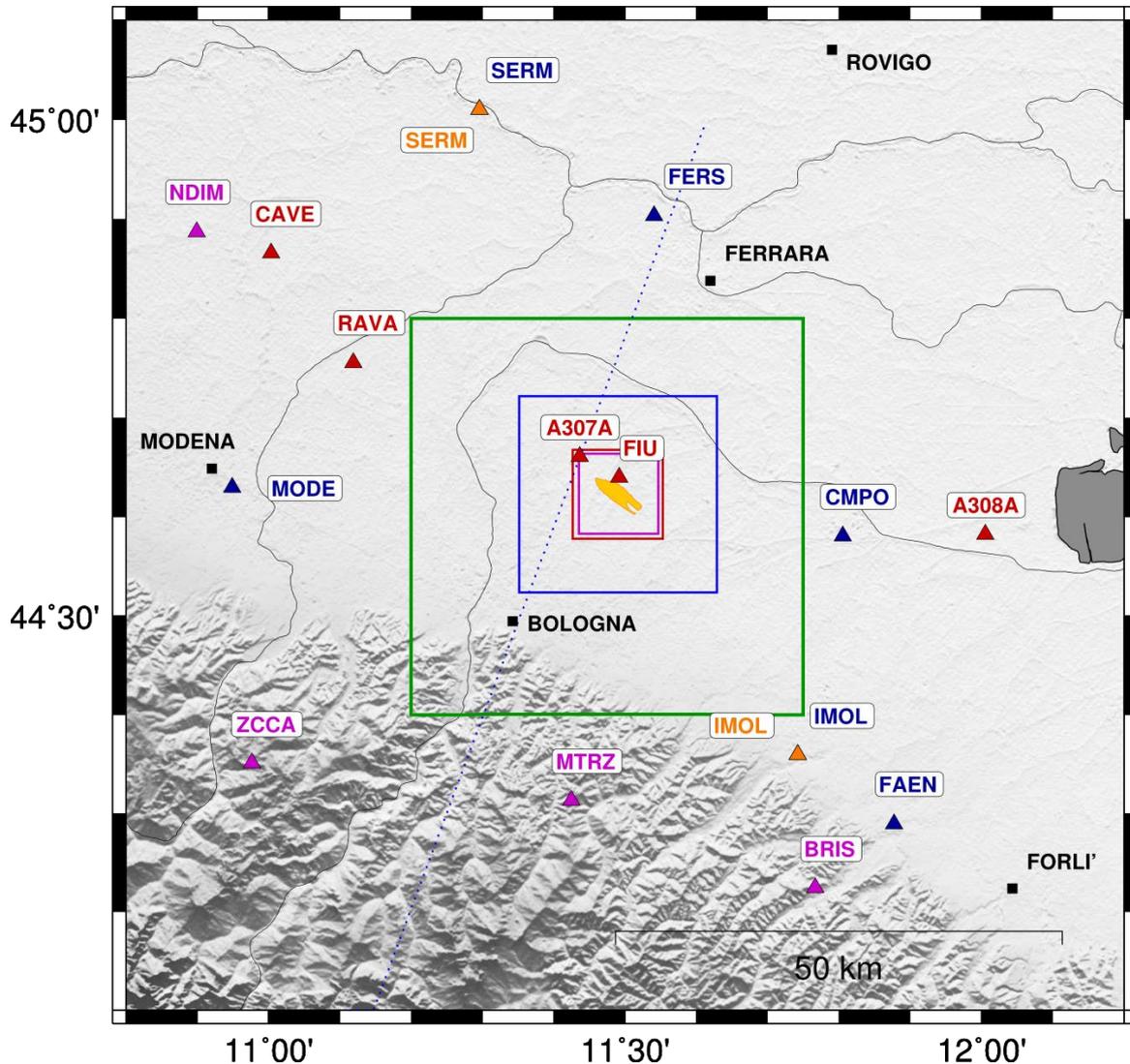


Figura 7. Stazioni della Rete Sismica Nazionale e del Progetto AlpArray situate in un'area di (110 x 110) km² centrata attorno alla posizione del giacimento “Minerbio Stocaggio”. Triangoli rossi: sensori velocimetrici posti in superficie; triangoli blu: accelerometri posti in superficie; triangoli viola: stazioni superficiali equipaggiate con doppio sensore; triangoli arancioni: stazioni dotate di accelerometro in superficie e sensore velocimetrico in pozzetto (profondità: 100-200m). Vengono indicate le proiezioni in superficie dei limiti del Dominio Interno e del Dominio Esteso di rilevazione (linee rossa e blu, rispettivamente); il limite dell'area di indagine per l'analisi della sismicità rilevata dal Concessionario nel periodo 1979-2016 (linea verde); la traccia della sezione C-C' di Boccaletti *et al.* (2004) (linea tratteggiata blu); la proiezione in superficie dell'area delimitata dalla linea di contatto GWC (area gialla) e il limite dell'area di installazione della rete di monitoraggio microsismico (linea viola).

Il monitoraggio microsismico è stato realizzato dal Concessionario già a partire dal giugno 1979, mediante una rete di sensori velocimetrici che, nel periodo sino a Giugno 1986, ha raggiunto un numero massimo di 7 stazioni (Fig.8a) (STOGIT 2016). Successivamente, la rete è stata ridotta ad una sola stazione, integrata con le stazioni di altre reti emiliane gestite dal Concessionario, situate però a 40-50 km di distanza da Minerbio. A partire da Settembre 1990, la rete di Minerbio è stata implementata con l'installazione di 3 stazioni velocimetriche, inizialmente dotate della sola componente verticale e, da Luglio 1998, dotate di sensori triassiali. A partire da Aprile 2016, la rete è stata implementata con l'installazione di una stazione aggiuntiva in pozzetto (a 100 m di profondità) dotata di sensore velocimetrico triassiale. La configurazione della rete microsismica, a inizio della Convenzione, è mostrata in Fig.8b (STOGIT 2016). Nel seguito vedremo gli sviluppi e gli adattamenti operati dal Concessionario in linea con le indicazioni contenute in ILG. Occorre comunque rimarcare che i vari componenti strumentali delle reti sismiche operate "storicamente" dal Concessionario sono sempre state in linea con i tempi, utilizzando sensori e digitalizzatori di ottima qualità. Ad esempio il sistema di acquisizione e "trigger" digitale, basato sui registratori Mars88 Lennartz, ha rappresentato negli anni '90 uno degli standard maggiormente evoluti (sia per qualità di prestazione che per semplicità di utilizzo) per la comunità sismologica internazionale.

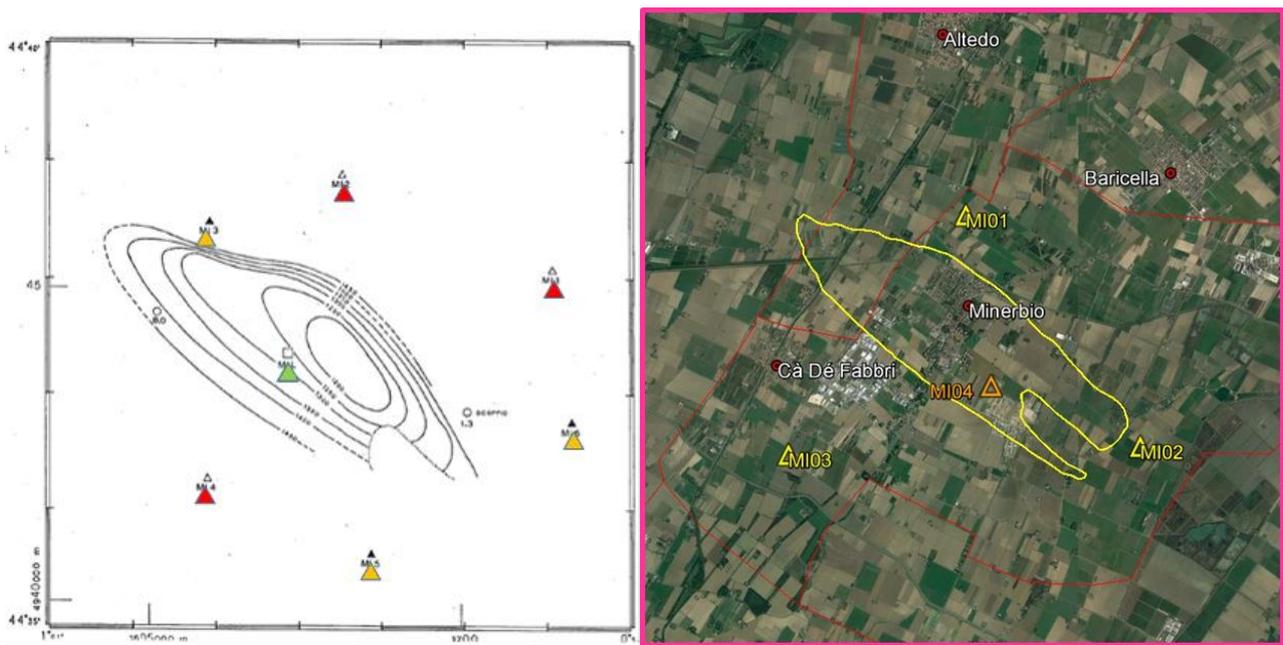


Figura 8. Configurazione della rete microsismica “Minerbio Stoccaggio”: (a) Stazioni operative nel periodo Giugno 1979 – Giugno 1986. Simboli rossi: stazioni con sensore monocomponente installate in superficie; simboli gialli: stazioni con sensore monocomponente installate in pozzetto; simbolo verde: stazione con sensore triassiale; (b) Configurazione a inizio progetto della rete microsismica. Simboli gialli: stazioni con sensore triassiale installate in superficie; simbolo arancione: stazione con sensore triassiale installata in pozzetto (profondità: 100m). I limiti dell'area rappresentata corrispondono al contorno indicato dalla linea viola di Fig.7.

L'evoluzione della rete microsismica è mostrata in Fig.9 (STOGIT 2016). Come si vede, le forme d'onda sono state acquisite in forma digitale a partire dal 1991 e l'acquisizione in continuo è stata avviata a partire da Maggio 2015. Nell'ambito delle attività di sperimentazione degli ILG sono state messe a disposizione le forme d'onda registrate dal 1992 al 2015 con modalità di acquisizione a trigger nel formato digitale Lennartz e, a partire dal 2015, i dati acquisiti in continuo nel formato miniSEED. Inoltre, sulla base delle informazioni contenute nei rapporti "Rete emiliana", redatti da Eni E&P dal 1979 al 2009, e nei bollettini annuali di interpretazione della microsismicità del periodo 2010-2016, il Concessionario ha fornito l'elenco dei sismi locali registrati dal 1979 al 2016 entro un raggio di 10 km dal *reservoir*.

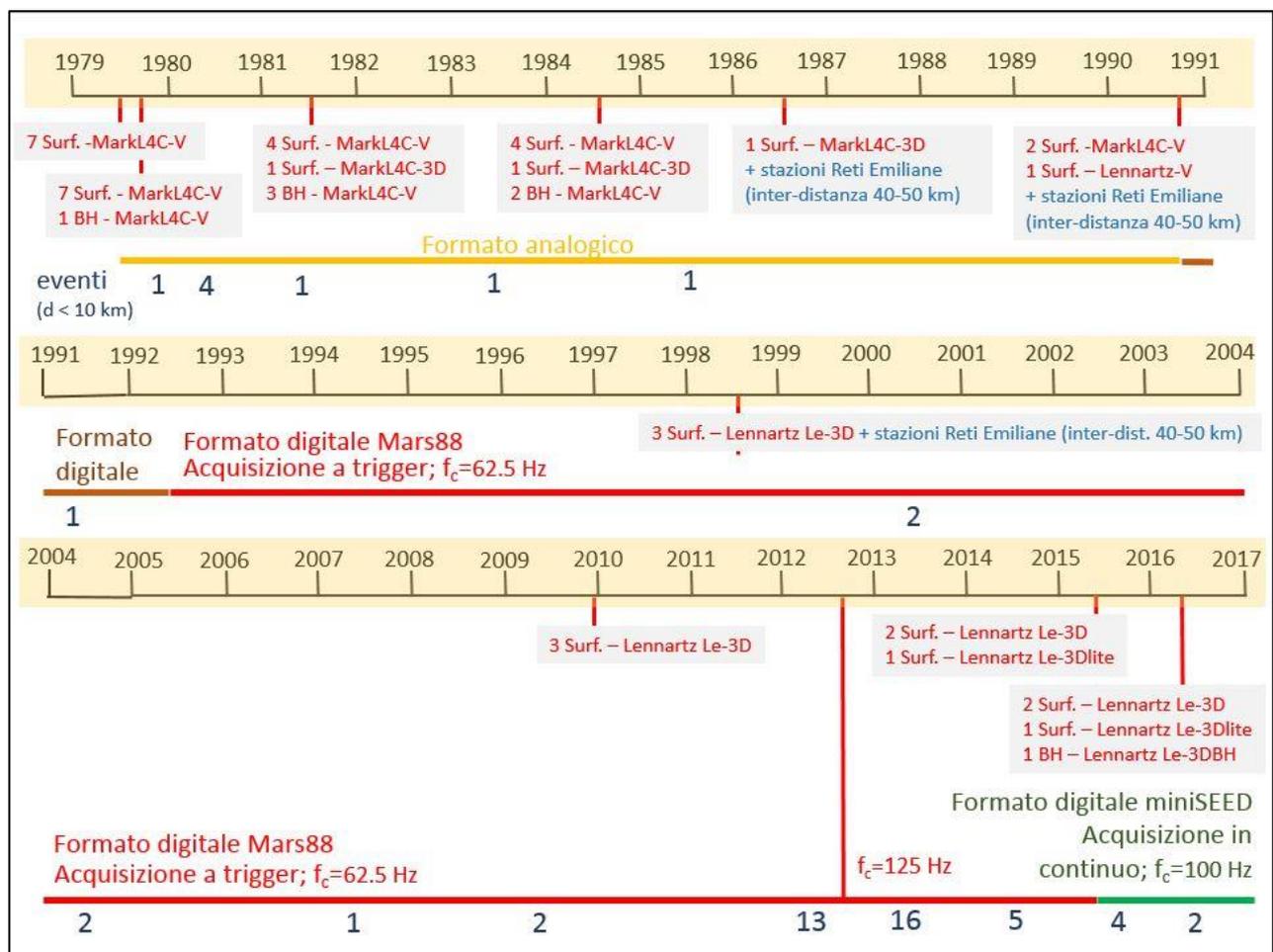


Figura 9. Evoluzione della rete microsismica "Minerbio Stocaggio". In corrispondenza dell'asse temporale vengono elencati i sensori velocimetrici installati (Surf. = sensore in superficie; BH = sensore in pozzetto); il formato dei dati acquisiti (analogico o digitale); la tipologia di acquisizione (a trigger o in continuo) e la corrispondente frequenza di campionamento f_c ; il numero di eventi sismici registrati dalla rete e localizzati entro 10 km di distanza dal *reservoir*.

A partire dal Catalogo INGV consultabile dal sito istituzionale (INGV-CNT, 2019b), è stato quindi effettuato innanzitutto un confronto per individuare eventuali eventi che, pur essendo presenti nel catalogo INGV e dunque registrati dalla RSN, risultassero invece assenti dal Catalogo STOGIT.

A tal fine sono state utilizzate anche le informazioni contenute nei rapporti “Rete emiliana” e nei bollettini annuali di interpretazione della microsismicità messi a disposizione dal Concessionario.

Il confronto è stato effettuato considerando la distribuzione della sismicità registrata dalla RSN nel periodo 1985-2016 e la distribuzione degli eventi contenuti nel Catalogo STOGIT.

Come era prevedibile, il confronto tra i due cataloghi e l’analisi delle informazioni contenute nei rapporti messi a disposizione dal Concessionario, hanno rivelato che, durante tutto il periodo di funzionamento, la rete microsismica “Minerbio Stocaggio” ha registrato più eventi di quelli che compaiono nel Catalogo INGV.

Infatti, nel limitato volume crostale che viene considerato dal Catalogo STOGIT, la geometria della rete microsismica, consente di monitorare in modo efficiente eventi sismici di magnitudo inferiore alla magnitudo minima di localizzazione che la RSN raggiunge in quest’area.

Nel periodo in esame (1985-2016) sono stati inseriti a catalogo dal Concessionario 47 eventi con distanza epicentrale < 10 km.

Ad esclusione di 3 eventi sismici, gli eventi presenti nel Catalogo STOGIT sono stati localizzati a profondità maggiori di 4 km. Il primo di questi 3 eventi è riportato a catalogo il 19/12/1979 con una magnitudo estremamente bassa (1.2) e una profondità di 1.8 km.

Gli altri 2 eventi (con ipocentro a 2.9 e 3.0 km, rispettivamente il 25/03/1985 alle ore 04:19 UTC e il 02/02/1991 alle ore 13:48 UTC) non riportano il valore della magnitudo e non sono stati rilevati (presumibilmente a causa della loro bassa magnitudo) dalla rete sismica nazionale.

Occorre comunque considerare che la qualità delle informazioni contenute nei cataloghi strumentali italiani, in particolar modo per quanto riguarda la RSN, è andata via via migliorando con il progredire della strumentazione utilizzata, delle tecniche di analisi e del numero di stazioni sismiche disponibili.

1.4 Rete di monitoraggio sismica integrata

Le stazioni sismiche che compongono la rete integrata di monitoraggio dell'area in esame sono il risultato dell'unione di una parte della Rete Sismica Nazionale (RSN), gestita da INGV, e della rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", gestita dal Concessionario.

In particolare, per la RSN sono state selezionate tutte le stazioni con distanza da Minerbio entro un raggio di 55 km: entro tale distanza ricadono 13 stazioni sismiche.

Inoltre, considerando che entro tale distanza erano presenti due stazioni sismiche INGV dedicate al progetto AlpArray (AlpArray, 2016), di cui l'istituto è membro, è stato chiesto ed ottenuto il permesso di utilizzare i dati di queste due stazioni, utili anche per meglio definire la localizzazione degli eventi e per il calcolo della magnitudo durante il progetto di sperimentazione degli ILG.

Queste 2 stazioni sono equipaggiate con sensori velocimetrici very broad band (Trillium-120C, prodotto da Nanometrics) con risposta piatta in velocità da 120s a oltre 100 Hz, permettendo quindi di effettuare un confronto con i sensori con frequenza propria 1 Hz e dimostrare come anche i sensori a 1 Hz siano assolutamente adatti agli scopi del monitoraggio sismico dei siti di stoccaggio gas.

Come descritto nel precedente paragrafo e illustrato in Fig. 8b, all'inizio del progetto le stazioni delle rete microsismica "Minerbio Stoccaggio", tutte installate nell'area del Dominio Interno di rilevazione, erano 4.

Negli ILG (par. 3 pag. 8) *"si raccomanda che le nuove infrastrutture di monitoraggio siano progettate anche tenendo in considerazione un principio di valorizzazione dell'esistente, quindi, di prevedere, a seguito di opportuna valutazione, l'eventuale adeguamento di infrastrutture già operanti per ottenere le prestazioni richieste"*.

La parte iniziale della Convenzione è stata dedicata alla progettazione della rete sismica, avendo ben presente il concetto di valorizzazione dell'esistente.

Le 4 stazioni già installate rispondono appieno, a partire dal punto di vista del posizionamento, alle indicazioni previste negli ILG. La stazione centrale (MI04) è posizionata al centro del campo di stoccaggio e, opportunamente, in un pozzetto a 100 m per ridurre il disturbo antropico.

Nel corso del progetto il sito MI04 è stato utilizzato per ospitare anche un accelerometro, come richiesto da ILG.

Le altre 3 stazioni in superficie (MI01, MI02, MI03) sono poste entro 3.2 km di distanza dalla stazione centrale e sono disposte a una distanza angolare di circa 120° una dall'altra, racchiudendo in maniera ideale la zona di stoccaggio.

Per progettare l'adeguamento della rete sismica, valutando come migliorare la detezione del DI e del DE di rilevazione, sono state effettuate delle simulazioni utilizzando differenti configurazioni.

Le analisi di detezione sono state effettuate considerando la rete microsismica installata nella concessione "Minerbio Stoccaggio" fino a Marzo 2018 (che comprende le 4 stazioni sopra indicate, rete denominata in Tab. 4 con RO) e un'implementazione della RO (definita in Tab. 4 RP2017) comprendente fino a 11 stazioni di cui 5 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 4 a 150 m di profondità).

I risultati delle analisi di detezione presentati nella Relazione N.01 del Protocollo Operativo (INGV-MI, 2017) mostrano ad esempio che, anche in condizioni di rumore ambientale particolarmente sfavorevoli, la RP2017 consente di localizzare con buona precisione eventi sismici di magnitudo fino a 0.9 alla base del Dominio Interno.

In un'ottica di gradualità di sviluppo della rete microsismica e in accordo con quanto previsto dal Protocollo Operativo, a partire dal secondo trimestre 2018 il Concessionario ha installato nell'area della concessione, una versione sperimentale della RP2017 (definita in Tab. 3 RP2018), che comprende 8 stazioni di cui 4 con sensore in pozzetto (1 a 100 m e 3 a 150 m di profondità).

L'analisi effettuata è descritta in dettaglio nella Relazione Trimestrale 2018-02 (pagine 9-25).

I risultati, in sintesi, rilevano che nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, la RP2018 risulta leggermente meno sensibile della RP2017, ma con differenze per le soglie di localizzazione che generalmente risultano essere intorno al decimo (0.1) di magnitudo ML.

Si tratta quindi di differenze assolutamente trascurabili che ricadono nell'intervallo di incertezza delle stime di questo parametro, generalmente pari a 0.2 – 0.3.

L'analisi della distribuzione areale dei valori di soglia mostra inoltre che la mancata installazione di alcune stazioni modifica la distribuzione areale della sensibilità della rete, aumentando leggermente la soglia di localizzazione ad Est e a Sud del reservoir, senza tuttavia compromettere la sensibilità media della rete.

Questo leggero miglioramento non giustifica l'installazione di ulteriori stazioni, come vedremo meglio e con maggior dettaglio nel paragrafo dedicato alle analisi di detezione e in cui verrà effettuato, come previsto da ILG, il controllo del livello di soglia raggiunto dalla Rete Sismica installata dal Concessionario, dalla Rete Sismica Integrata (stazioni RSN INGV con le stazioni del Concessionario) e il miglioramento rispetto alla situazione di riferimento, rappresentata unicamente dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale.

La Rete Sismica Integrata (costituita quindi dalle stazioni del Concessionario e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV) è mostrata in Fig. 10.

Rete	Configurazione			Stazione	Latitudine N [°]	Longitudine E [°]	Quota [m]	Profondità [m]	Località
MI	RO	RP2017	RP2018	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Fondo Fiumicello (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI02	44.60820	11.52558	9	0	San Martino in Soverzano (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Spettoleria (Minerbio)
MI	RO	RP2017	RP2018	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Tintoria (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Saletto (Minerbio)
MI		RP2017	RP2018	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Santa Maria in Duno
MI		RP2017		MI07	44.56188	11.44420	22	150	Granarolo dell'Emilia
MI		RP2017	RP2018	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Riccardina (Minerbio)
MI		RP2017		MI09	44.62196	11.57970	8	0	Budrio
MI		RP2017	RP2018	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Boschi (Minerbio)
MI		RP2017		MI11	44.67707	11.43992	9	0	San Pietro in Casale

Tabella 3. Stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio e configurazione della rete nelle diverse implementazioni adottate o previste nell'ambito del Protocollo Operativo. RO: rete operativa fino a Marzo 2018; RP2017: rete pianificata nella fase iniziale del Protocollo Operativo; RP2018: scelta finale - rete operativa a partire dal secondo trimestre del 2018.

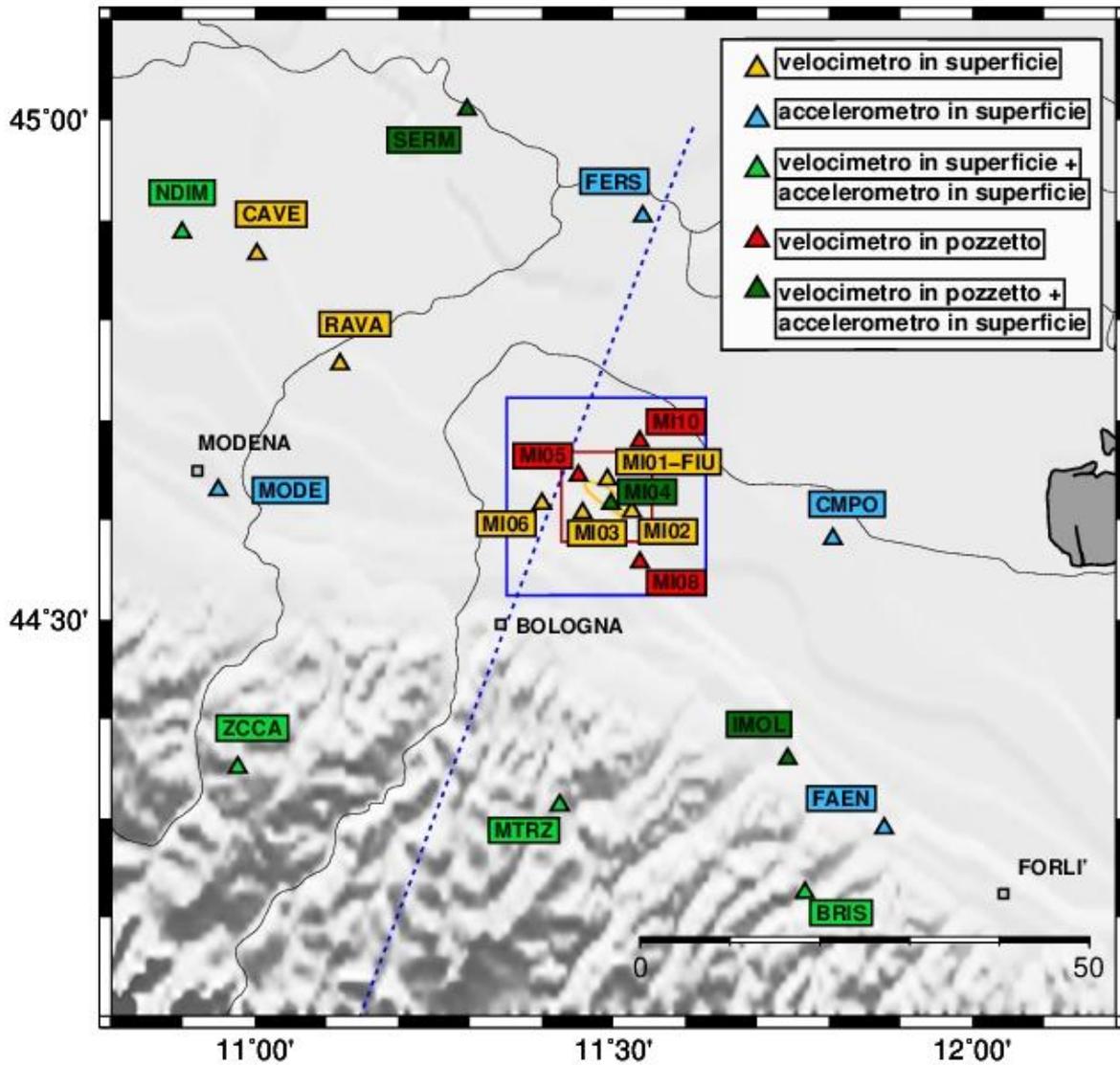


Figura 10. Configurazione della rete sismica integrata, costituita dalle stazioni della Rete Microsismica “Minerbio Stocaggio” e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV. Nella didascalia sono indicati i vari tipi di strumenti installati e la loro posizione.

1.5 Sistema di acquisizione

I criteri adottati per la scelta e la relativa configurazione di tutto il sistema di acquisizione e monitoraggio sono stati quelli di usare software, logiche e hardware già ampiamente collaudati presso INGV ed in particolare presso la sezione di Milano, poiché basati su criteri internazionali riconosciuti ed adottati dai più importanti centri di ricerca sismologica. Fortunatamente anche il Concessionario ha dimostrato di avere le capacità scientifiche e l'impianto tecnologico adatto per supportare lo schema di acquisizione previsto.

L'acquisizione in tempo reale dei dati registrati delle singole stazioni avviene utilizzando il software Seedlink (IRIS, 2016a) che, supportando il protocollo TCP/IP, crea i nodi di acquisizione dati. Questi ultimi, se opportunamente configurati, possono avere funzioni di server o di client di dati tra più nodi. Presso INGV-MI, è stato creato e configurato il nodo master dedicato all'acquisizione dati Seedlink, nel quale confluiscono direttamente i dati delle stazioni della RSN che compongono la rete integrata. In modo analogo, le stazioni della rete microsismica confluiscono direttamente al nodo Seedlink di acquisizione realizzato presso il Concessionario. Il nodo Seedlink del Concessionario confluisce direttamente nel nodo master INGV, in modo tale da avere su quest'ultimo tutte le stazioni che compongono la rete integrata.

I dati in continuo di tutte le stazioni sismiche sono acquisiti nel formato standard miniSEED (IRIS, 2016b). Il vantaggio di utilizzare questo software, oltre alla sua enorme diffusione nel mondo scientifico, con conseguente validazione, è la sua natura Open Source, basata su piattaforme Linux.

A valle del sistema di acquisizione è stato installato e configurato un sistema di analisi e di elaborazione dati in tempo reale basato su Earthworm (Earthworm Central, 2016). Anche questo software ha una natura Open Source basata su sistemi Linux ed è uno standard internazionale ampiamente diffuso presso i maggiori centri di monitoraggio sismico. Le funzioni principali di questo software sono: il riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, il riconoscimento delle fasi sismiche e la localizzazione degli eventi, il calcolo della magnitudo e dei parametri di scuotimento del suolo quali PGA, PGV e PSD.

Le tracce di ogni evento riconosciuto vengono automaticamente tagliate e convertite nel formato internazionale SAC (IRIS, 2016c) per poter essere utilizzate in elaborazioni successive. Infatti, per la creazione del bollettino sismico, ogni evento processato automaticamente viene rivisto manualmente presso INGV-MI da un operatore qualificato, che ha il compito di effettuare la validazione finale comprendente il calcolo della magnitudo e dei parametri di localizzazione dell'evento.

La procedura che porta alla creazione del bollettino sismico è basata sui seguenti passi:

- (1) acquisizione in tempo reale delle stazioni della RSN;
- (2) acquisizione in tempo reale delle stazioni del Concessionario;
- (3) creazione di un archivio unico dei dati in continuo giornalieri di tutte le stazioni nel formato miniSEED;
- (4) riconoscimento automatico degli eventi sismici in tempo reale, riconoscimento delle diverse fasi sismiche, localizzazione automatica e calcolo della magnitudo;
- (5) taglio delle forme d'onda dell'evento e conversione dei dati nel formato SAC;
- (6) rilocalizzazione manuale dell'evento sismico, riconoscimento di eventuali falsi trigger e ricalcolo della magnitudo;
- (7) creazione del bollettino sismico.

Il Concessionario ha consegnato le forme d'onda nel formato miniSEED, registrate delle proprie stazioni, da quando ha attivo questo protocollo, permettendo quindi di disporre dei dati in tale formato anche per un periodo precedente alla formalizzazione della Convenzione.

È stato quindi possibile creare un archivio integrato dei dati sismici registrati, a partire dal Maggio 2015, dalle reti IV, Z3 e MI presso il nodo master Seedlink di Milano.

A partire da Marzo 2018 tutti i segnali registrati dalle stazioni riportate in Tab.4 sono state acquisite in tempo reale su server dedicato presso INGV-MI.

Per tutte le stazioni sono state calibrate e rese disponibili le curve di risposta e le caratteristiche tecniche di sensori e acquisitori, consentendo così di determinare in unità fisiche (e non semplicemente in *counts*) accelerazione e velocità del moto del suolo oltre che i parametri spettrali

Come si vede dall'analisi della Tab. 5, la media della minima distanza inter-stazione della Rete MicroSismica di Minerbio è di circa 3,8 km.

Network	Station Code	Lat. N (°)	Lon. E (°)	Elev. (m)	Depth (m)	Site	Distance (km)	Azimuth (°)	Digitizer	Sensor 1	Sensor 2	Start time	Ending time
MI	MI01	44.64014	11.49142	9	0	Minerbio - Fondo Fiumicello	1.9	3	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	2015-121	_
MI	MI02	44.60820	11.52558	9	0	Minerbio - San Martino in Soverrano	3.3	120	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S	_	2015-121	_
MI	MI03	44.60666	11.45678	15	0	Minerbio - Spettolera	3.2	235	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-1S-MKIII	_	2015-121	_
MI	MI04	44.61596	11.49631	11	100	Minerbio - Tintoria	0.9	147	Solgeo Dymas 24 Master	LE3D-BH	SARA SA10 2G	2016-118	2018-178
										SARA SS10		2018-178	2019-117
										LE3D-BH		2019-117	2019-137
										SARA SS10		2019-137	_
MI	MI05	44.64411	11.45093	9	150	Bentivoglio - Saletto	3.9	307	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-103	_
MI	MI06	44.61623	11.40021	17	0	Bentivoglio - Santa Maria in Duno	7.2	264	Solgeo Dymas 24 Master	SARA S02	LE3D-1S-MKIII	2018-103	_
MI	MI08	44.55698	11.53678	18	150	Budrio - Riccardina	8.2	153	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-118	_
MI	MI10	44.67853	11.53648	7	150	Malalbergo- Boschi	7.2	31	Solgeo Dymas 24 Master	SARA SS10	_	2018-118	_
IV	BRIS	44.22454	11.76657	260	0	Brisighella	49.5	153	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	CAVE	44.86580	11.00310	18	0	Cavezzo	47.1	305	GAlA2	TRILLIUM-120S	_	2015-121	_
IV	CMPO	44.58080	11.80560	2	0	Campotto Po	25.5	100	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	FAEN	44.28950	11.87700	41	0	Faenza	48.2	140	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	FERS	44.90350	11.54060	3	0	Ferrara	31.4	7	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	IMOL	44.35955	11.74248	27	175	Imola	35.5	145	GAlA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	MODE	44.62972	10.94917	41	0	Modena	42.9	271	GAlA2	_	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	MTRZ	44.31280	11.42480	570	0	Monterenzio	34.9	188	TRIDENT	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	NDIM	44.88730	10.89870	19	0	Novi di Modena	55.3	302	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	RAVA	44.75587	11.11880	15	0	Ravarino	32.9	297	GAlA2	LE3D-5S	_	2015-121	_
IV	SERM	45.00997	11.29582	7	135	Sermide	45.7	340	GAlA2	LE3D-BH	EPISENSOR-2G	2015-121	_
IV	ZCCA	44.35085	10.97650	700	0	Zocca	50.8	234	GAlA2	TRILLIUM-40S	EPISENSOR-2G	2015-121	_
Z3	A307A	44.66076	11.43631	9	0	Bentivoglio	6.0	315	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	2015-121	2019-110
Z3	A308A	44.58249	12.00568	-2	0	Longastrino	41.2	96	REFTEK130	TRILLIUM-120C	_	2015-121	2019-110

Tabella 4. Stazioni della Rete Microsismica Minerbio Stoccaggio gestita dal Concessionario (sigla rete "MI"), installate all'interno della proiezione superficiale del Dominio Esteso di rilevazione; stazioni della Rete Sismica Nazionale entro 110 km dal punto centrale del giacimento "Minerbio Stoccaggio" (sigla rete "IV") e stazioni del progetto AlpArray (sigla rete "Z3"). In particolare vengono riportate: codice rete e sigla stazione, coordinate geografiche, quota e profondità dei sensori velocimetrici, località, distanza e azimuth dal centro rete, tipo di acquisitore e sensori installati. Start time indica il giorno iniziale per il quale sono presenti sul server dedicato i segnali registrati alle varie stazioni, espresso come data ordinale (anno e numero del giorno dal 1 gennaio; es. 2015-121 equivale al 1 maggio 2015), end time indica il giorno finale.

	MI01	MI02	MI03	MI04	MI05	MI06	MI08	MI10
MI01		4.46	4.62	2.72	3.23	7.69	9.92	5.56
MI02	4.46		5.45	2.47	7.13	9.96	5.76	7.87
MI03	4.62	5.45		3.29	4.19	4.60	8.40	10.18
MI04	2.72	2.47	3.29		4.76	7.60	7.30	7.65
MI05	3.23	7.13	4.19	4.76		5.07	11.83	7.77
MI06	7.69	9.96	4.60	7.60	5.07		12.66	12.81
MI08	9.92	5.76	8.40	7.30	11.83	12.66		13.51
MI10	5.56	7.87	10.18	7.65	7.77	12.81	13.51	

Tabella 5. Inter-distanze (km) per le stazioni gestite dal Concessionario

1.6 Funzionamento sistema di acquisizione e trasmissione dati, strumentazione sismica

Per quanto concerne la trasmissione dati, la stabilità della connessione con le stazioni sismiche (e il funzionamento dei relativi server di acquisizione e di tutte le procedure attive per lo scambio dati in tempo reale) si è rilevata in generale particolarmente soddisfacente, come si può vedere nella Fig. 11. Occorre rimarcare che in tutto il periodo della sperimentazione c'è stato un dialogo continuo e una piena collaborazione tra ricercatori e tecnici INGV e del Concessionario per verificare che le tipologie di segnali trasmessi/ricevuti fossero in linea con i migliori standard internazionali e segnalare eventuali malfunzionamenti o modifiche apportate agli apparati di misura.

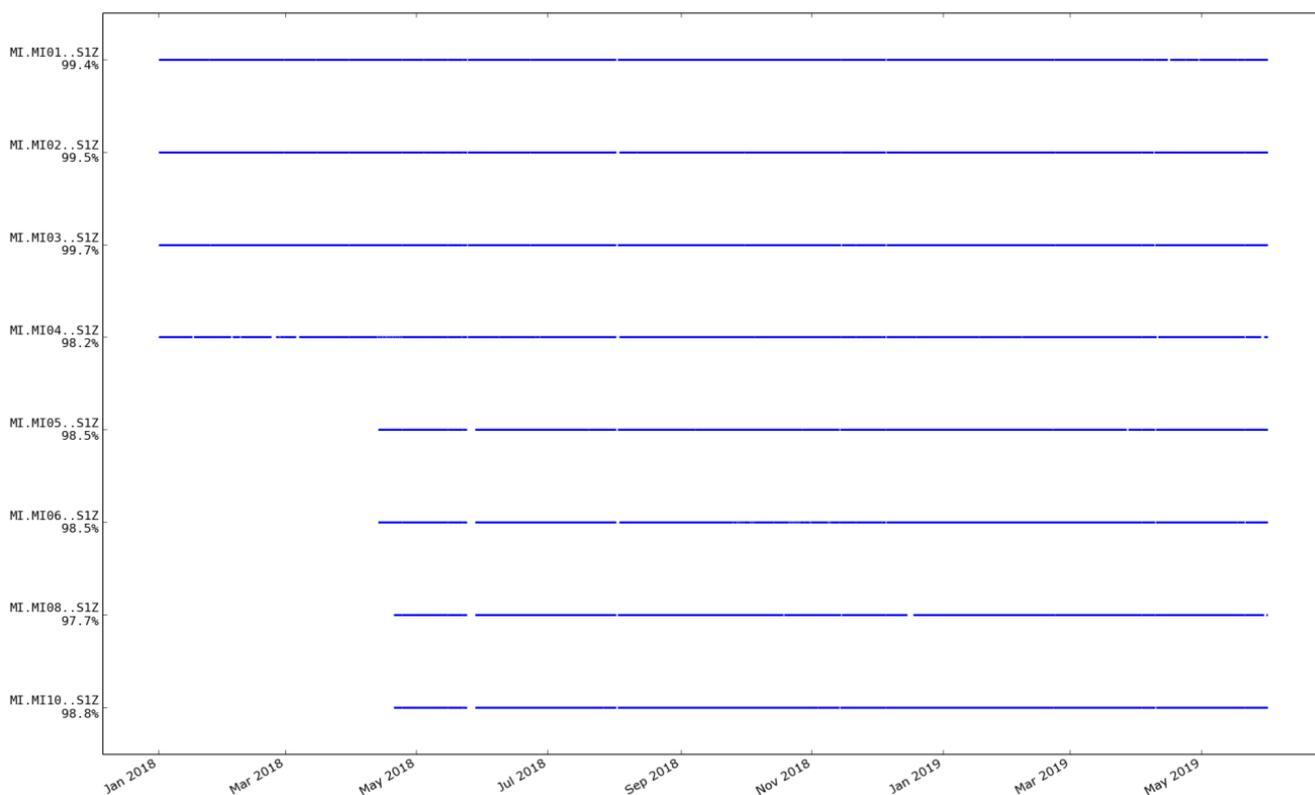


Figura 11. Statistiche relative alla percentuale di dati trasmessi in tempo reale al Centro Acquisizione della Sezione INGV di Milano per le stazioni sismiche velocimetriche gestite dal Concessionario

Come normalmente succede nella gestione di una rete sismica, alcune stazioni possono presentare in certi periodi problemi di funzionamento. In particolare la stazione MI04 è risultata particolarmente problematica, il Concessionario si è comunque sempre adoperato per risolvere al meglio le varie situazioni di guasto.

Ad esempio, dall'analisi delle curve di rumore si era evidenziato un malfunzionamento tra i giorni 2 giugno e 27 giugno 2018, per il sensore di tipo LE3D-BH che equipaggiava la stazione. In particolare il malfunzionamento risultava più evidente durante le ore meno energizzate dal noise, quelle notturne. A seguito del rilevamento del guasto, in data 27 giugno 2018 il Concessionario ha eseguito un intervento di manutenzione della stazione provvedendo a recuperare il sensore in pozzo esistente e a sostituirlo con un altro modello, il sensore SS10BHV, con frequenza propria uguale a quella del sensore precedente (1 Hz).

A partire dalla data dell'intervento la stazione aveva inizialmente ripreso il corretto funzionamento, mantenendo la variazione dei livelli di noise giorno/notte osservati nel primo trimestre 2018. E' importante osservare che in questa situazione è risultata vincente la scelta di utilizzare un modello di sensore in pozzo di tipo "recuperabile".

Un altro problema per la stessa stazione si è però verificato, per frequenze minori di circa 5 Hz, a partire dal 17/09/2018, riguardando in questo caso solo la componente verticale.

Le componenti orizzontali del sensore risultavano perfettamente funzionanti, permettendo il regolare utilizzo di questa stazione, in particolare per la rilevazione di eventi sismici e le successive analisi. Senza entrare nel dettaglio, sono state effettuati altri interventi per garantire il miglior funzionamento di questa stazione, senza dover obbligatoriamente provvedere all'operazione di recupero in pozzo per cambiare un'altra volta il sensore ma, a partire dal 07/02/2019 e persistendo il guasto, si è provveduto alla sostituzione del sensore con un altro della stessa tipologia.

Occorre comunque ricordare che al sito MI04 è collocato anche un sensore accelerometrico, e questo minimizza l'indisponibilità del dato velocimetrico nei periodi sopra menzionati.

Altre tipologie di interventi hanno riguardato la sincronizzazione temporale dei digitalizzatori e la verifica delle polarità nei sensori.

Alcuni digitalizzatori tengono infatti conto automaticamente del ritardo temporale dovuto all'azione del filtro digitale anti-alias, tale filtro agisce quando si riconduce al campionamento impostato (ad es 100 Hz) lo *stream* di dati che viene invece digitalizzato con *oversampling* (cioè a maggiore frequenza). Questo sfasamento temporale (il cosiddetto "*inherent time delay*") è pari (utilizzando a titolo di esempio i digitalizzatori M24 Lennartz) a 286 millisecondi operando con un campionamento finale di 100 campioni al secondo (100 Hz).

Questo sfasamento non crea particolari problemi quando si utilizza il medesimo digitalizzatore per tutte le stazioni della rete, come ad esempio per la rete gestita dal Concessionario, ma può portare a lievi imprecisioni quando si considerano vari tipi di acquisitore.

In data 6 aprile 2018 il Concessionario ha quindi provveduto a effettuare una correzione del firmware per allineare temporalmente i segnali, inviati in tempo reale, registrati dalla rete microsismica con quelli delle stazioni della RSN. L'operazione è stata poi ripetuta per le varie stazioni e la situazione si è completamente normalizzata a partire dal 24 aprile 2018. Nei precedenti periodi si era comunque già provveduto a tener conto dell'*inherent time delay* considerando, quando necessario nei vari software di elaborazione dati, la correzione temporale da assegnare alle tracce sismiche ricevute prima di sottoporle alle successive analisi.

Altri interventi sono stati effettuati, sempre in stretta collaborazione con il Concessionario, per verificare l'esatta assegnazione delle componenti (verticale, nord-sud, est-ovest) allo *stream* dei dati prodotti.

In data 22 maggio 2018 il Concessionario è intervenuto sul firmware per ovviare all'inversione dei canali (componente verticale assegnata a una delle orizzontali e viceversa) su alcune delle stazioni installate il mese precedente provvedendo a ridefinire la nomenclatura dei files miniSEED acquisiti. Nel periodo della Convenzione è sempre stata attiva una stretta collaborazione con i colleghi responsabili della gestione delle reti di monitoraggio, il Concessionario ha sempre preavvisato per

eventuali interventi programmati o variazioni nella configurazione (ad es. lo spostamento di pochi metri del posizionamento del sensore a MI03 effettuato in data 9 aprile 2019). Analogamente INGV ha provveduto a segnalare i rari casi di interruzione del collegamento o richiedere controlli in caso di malfunzionamento.

1.7 Analisi di rumore sismico ambientale

Grazie alla creazione di un archivio unico dei dati, è stato possibile installare e configurare in maniera efficace il *tool* di analisi sismologica PQLX (USGS, 2016) che permette di quantificare in maniera estremamente rapida e accurata la qualità dei segnali acquisiti.

Le forme d'onda registrate dalle stazioni della RSN, acquisite in tempo reale presso INGV-MI sono state impiegate per caratterizzare il rumore sismico ambientale mediante PQLX.

L'analisi è stata effettuata calcolando la densità dello spettro di potenza (PSD) del segnale registrato ad ogni stazione e confrontando i risultati ottenuti con le curve standard di riferimento NHNM (New High Noise Model) e NLNM (New Low Noise Model) ricavate da Peterson (1993), ottenute dall'Autore utilizzando dati di microtremore sismico registrati da 75 stazioni distribuite in diverse parti del mondo.

Applicando l'algoritmo sviluppato da McNamara e Buland (2004), PQLX consente inoltre di calcolare le *Probability Density Functions* (PDF) dello spettro di potenza (PSD) del segnale (McNamara e Boaz, 2005).

In Fig.12 a titolo di esempio sono rappresentate le PDF calcolate con la componente verticale registrate alle stazioni della RSN nel periodo Aprile 2015-Maggio 2017.

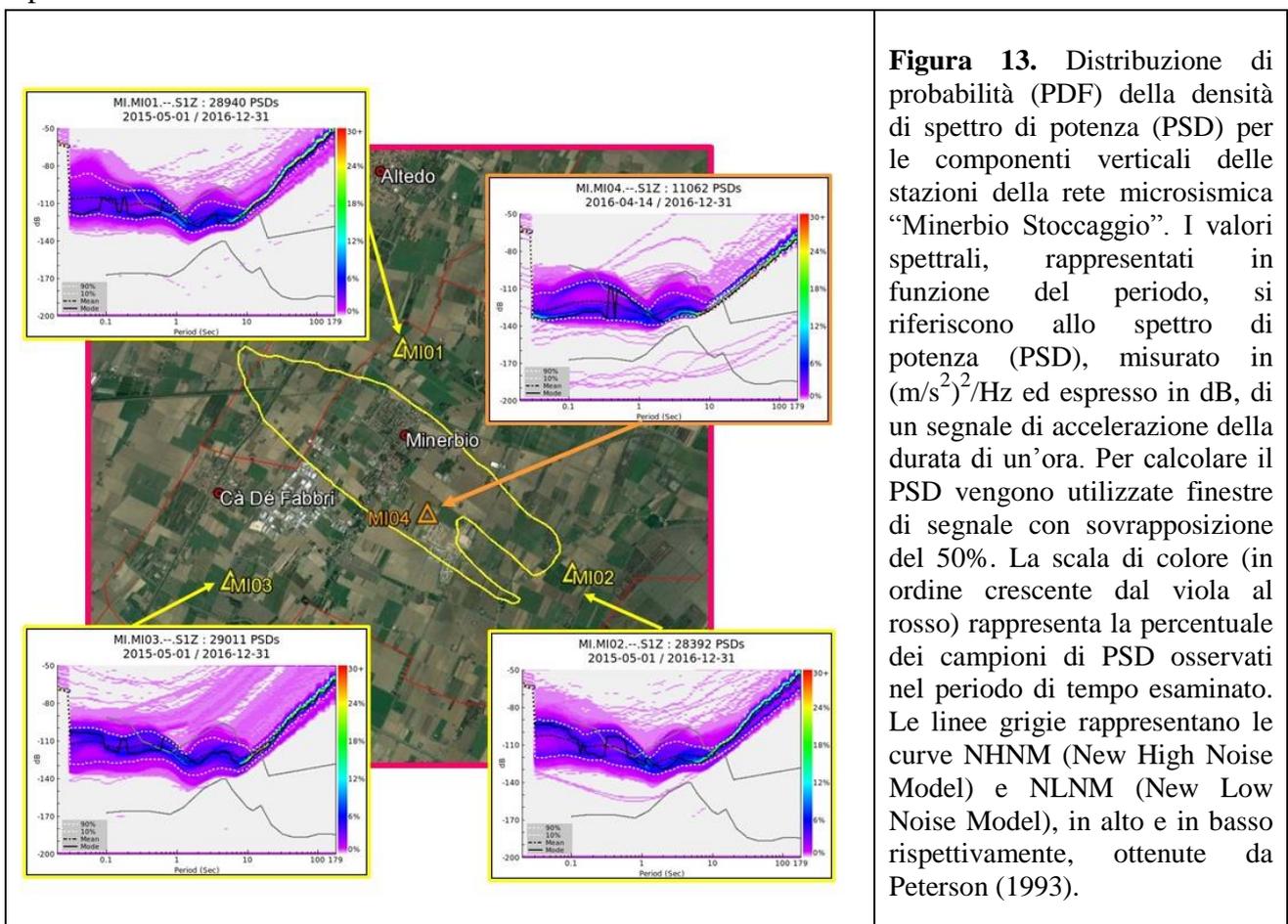
Si possono notare:

- 1) l'elevata rumorosità degli accelerometri (CMPO; FAEN; FERS; MODE);
- 2) la differente risposta per periodi maggiori di 5-10s dei velocimetri a corto e medio periodo (FIU; RAVA; SERM; IMOL) rispetto ai velocimetri a lungo periodo (BRIS; MTRZ; NDIM; CAVE; A307A; A308A);
- 3) la bassa rumorosità, anche in alta frequenza (periodi compresi tra 0.1 e 1s) dei velocimetri installati in area appenninica (ZCCA; MTRZ; BRIS) o nella Pianura Padana ma in pozzetto (IMOL; SERM);
- 4) lo sdoppiamento della PDF nell'intervallo delle alte frequenze (periodi compresi tra 0.1 e 1s), dovuto alla variabilità giornaliera di origine antropica del rumore sismico ambientale.

Questi risultati per quanto concerne il rumore sismico ambientale, presentati e via via aggiornati nel corso delle relazioni trimestrali, sono confermati dalle analisi effettuate per questa relazione conclusiva, che considerano e prendono in esame i segnali acquisiti in tempo reale da tutte le stazioni considerate sino a maggio 2019.

Lo stesso tipo di analisi è stata effettuata per le stazioni sismiche del Concessionario in funzione a inizio progetto: a titolo di esempio le PDF calcolate con la componente verticale registrata alle stazioni della rete microsismica nel periodo Maggio 2015 - Dicembre 2016, sono mostrate in Fig.13. Come si vede, per le stazioni poste in superficie, nella banda di frequenza 1-30 Hz, il livello medio di rumore sismico ambientale si attesta attorno a -110 dB, leggermente al di sotto della curva NHNM, mentre la stazione MI04, installata in pozzetto a 100 m di profondità, mostra un livello medio di rumore di circa -120 dB. Tuttavia, la MI04 mostra anche una elevata variabilità del livello di rumore (fino a 15 dB) per frequenze attorno a 5 Hz.

In generale quindi, le misure di rumore sismico ambientale realizzate con le stazioni attualmente installate nell'area della concessione, evidenziano una situazione di elevato livello di disturbo, caratteristica di tutte le aree che presentano una intensa attività antropica. Come già verificato in altre zone della Pianura Padana, anche in quest'area le installazioni in pozzetto (profondità: 100 - 200 m) consentono di ottenere una diminuzione del livello medio di rumore stimato in circa 0.1 dB/m nell'intervallo di frequenze 1-30 Hz (Franceschina et al., 2015). Visto che le stazioni MI05, MI06, MI08 e MI10 sono state installate nel mese Aprile 2018, in questa relazione finale per le stime di detezione verranno utilizzati i parametri misurati sino a maggio 2019, tenendo conto quindi di un periodo annuale per validare ulteriormente le stime di detezione su un valore misurato e non ipotizzato.



1.8 Analisi di detezione: metodo

Nelle precedenti relazioni trimestrali, le analisi di rumore sismico ambientale presentate nel paragrafo precedente erano state impiegate per valutare la sensibilità della rete microsismica installata al momento dello studio nell'area della concessione e della rete microsismica pianificata e via via sviluppata dal Concessionario nell'ambito delle attività di sperimentazione degli ILG.

In questa relazione finale concentreremo l'attenzione, in osservanza a quanto indicato in ILG e avendo il Concessionario provveduto a installare la rete pianificata costituita da 8 stazioni già a partire da Aprile 2018, sul confronto tra la soglia di detezione che rappresenta il riferimento iniziale (ottenuta utilizzando soltanto le stazioni della RSN) e il miglioramento stimabile considerando l'integrazione con le stazioni del Concessionario, di proprietà STOGIT-SNAM. Ricordiamo che per soglia di detezione si intende la magnitudo minima di un evento sismico che è possibile registrare in un sito da solo una stazione. Tale valore è in funzione principalmente dei livelli di disturbo presenti nel sito di installazione. Con soglia di localizzazione si intende la magnitudo minima alla quale un terremoto può essere localizzato da N stazioni (generalmente N è posto pari a 3). Per essere ancora più cautelativi abbiamo posto il numero di stazioni pari a 4.

Queste analisi di sensibilità sono effettuate confrontando lo spettro di potenza del rumore sismico osservato alle varie stazioni sismiche con lo spettro di potenza di terremoti simulati in tutto il dominio di rilevazione, in ognuno dei punti indicati nel grigliato di simulazione, per differenti profondità (Fig. 14). In questa relazione conclusiva sono state interamente rifatte tutte le analisi, ricalcolando tutti i valori relativi al rumore sismico a tutto il periodo disponibile, aggiornandolo quindi a tutto maggio 2019.

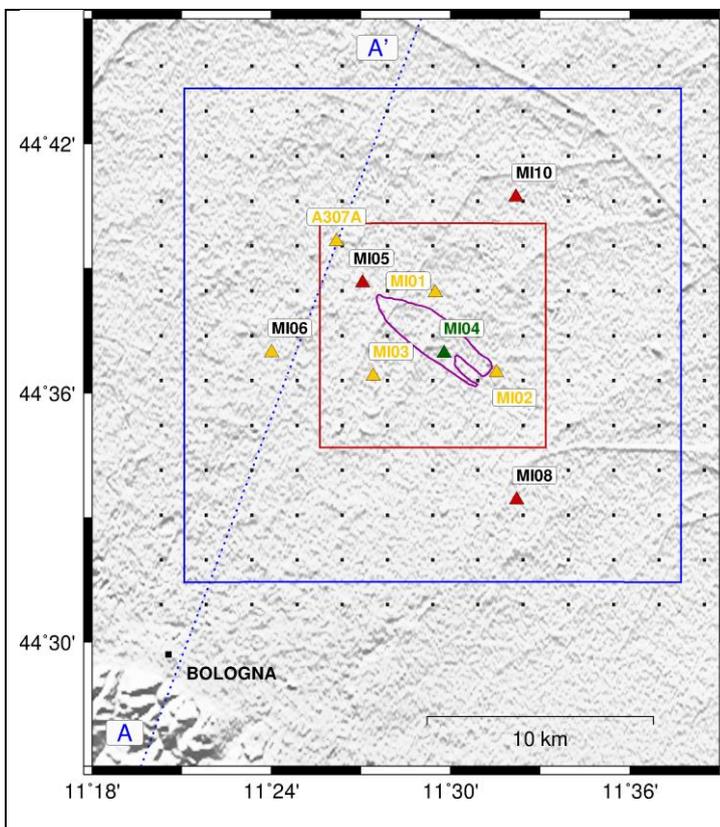


Figura 14. Esempio di configurazione del grigliato di simulazione per le stime di detezione (quadratini neri). Oltre alle stazioni in superficie (triangoli gialli) sono indicati i sensori velocimetrici in pozzetto installati alle profondità di 100 m (MI04, triangoli in verde) e di 150 m (MI05, MI08 e MI10, triangoli in rosso). Vengono indicate le proiezioni in superficie della linea di contatto GWC (linea viola), del Dominio Interno di rilevazione (figura quadrata rossa) e del Dominio Esteso di rilevazione (figura quadrata blu). La linea blu tratteggiata A-A' corrisponde alla sezione C-C' della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Boccaletti et al., 2004). Gli eventi sismici sono ipotizzati su 3 differenti livelli di profondità (1.5, 5.0 e 11.0 km), riferibili a base giacimento, DI e DE.

In Fig.15, a titolo di esempio, vengono mostrate le PDF ottenute dai dati registrati alle stazioni della RSN ZCCA (in superficie ma in contesto poco antropizzato), IMOL (in pozzo) e della Rete Microsismica del Concessionario (RP2018) MI03 (in superficie) e MI10 (in pozzo), utilizzando la media delle componenti orizzontali (NS e EW) del moto.

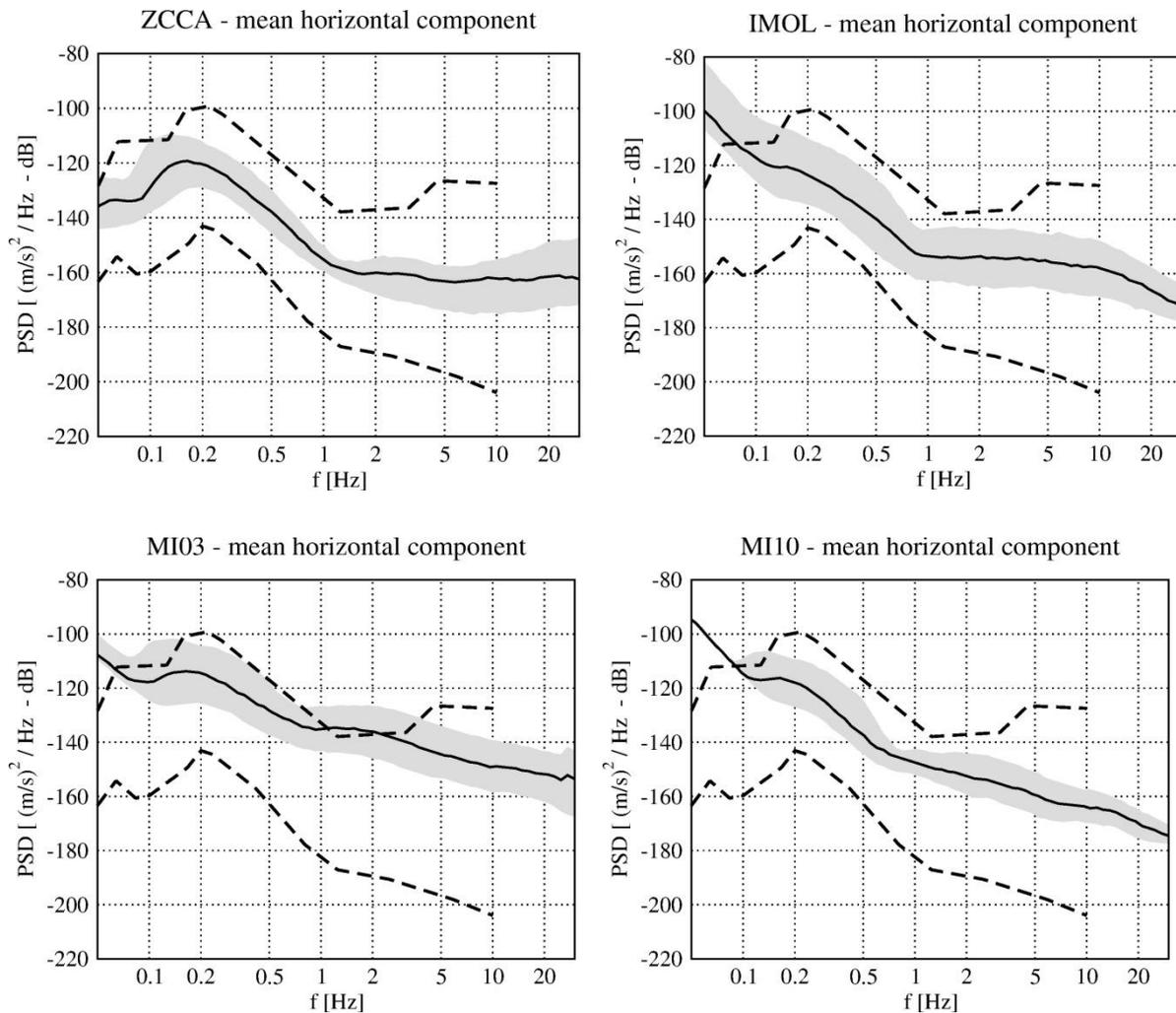


Figura 15. Confronto fra le curve standard NHNM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni ZCCA, IMOL, MI03 e MI10. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono alla componente media orizzontale del moto.

Nell'analisi di detezione sono state utilizzate le curve corrispondenti al 90° percentile delle PDF osservate alle varie stazioni (situazione “peggiore”, con rumore antropico ai massimi livelli, equiparabile alla situazione di giorno lavorativo) e le curve corrispondenti al 10° percentile delle PDF osservate alle varie stazioni (situazione “ottimale” dal punto di vista del noise antropico, circa corrispondente alla mediana della PDF registrata nelle ore notturne alle medesime stazioni). Sono state simulate in tal modo due situazioni opposte per quanto riguarda la probabilità di detezione di eventi sismici. Le curve rappresentative del livello di rumore sismico ambientale sono state considerate per frequenze comprese fra 1 e 30 Hz.

Poiché vengono simulati terremoti di magnitudo non particolarmente elevata, è stato utilizzato un modello a sorgente puntiforme, adottando la forma funzionale prevista da Brune (1970; 1971) per definire lo spettro di Fourier dell'evento. Il modello, ampiamente utilizzato nella pratica ingegneristica quando si intendano trascurare gli effetti di finitezza della faglia e gli effetti di direttività della rottura, è completamente definito da due parametri: il momento sismico del terremoto, M_0 , legato alla magnitudo, e la frequenza d'angolo, f_c , legata alle dimensioni lineari della sorgente. Alternativamente, lo spettro di sorgente può essere definito dai valori di M_0 e della caduta di sforzo, $\Delta\sigma$, dato che risulta $\Delta\sigma \sim M_0 f_c^3$.

E' importante notare che lo spettro di Fourier in velocità presenta un massimo assoluto in corrispondenza della frequenza d'angolo dell'evento. Quest'ultima può essere perciò definita come la frequenza caratteristica delle onde sismiche emesse dalla sorgente. Lo spettro in accelerazione presenta un andamento proporzionale a f^2 per frequenze minori di f_c e risulta costante per frequenze superiori. L'applicazione di una legge di scala, che regola il rapporto fra le dimensioni della sorgente (M_0) e la dinamica della rottura (f_c), consente di ridurre ad uno il numero di parametri necessari per definire lo spettro di sorgente. La legge di scala comunemente impiegata nelle simulazioni a sorgente puntiforme assume che, al variare di M_0 , la caduta di sforzo $\Delta\sigma$ rimanga costante. In questa simulazione si assume $\Delta\sigma = 1$ MPa come valore rappresentativo della caduta di sforzo di eventi sismici di magnitudo inferiore a 4.0. L'attenuazione delle onde sismiche viene simulata introducendo un termine moltiplicativo, dipendente dalla frequenza e dalla distanza, nella definizione dello spettro di Fourier, allo scopo di rappresentare gli effetti di diffusione geometrica, di attenuazione anelastica e di dispersione. Secondo un'approssimazione ampiamente utilizzata, l'attenuazione può essere parametrizzata mediante due soli parametri: il fattore di qualità per $f=1$ Hz, Q_0 (Lay e Wallace, 1995), e il parametro di decadimento spettrale, k (Anderson e Hough, 1984). Complessivamente, l'ampiezza dello spettro di Fourier in velocità delle onde S registrate a distanza ipocentrale R dalla sorgente viene calcolata dalla relazione (1):

$$V(f) = \frac{C \cdot M_0}{R} \cdot \frac{2\pi f}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \exp\left(\frac{-\pi R f}{\beta Q(f)}\right) \cdot \exp(-k\pi f) \quad (1)$$

nella quale β rappresenta la velocità delle onde S e la costante C dipende da β , dalla densità del mezzo, ρ , dal fattore di forma della radiazione, $R_{\theta\phi}$ e dal fattore F_s che rappresenta l'amplificazione di superficie libera ($F_s=2$ per stazioni poste in superficie; $F_s=1$ per stazioni in pozzo).

Il momento sismico è stato ricavato a partire dalla magnitudo locale, M_L , utilizzando la relazione:

$$\begin{aligned} \text{Log } M_o &= 1.5 M_L + 9.0 \quad (M_L \geq 3.0) \\ \text{Log } M_o &= 1.0 M_L + 10.5 \quad (M_L < 3.0) \end{aligned} \tag{2}$$

nella quale il tratto corrispondente alle alte magnitudo rappresenta la definizione di magnitudo momento introdotta da Hanks e Kanamori (1979) mentre alle magnitudo inferiori viene adottata una pendenza unitaria, in accordo con gli studi sulle leggi di scala di eventi sismici di bassa magnitudo (Hanks e Boore, 1984). Per quanto riguarda l'attenuazione, recenti studi relativi all'area in esame indicano $Q_o \approx 80$ (Castro et al., 2013). Nelle simulazioni precedentemente utilizzate abbiamo considerato un valore di Q linearmente dipendente dalla frequenza, $Q(f) = Q_o f$. In questo report abbiamo utilizzato la relazione $Q(f) = Q_o f^{1.2}$.

Il valore del parametro k di decadimento spettrale può essere definito sulla base delle informazioni disponibili riguardanti la geologia locale. Gli studi relativi a tale parametro mostrano infatti che k dipende principalmente dalle condizioni di sito, con valori generalmente variabili tra 10 ms (siti "rock") e 120 ms (sedimenti alluvionali profondi), e mostra un debole incremento con la distanza epicentrale (dell'ordine di 0.15 ms/km). Considerate le modeste distanze in gioco, in questo studio viene assunto per il parametro k un valore indipendente dalla posizione della sorgente. L'area di installazione risulta infatti sostanzialmente omogenea e caratterizzata da livelli di attenuazione intermedi, tipici dei sedimenti consolidati.

Nelle fasi iniziali del progetto il valore di k è stato fissato a 80 ms, sulla base delle stime preliminari già effettuate nella medesima area (Carannante *et al.*, 2016). Con il procedere del progetto, avendo a disposizione un numero maggiore di eventi su cui effettuare una statistica ancora più accurata, è stato impiegato un valore costante pari a 60 ms in tutte le simulazioni.

I valori di β e di ρ invece, sono stati desunti dal modello monodimensionale di Carannante *et al.* (2015): sono stati impiegati $\rho=2.4 \text{ g/cm}^3$ e $\beta=2.2 \text{ km/s}$.

Le analisi di detezione sono state effettuate considerando: 1) le stazioni della rete sismica Nazionale (RSN); 2) la rete microsismica attualmente installata nella concessione "Minerbio Stoccaggio dal Concessionario nell'ambito del progetto di sperimentazione degli ILG, che comprende 8 stazioni di cui 4 con sensore in pozzetto (una a 100 m e 3 a 150 m di profondità); 3) la rete microsismica integrata con le stazioni della RSN (e del progetto AlpArray) operanti nell'area.

Per effettuare le simulazioni, le sorgenti sismiche puntiformi sono state poste in corrispondenza di 169 punti di 3 grigliati regolari ricoprenti un'area di $(24 \times 24) \text{ km}^2$ che comprende la proiezione in superficie del Dominio Esteso, posti alle profondità di 1.5; 5.0 e 11.0 km. Le profondità di 1.5 km, 5 km e 11 km corrispondono alla profondità del giacimento di stoccaggio, alla base del Dominio Interno e alla base del Dominio Esteso, rispettivamente (Fig. 14).

Per ogni sorgente e per ogni stazione sono stati simulati gli spettri di potenza prodotti da eventi sismici di magnitudo locale compresa fra -1.0 e 3.0, utilizzando l'eq. (1) per calcolare l'ampiezza dello spettro di Fourier della fase S, e considerando una durata di 4 s per la stima dello spettro di potenza.

L'evento sismico viene considerato identificabile quando si ottiene un rapporto segnale disturbo pari a 5 (corrispondente a 14 dB), considerando il valore massimo dello spettro di potenza del terremoto e il valor medio del PSD del rumore per frequenze maggiori di 1 Hz. Il superamento di questa soglia determina la detezione dell'evento da parte della stazione sismica in esame.

La soglia di detezione è stata definita quindi come la magnitudo minima affinché un terremoto venga registrato da almeno una stazione della rete.

La soglia di localizzazione viene definita invece come la magnitudo minima di un terremoto localizzabile.

Nel corso del progetto, come illustrato nelle relazioni trimestrali, sono stati considerati il caso di localizzazione mediante almeno 3 stazioni della rete e il caso di localizzazione con almeno 4 stazioni della rete, quest'ultimo caratterizzato da una maggiore precisione nella stima dell'ipocentro (Husen e Hardebeck, 2010). In questa relazione finale sono state considerate 4 stazioni. Per ognuna delle configurazioni di rete analizzate sono stati dunque considerati i casi riportati in Tab.5, utilizzando le PDF calcolate con le registrazioni disponibili sino a Maggio 2019, relative alla rete microsismica integrata operativa.

Di seguito sono riportati i valori ottenuti per tutte le stazioni rese disponibili per questo studio, effettuando il confronto fra le curve standard NHHM – NLNM e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle varie stazioni (mostrate in ordine alfabetico e suddivise per codice Rete IV, MI, Z3). Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono in questo caso, per completezza, sia alla componente media orizzontale del moto del suolo che a quella verticale (Figure da Fig.16a a Fig.16i).

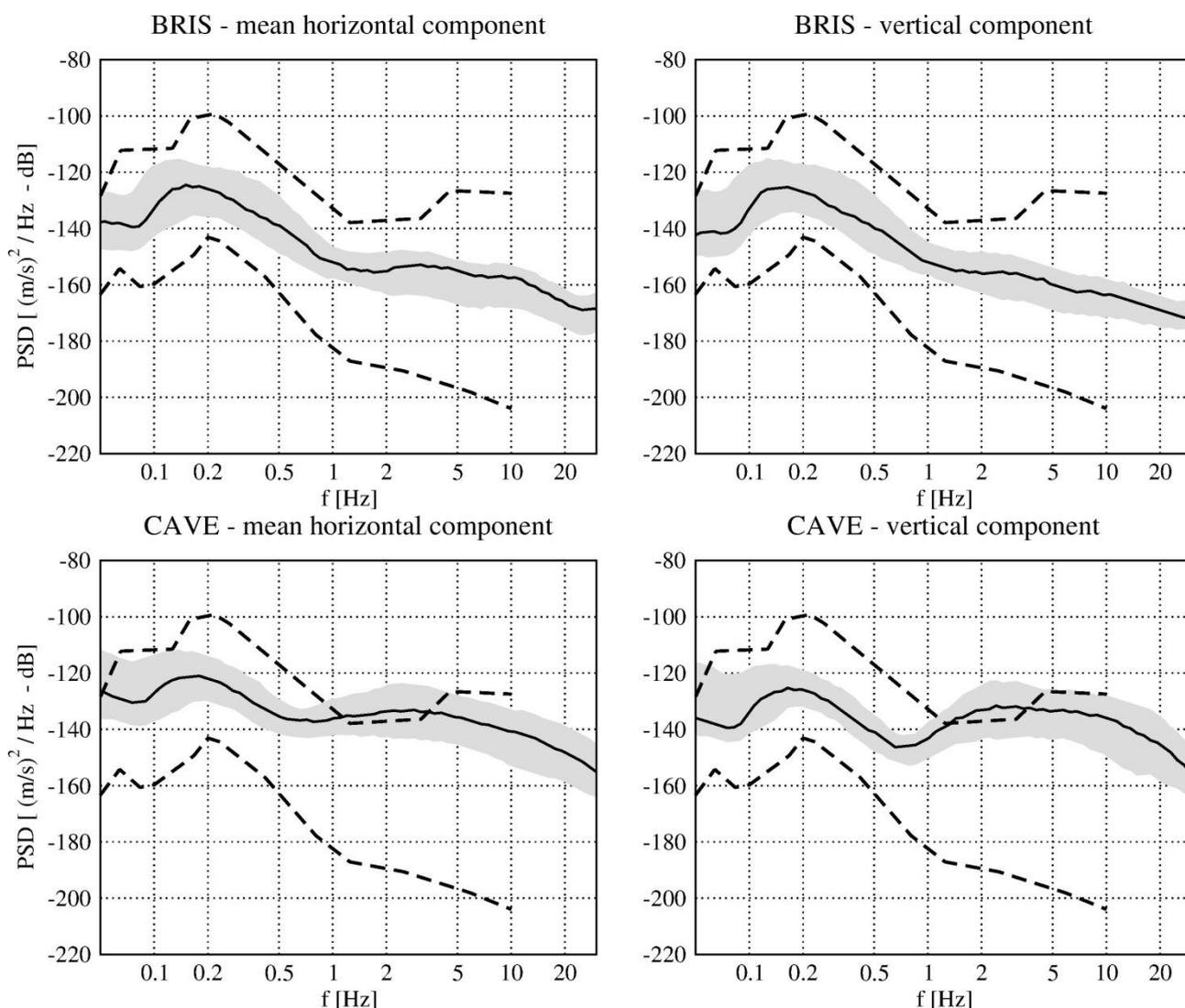


Figura 16a. Confronto fra le curve standard NHHM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni della Rete Sismica Nazionale (codice rete IV) BRIS e CAVE. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono alla componente media orizzontale e verticale del moto.

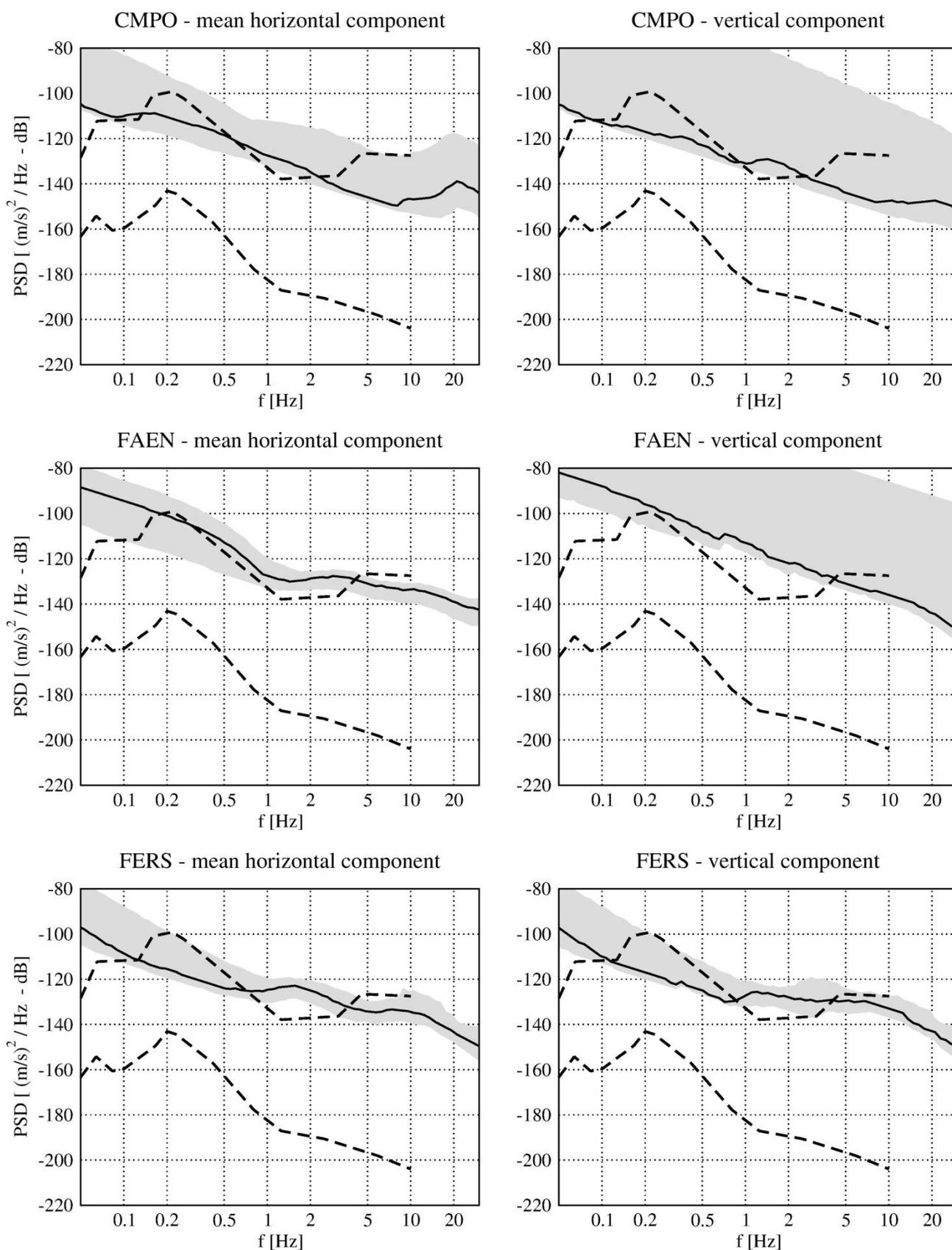


Figura 16b. Come Figura 16a per le stazioni CMPO, FAEN e FERS.

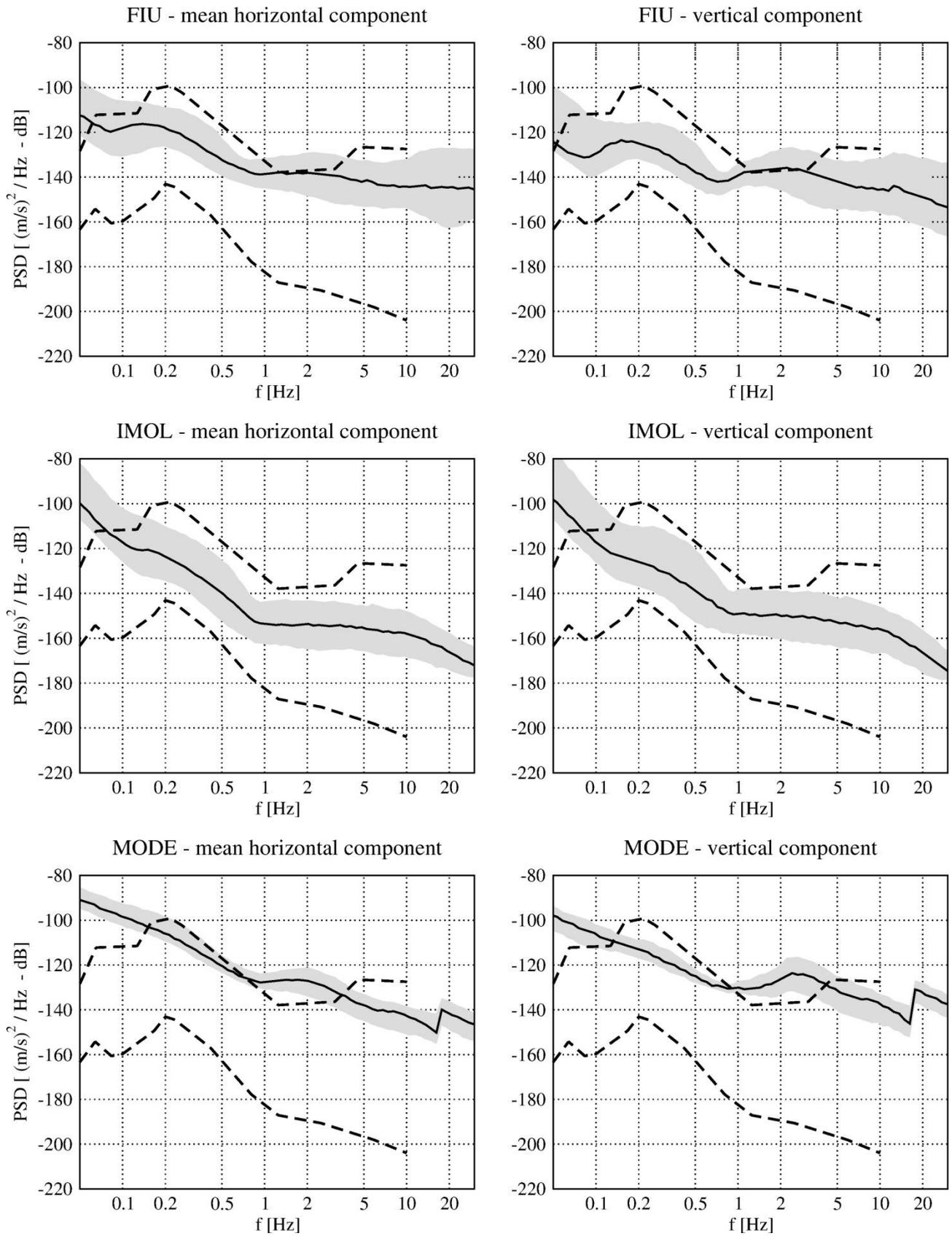


Figura 16c. Come Figura 16a per le stazioni FIU, IMOL e MODE.

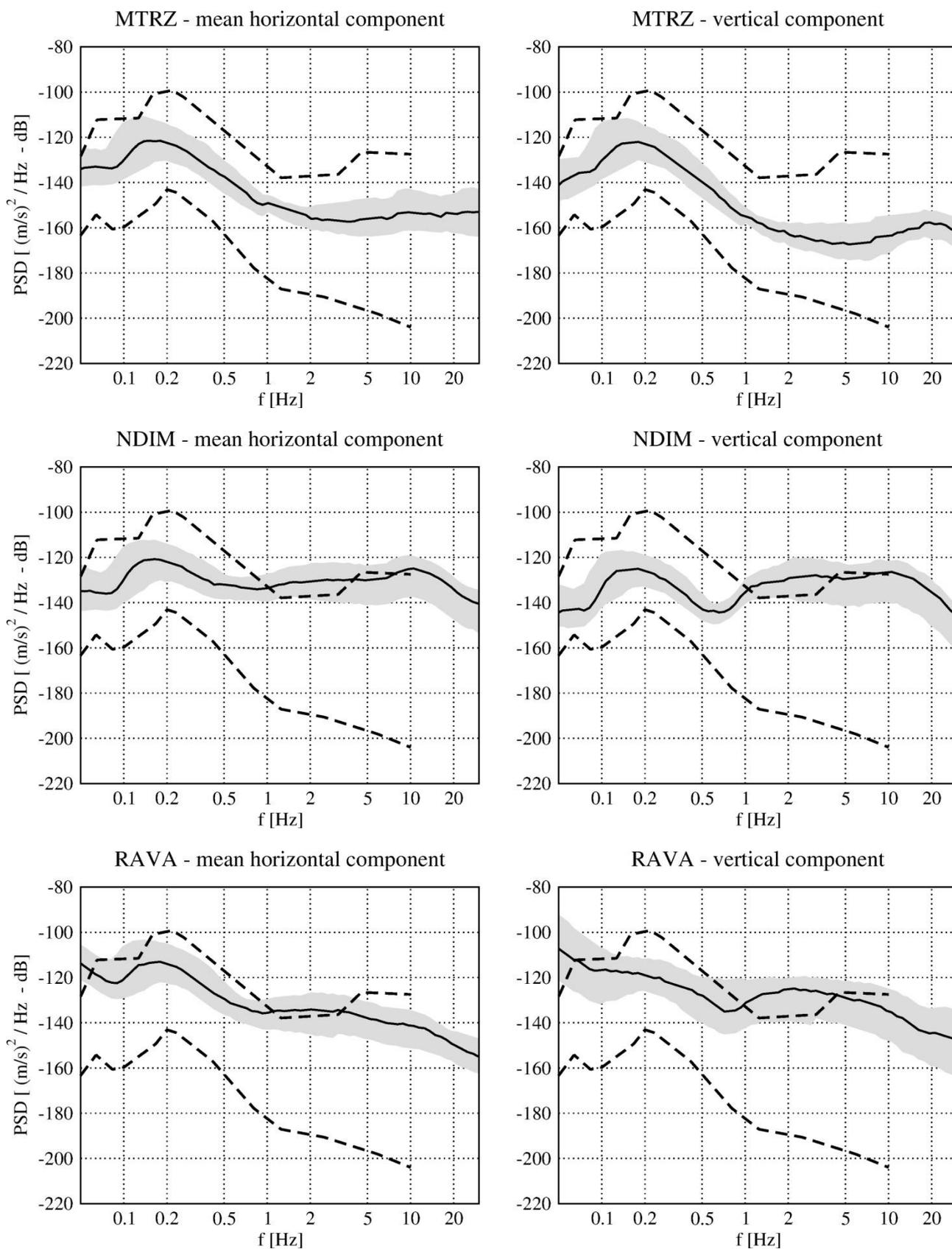


Figura 16d. Come Figura 16a per le stazioni MTRZ, NDIM e RAVA.

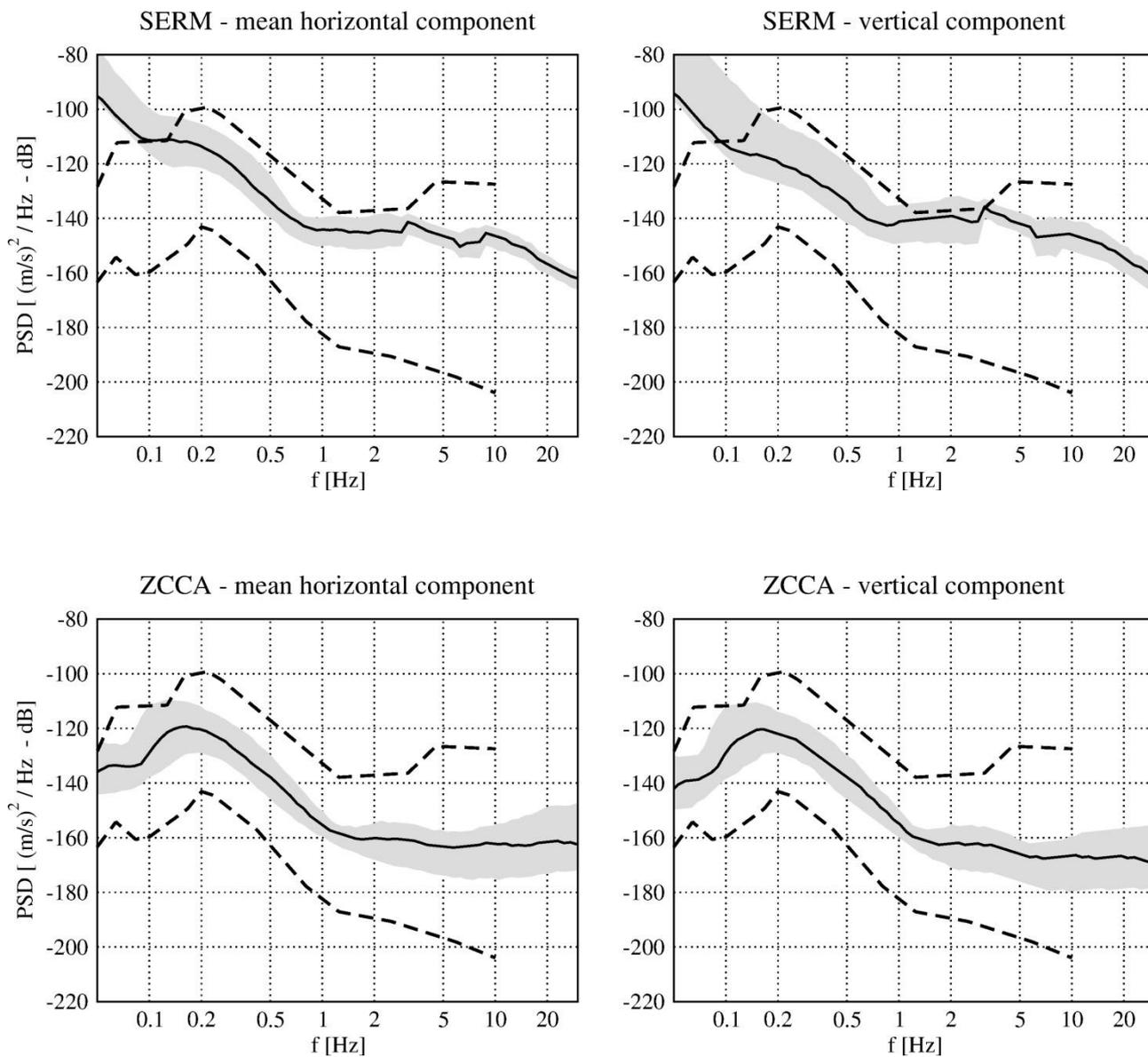


Figura 16e. Come Figura 16a per le stazioni SERM e ZCCA.

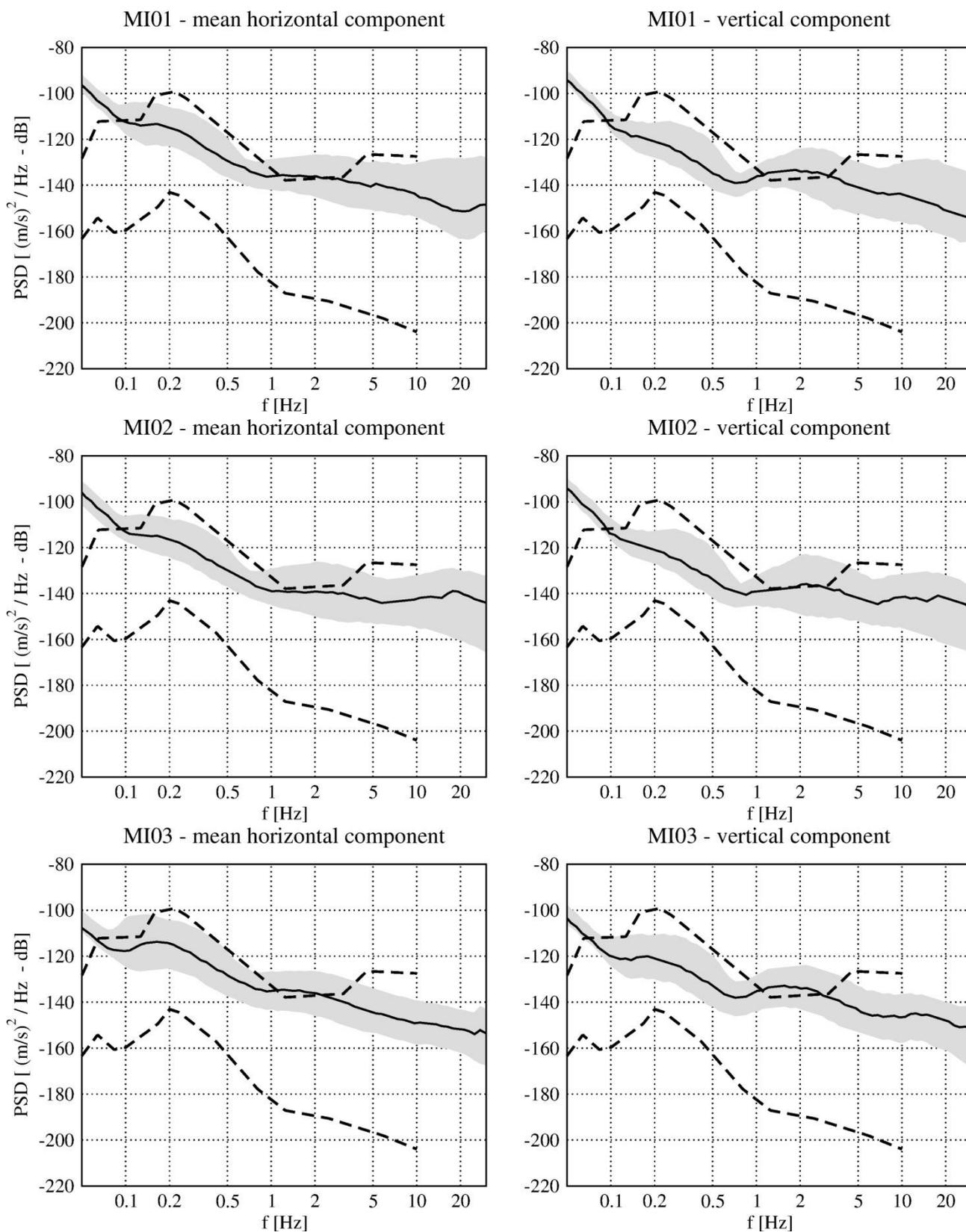


Figura 16f. Confronto fra le curve standard NHHM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni della Rete microsismica gestita dal Concessionario (codice rete MI) MI01, MI02 e MI03. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono alla componente media orizzontale e verticale del moto.

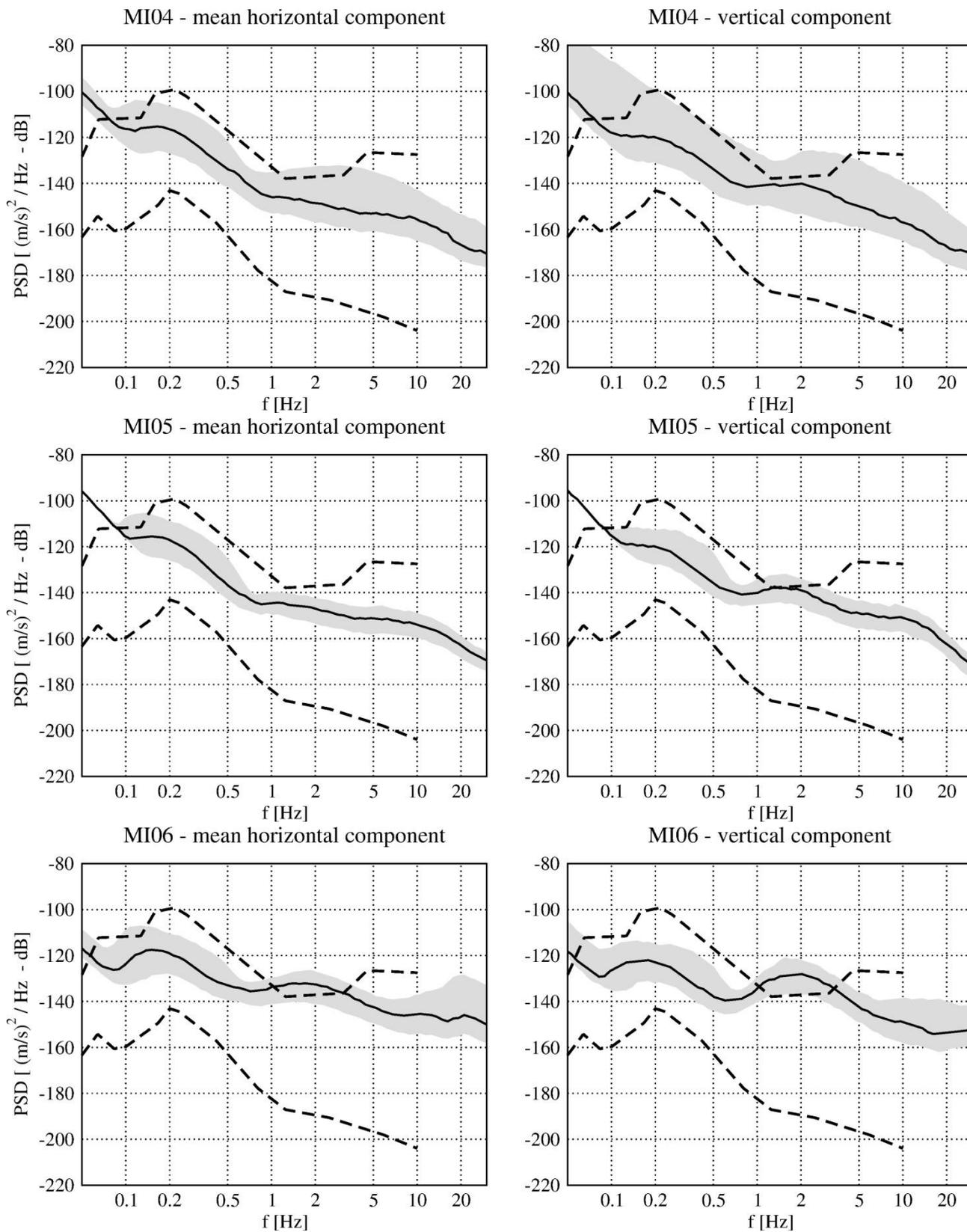


Figura 16g. Come Figura 16f per le stazioni MI04, MI05 e MI06.

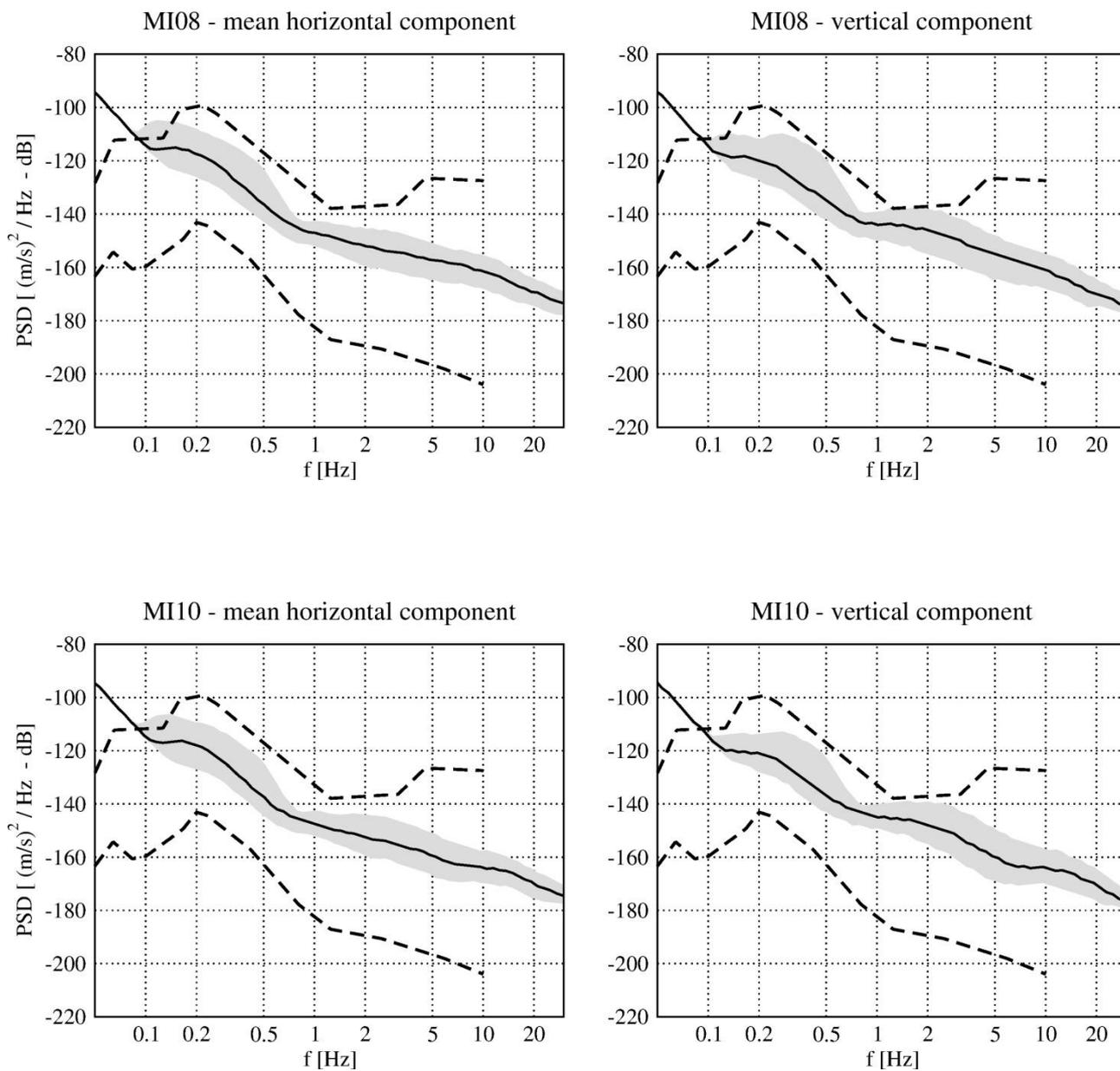


Figura 16h. Come Figura 16f per le stazioni MI08 e MI10.

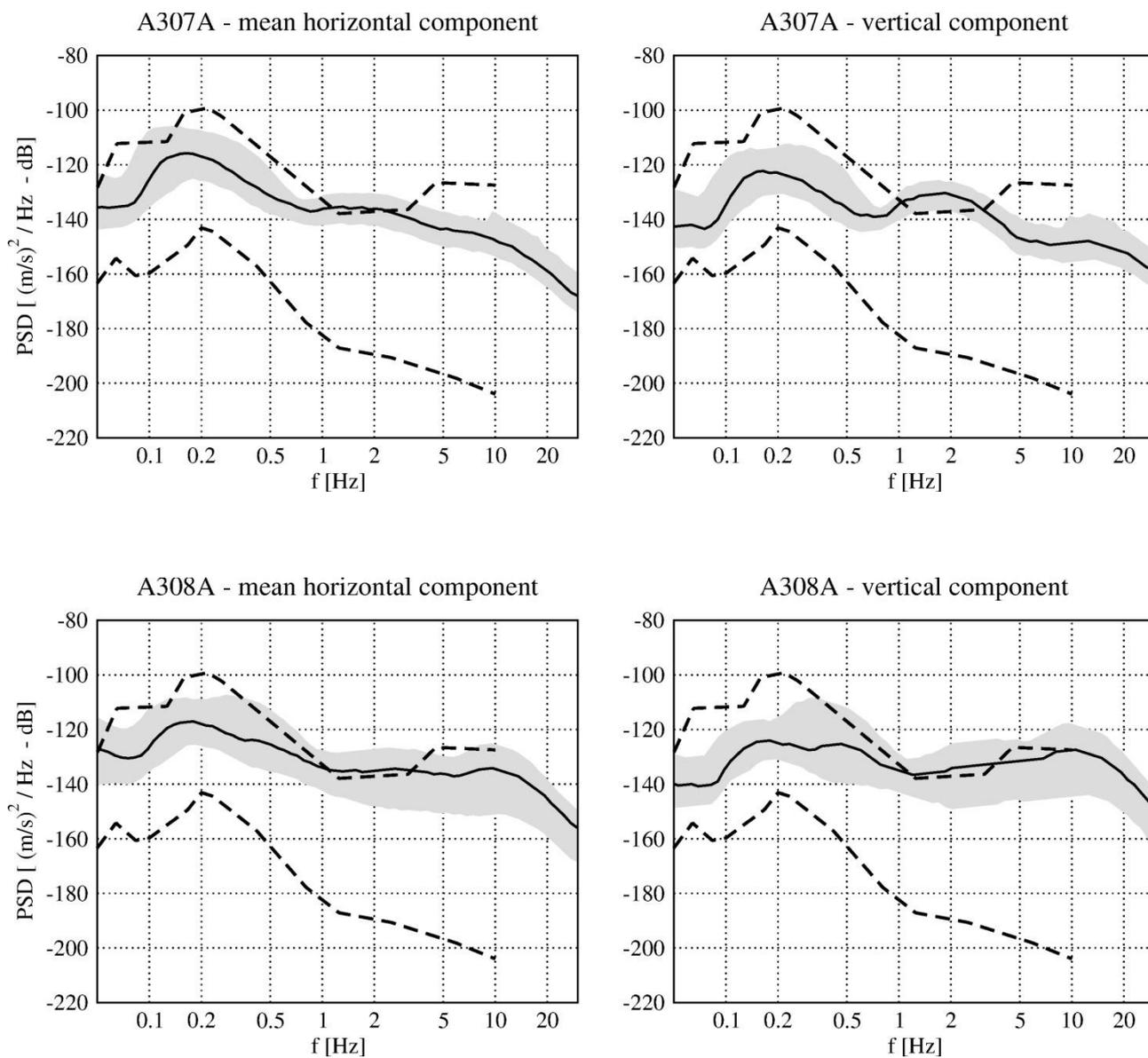


Figura 16f. Confronto fra le curve standard NHRM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di potenza del segnale di velocità registrato alle stazioni del progetto AlpArray (codice rete Z3) A307A e A308A. Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono alla componente media orizzontale e verticale del moto.

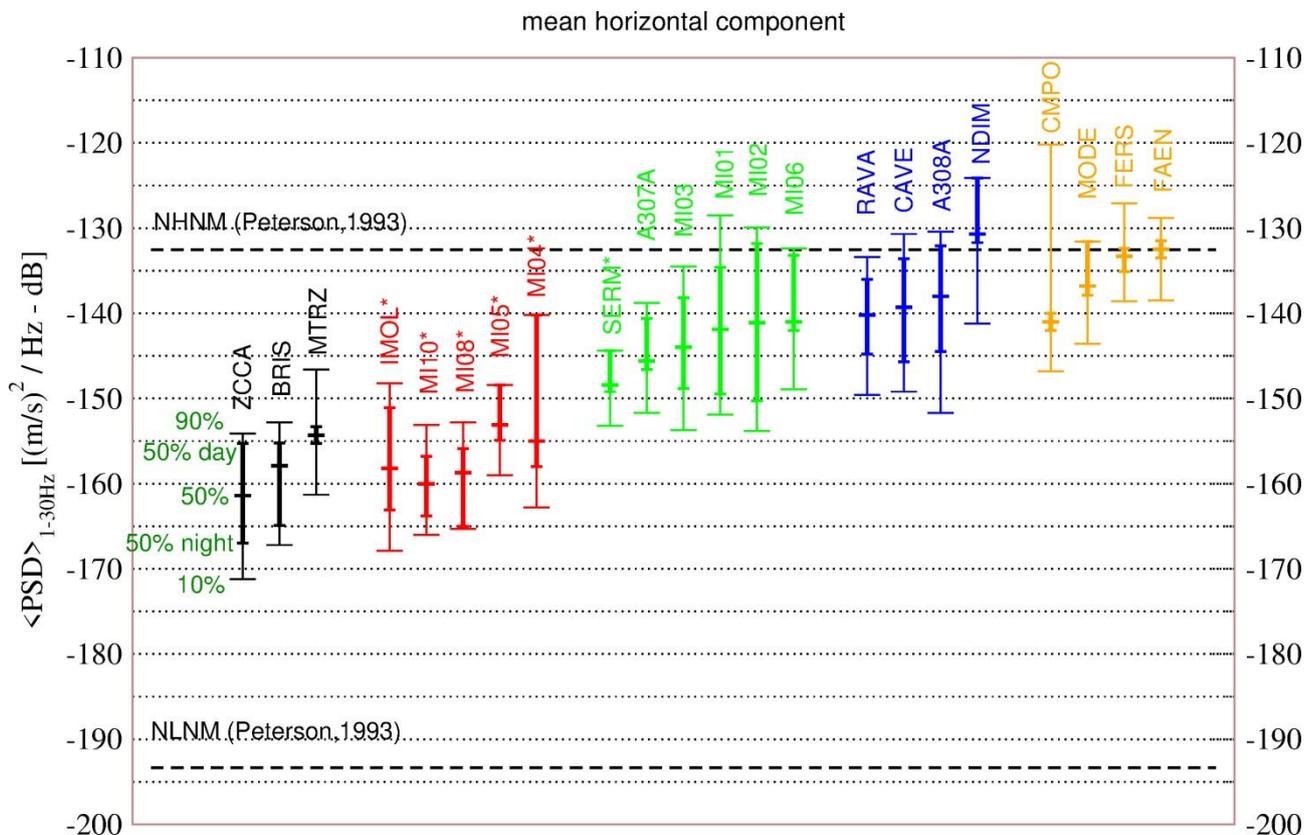


Figura 17. Valori di PSD per le stazioni analizzate, raggruppate per valori osservati.

La Fig. 17 rappresenta la sintesi delle osservazioni condotte per le misurazioni di noise nel periodo da maggio 2015 a maggio 2019. Come atteso le stazioni in catena appenninica o in pozzo sono estremamente più performanti rispetto alle stazioni in pianura, le differenze sono anche oltre 30 dB, nella banda di frequenza 1-30 Hz.

Nelle precedenti simulazioni relative alle fasi di progettazione della rete, per le installazioni pianificate (corrispondenti ai siti MI05, MI06, MI08, MI10) non era ovviamente possibile disporre di valori effettivamente misurati (specie in pozzo) e in luogo del valore effettivo era stato utilizzato il livello di rumore sismico misurato ad una delle stazioni esistenti (in particolare era stata presa come riferimento la stazione FIU della RSN INGV), ipotizzando un tasso di diminuzione del rumore pari a 0.1 dB/m per le stazioni in pozzetto.

Nel prossimo paragrafo, prima di passare a illustrare le soglie di localizzazione ottenute dall'analisi di detezione appena descritta, valideremo la metodologia e la calibrazione via via ottenuta per i parametri utilizzati effettuando un'analisi spettrale su alcuni eventi sismici registrati nel periodo in esame.

1.8.1 Analisi di deteazione: validazione parametri utilizzati

Per verificare la correttezza della scelta dei parametri delle relazioni (1) e (2), descritte nel precedente paragrafo, e le soglie di magnitudo minima individuabili in ogni punto del grigliato sono stati effettuati numerosi confronti con i segnali sismici effettivamente registrati. In Fig. 18 è stato preso in esame un evento verificatosi il 26 gennaio 2019 alle ore 15:19 di magnitudo 2.4 (Fig. 18).



Figura 18. Dati localizzazione evento da sito RSN-INGV (maggiori dettagli al link <http://terremoti.ingv.it/event/21422711>)

In figura 19 viene paragonato l'ampiezza dello spettro di Fourier per le stazioni MI01 (in superficie) e MI05 (in pozzo a -150m), poste a una distanza epicentrale di 36 km.

Si può notare come il contenuto spettrale del segnale per la stazione in superficie sia maggiore (come previsto dal valore del parametro di superficie libera F_s nella relazione (1) pari a 2) e come fittino molto bene i parametri misurati con quelli stimati per tutto l'intervallo di frequenze considerato.

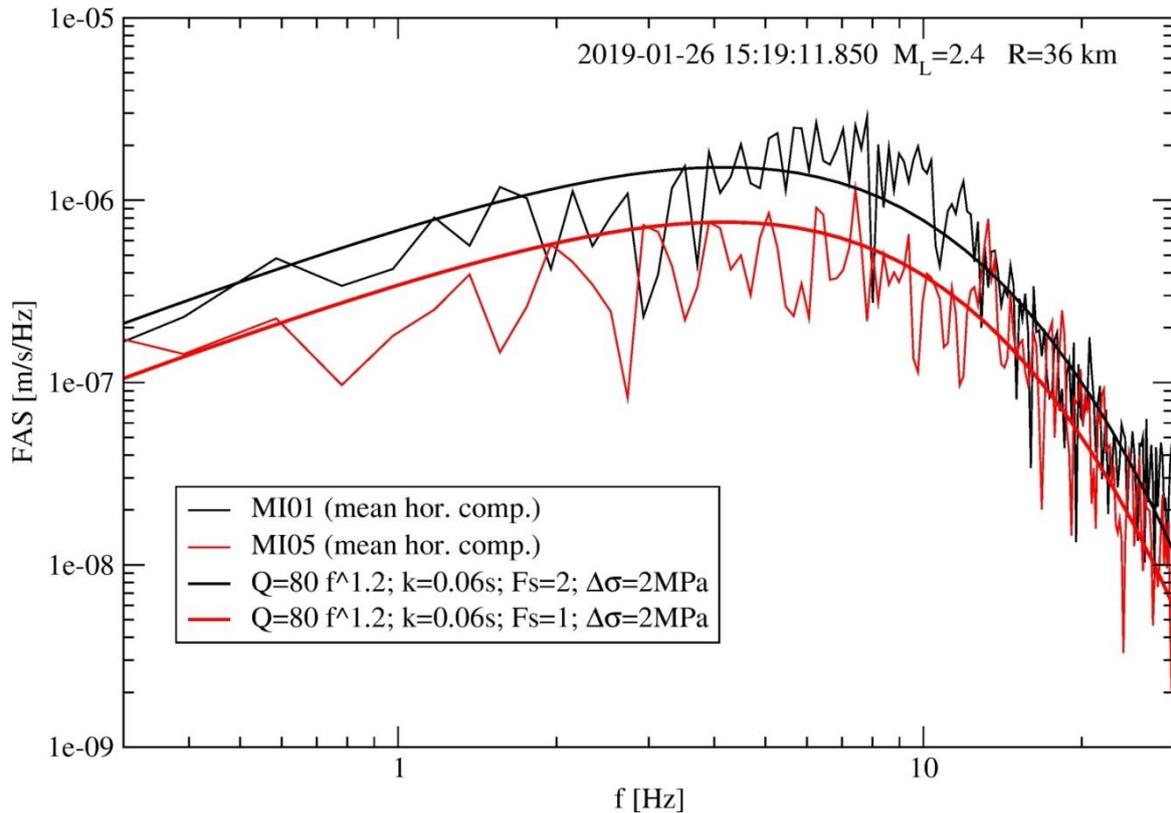


Figura 19. Validazione parametri utilizzati per la definizione degli spettri dei segnali sismici per le stazioni MI01 (superficie) e MI05 (profondità -150m).

Un ulteriore esempio nella Fig. 20, dove viene mostrato lo spettro di un evento di magnitudo 0.6, paragonandolo con le curve di noise. Pur se di magnitudo estremamente bassa, l'evento è stato correttamente individuato dal sistema di detezione, in quanto il suo contenuto spettrale è maggiore rispetto al noise medio ipotizzato per i siti in esame.

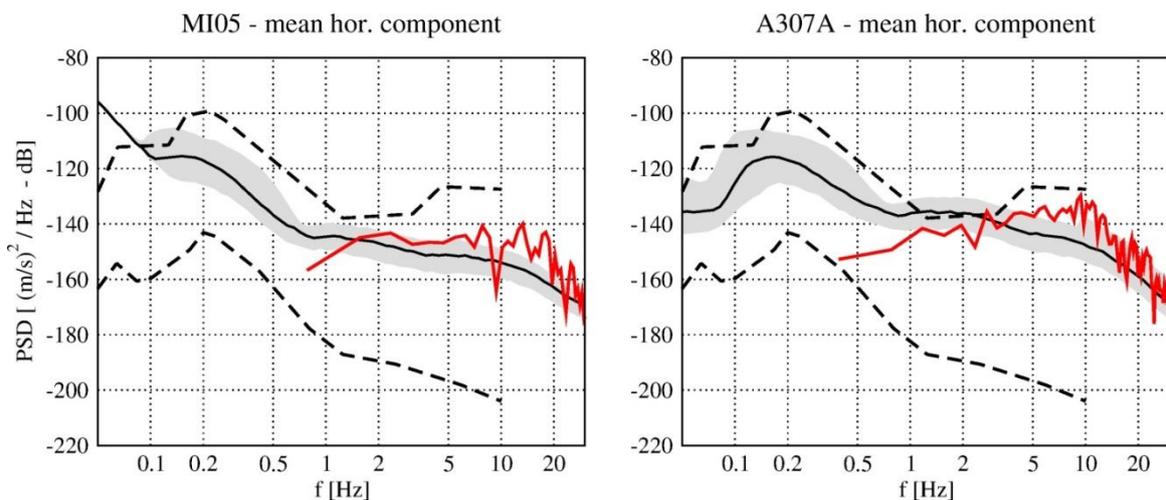


Figura 20. Confronto fra le curve standard NHNM – NLNM (curve tratteggiate) e lo spettro di un evento sismico (in rosso) registrato alle stazioni MI05 (pozzo) e A307A (superficie). Per ogni stazione vengono mostrate la curva mediana della PDF complessiva (linea continua nera) e l'intervallo tra il 10° e dal 90° percentile della PDF complessiva (area grigia). I dati mostrati in Figura si riferiscono alla componente media orizzontale del moto.

In Fig. 21 sono mostrati gli spettri di 3 eventi (con magnitudo e distanze crescenti) per la stazione MI02 (superficie) e MI05 (pozzo), confrontandoli con il valore di noise medio delle altre stazioni in superficie (MI01, MI03 e MI06) e in pozzo (MI04, MI08, MI10). Si nota come un evento sismico di M 3.0 (a una distanza relativamente alta, oltre 40 km) sia nettamente superiore ai livelli di noise su tutta la banda di frequenze considerate, l'evento di magnitudo 1.9 ha livelli confrontabili con il noise per frequenze sotto i 2 Hz per le stazioni in superficie (con distanze comunque oltre 20 km, per distanze inferiori si può tranquillamente ipotizzare una detezione assolutamente molto efficace). Per quanto riguarda l'evento di magnitudo 0.6 (a distanza comunque significativa, oltre i 10 km) si nota l'importanza di poter disporre, come per le stazioni del Concessionario, di siti in pozzo a 100-150 m, che permettono una rilevazione più efficace del segnale sismico rispetto al noise di fondo.

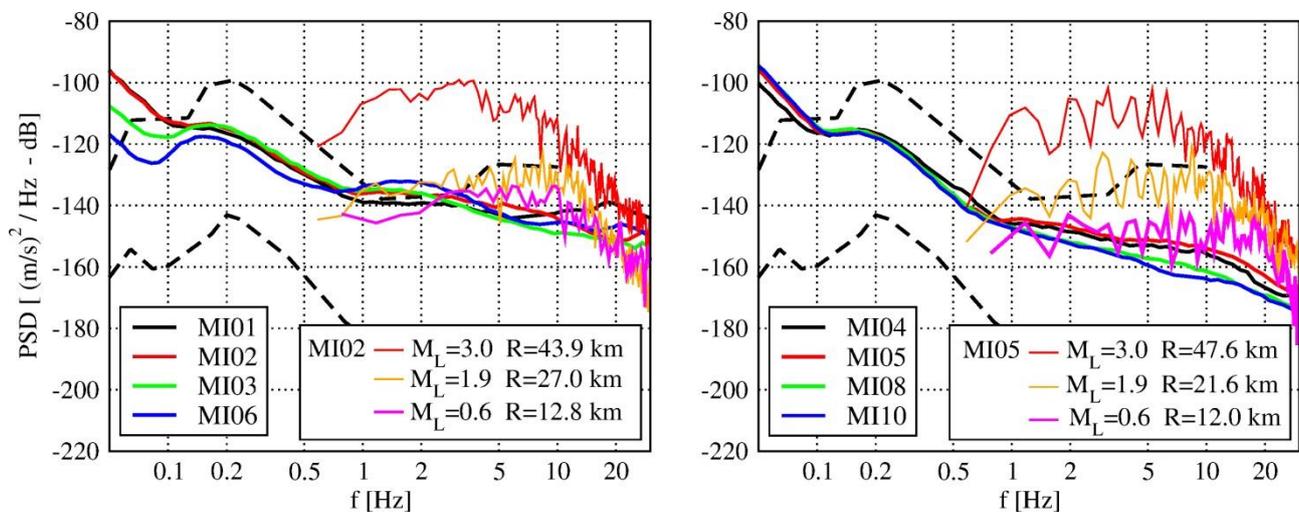


Figura 21. Valori misurati di densità dello spettro di potenza (PSD) per 3 eventi di magnitudo 3.0, 1.9, 0.6 rispetto al livello medio di noise per stazioni in superficie (MI02) e in pozzo (MI05). Il livello medio di noise è riportato anche per altre stazioni in superficie (MI01, MI03 e MI06) e in pozzo (MI04, MI08 e MI10).

1.8.2 Analisi di deteazione: risultati (mappe magnitudo minima per la localizzazione)

Riepilogando quanto espresso nei precedenti paragrafi, in questa relazione finale verranno confrontati i risultati dell'analisi di deteazione utilizzando 6 differenti configurazioni di rete sismica.

Le configurazioni analizzate sono:

- 1) *INGV*: solo stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN) dell'INGV. Nelle figure a seguire questa configurazione viene indicata come INGV e **rappresenta il riferimento su cui verificare il miglioramento apportato dall'utilizzo delle stazioni del Concessionario**;
- 2) *STOGIT 1*: solo stazioni del Concessionario nella configurazione iniziale (stazioni di monitoraggio microsismico MI01, MI02 e MI03, attive dal 1979, e MI04, installata nel 2016, ubicata in corrispondenza dell'area Cluster C di proprietà Stogit, allestita con pozzetto per alloggiamento del sismometro a profondità di 100 m). Nelle figure a seguire questa configurazione viene indicata come STOGIT 1;
- 3) *STOGIT 2*: solo stazioni del Concessionario nella configurazione finale a 8 stazioni;
- 4) *INGV + STOGIT 1*: le 4 stazioni della rete del Concessionario in configurazione iniziale e le stazioni INGV;
- 5) *INGV + STOGIT 2*: le 8 stazioni della rete del Concessionario nella configurazione di fine progetto e le stazioni INGV. Questa configurazione **rappresenta il risultato finale dell'implementazione effettuata dal Concessionario** seguendo le indicazioni ricevute durante questa Convenzione da INGV e in linea con le raccomandazioni degli ILG;
- 6) *INGV + STOGIT 2 + AlpArray*: questa configurazione considera anche le 2 stazioni temporanee del progetto AlpArray, che non sono più disponibili a parire

Per ciascuna delle "reti", le analisi di deteazione sono state condotte nelle aree del dominio interno e del dominio esteso introducendo un grigliato regolare di punti origine per le sorgenti sismiche puntiformi come mostrato in Fig. 14. L'analisi è stata condotta utilizzando la metodologia qui di seguito sintetizzata:

- 1) Misura delle PDF della densità spettrale di potenza (PSD) di rumore sismico ambientale in corrispondenza dei sensori installati.
- 2) Definizione delle condizioni di alto, medio e basso-rumore mediante la stima del 90° percentile delle PDF, della mediana delle PDF e 10° percentile delle PDF complessive osservate, rispettivamente (cfr. Fig. 16a-i). Le curve rappresentative del livello di rumore sismico ambientale vengono considerate per frequenze comprese fra 1 e 30 Hz.
- 3) A differenza delle precedenti analisi di deteazione sono stati utilizzati per tutte le stazioni i valori effettivamente misurati di noise sismico. Nelle precedenti versioni la definizione dei livelli di rumore sismico in corrispondenza dei nuovi siti di installazione, che ovviamente non poteva avvenire tramite misurazione in assenza di sensori installati, avveniva mediante estrapolazione dei livelli di rumore osservati a MI01/FIU e considerando per i sensori in pozzetto una diminuzione di rumore con la profondità pari a 0.1 dB/m (Franceschina et al., 2015).
- 4) Definizione del grigliato di punti origine per la simulazione di sorgenti sismiche puntiformi. A tal fine le sorgenti sismiche vengono collocate in corrispondenza di 169 punti di 3 grigliati regolari ricoprenti un'area di $(24 \times 24) \text{ km}^2$ che comprende la proiezione in superficie del Dominio Esteso, posti alle profondità di 1.5; 5.0 e 11.0 km.
- 5) Definizione dell'intervallo di magnitudo locale da utilizzare nelle simulazioni: $-1.0 < M_L < 3.0$.
- 6) Simulazione dello spettro di potenza da sorgente puntiforme mediante l'utilizzo del modello di Brune (1970; 1971) per definire lo spettro di Fourier e di una legge di scala caratterizzata da una relazione di proporzionalità del tipo: $\text{Log } M_0 \div M_L$ fra momento sismico e

magnitudo locale (Hanks e Boore, 1984) e da uno *stress drop* indipendente dal momento sismico ($\Delta\sigma = 1$ MPa). Per tutti gli eventi viene considerata una durata fissa del segnale pari a 5 s.

- 7) Calcolo dello spettro di potenza al sito, mediante l'introduzione di un termine moltiplicativo dello spettro di Fourier dipendente dalla frequenza e dalla distanza, allo scopo di parametrizzare l'attenuazione delle onde sismiche. In particolare, la diffusione geometrica viene assunta dipendente dall'inverso della distanza ipocentrale mentre le attenuazioni anelastica e da diffusione vengono parametrizzate con il fattore di qualità per $f=1$ Hz, Q_0 (Lay e Wallace, 1995) e con il parametro di decadimento spettrale k (Anderson e Hough, 1984). Nelle simulazioni viene considerato l'effetto di amplificazione di superficie libera introducendo il fattore $F_s=2$ per le stazioni poste in superficie e $F_s=1$ per le stazioni installate in pozzetto. Il valore dei parametri di simulazione viene desunto da studi sismologici effettuati nell'area in esame (Castro et al., 2013; Carannante et al., 2015; 2016) e da validazioni con gli eventi sismici misurati nel corso della Convenzione.
- 8) Confronto fra spettro di potenza simulato e spettro di potenza del rumore sismico. L'evento sismico viene considerato identificabile quando si ottiene un rapporto segnale disturbo pari a 5 (corrispondente a 14 dB), considerando il valore massimo dello spettro di potenza del terremoto e il valor medio del PSD del rumore per frequenze maggiori di 1 Hz. Il superamento di questa soglia determina la detezione dell'evento da parte della stazione sismica in esame. La soglia di detezione viene definita come la magnitudo minima affinché un terremoto venga registrato da almeno una stazione della rete. La soglia di localizzazione viene definita invece come la magnitudo minima di un terremoto localizzabile. A questo proposito, viene considerato il caso di localizzazione mediante almeno 4 stazioni della rete, caratterizzato da una maggiore precisione nella stima dell'ipocentro (Husen e Hardebeck, 2010) rispetto a utilizzare il numero minimo di stazioni utili per la localizzazione, pari generalmente a 3. Per ognuna delle configurazioni di rete analizzate vengono dunque considerati i casi riportati in Tab.6. Nelle figure a seguire (Fig. 22 a-f) il caso A1 è riportato a sinistra, A2 al centro e A3 a destra. Per ogni configurazione sono quindi illustrati 9 riquadri, in alto quello per profondità delle sorgenti poste a 1.5 km, al centro per la profondità di 5.0 km (base DI), e in basso a 11 km (base DE).

Caso	Livello di rumore sismico ambientale ipotizzato per ogni stazione	Numero minimo di stazioni richieste per la localizzazione
A1	10° percentile della PDF complessiva (basso noise)	4
A2	mediana della PDF complessiva	4
A3	90° percentile della PDF complessiva (alto noise)	4

Tabella 6. Combinazioni di livelli di rumore sismico ambientale e numero minimo richiesto di stazioni per la localizzazione di un evento sismico utilizzate per le analisi di detezione per le varie configurazioni della rete sismica considerata.

INGV

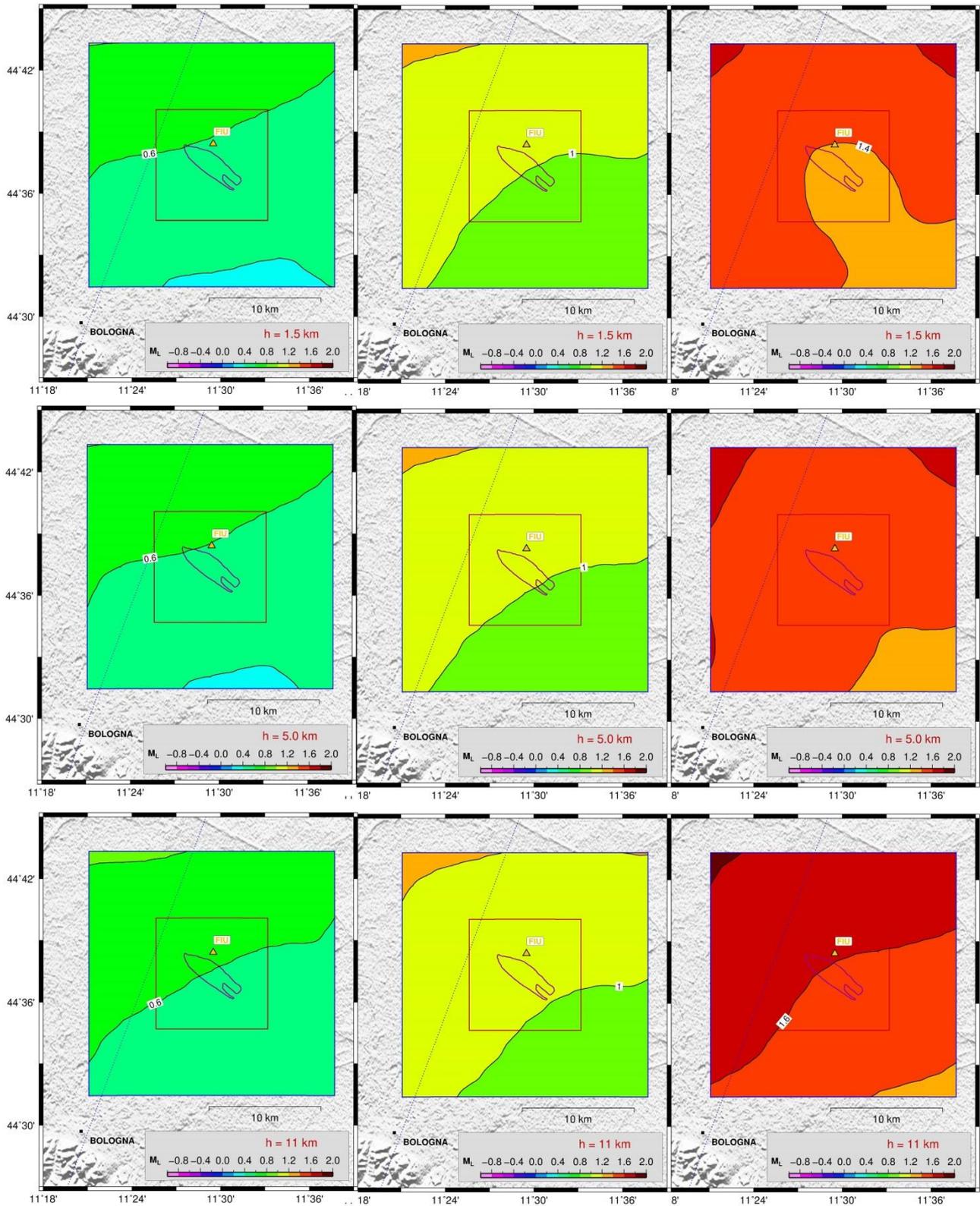


Figura 22a. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione INGV a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di rumore (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

STOGIT 1

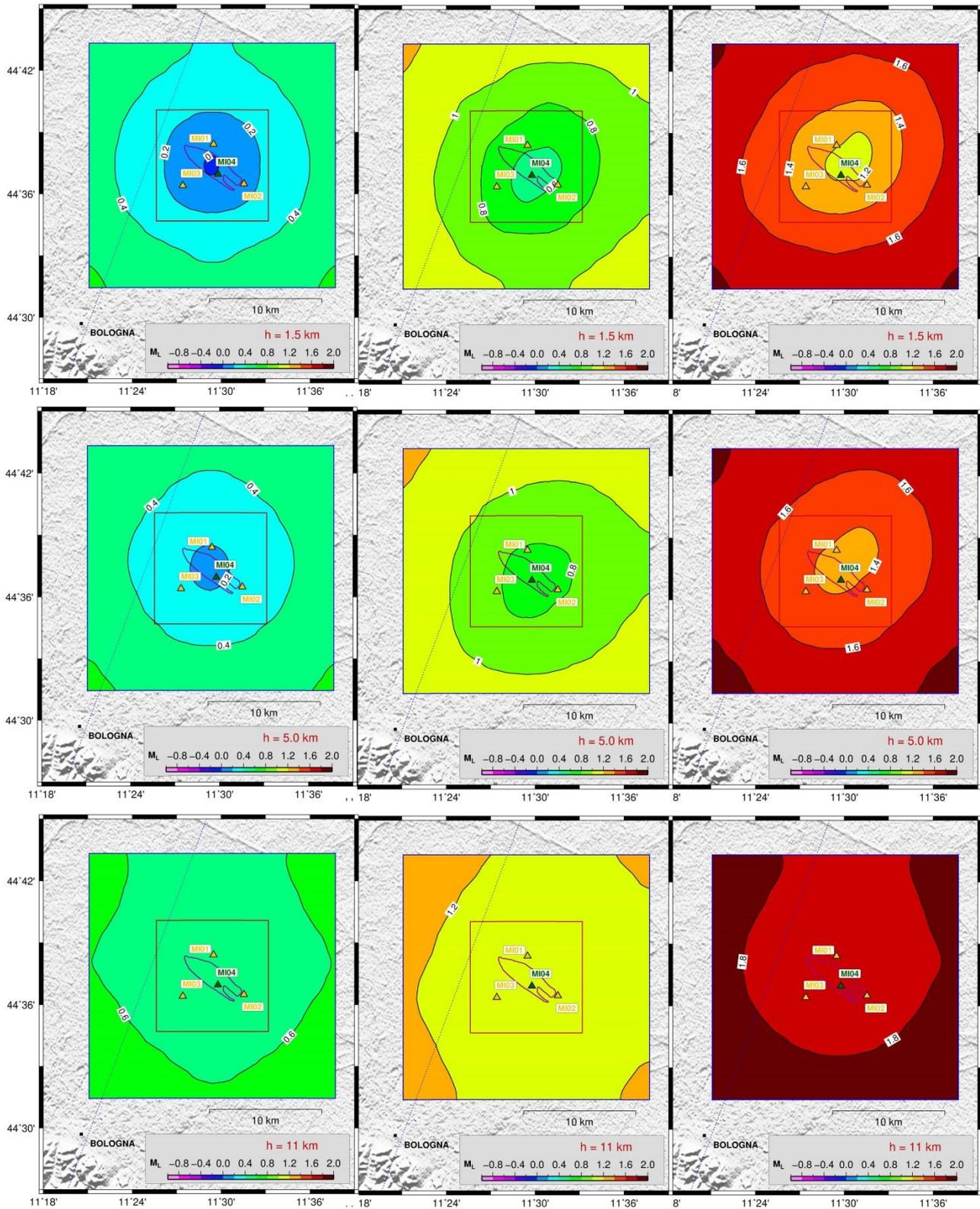


Figura 22b. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione STOGIT 1 a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di noise (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

STOGIT 2

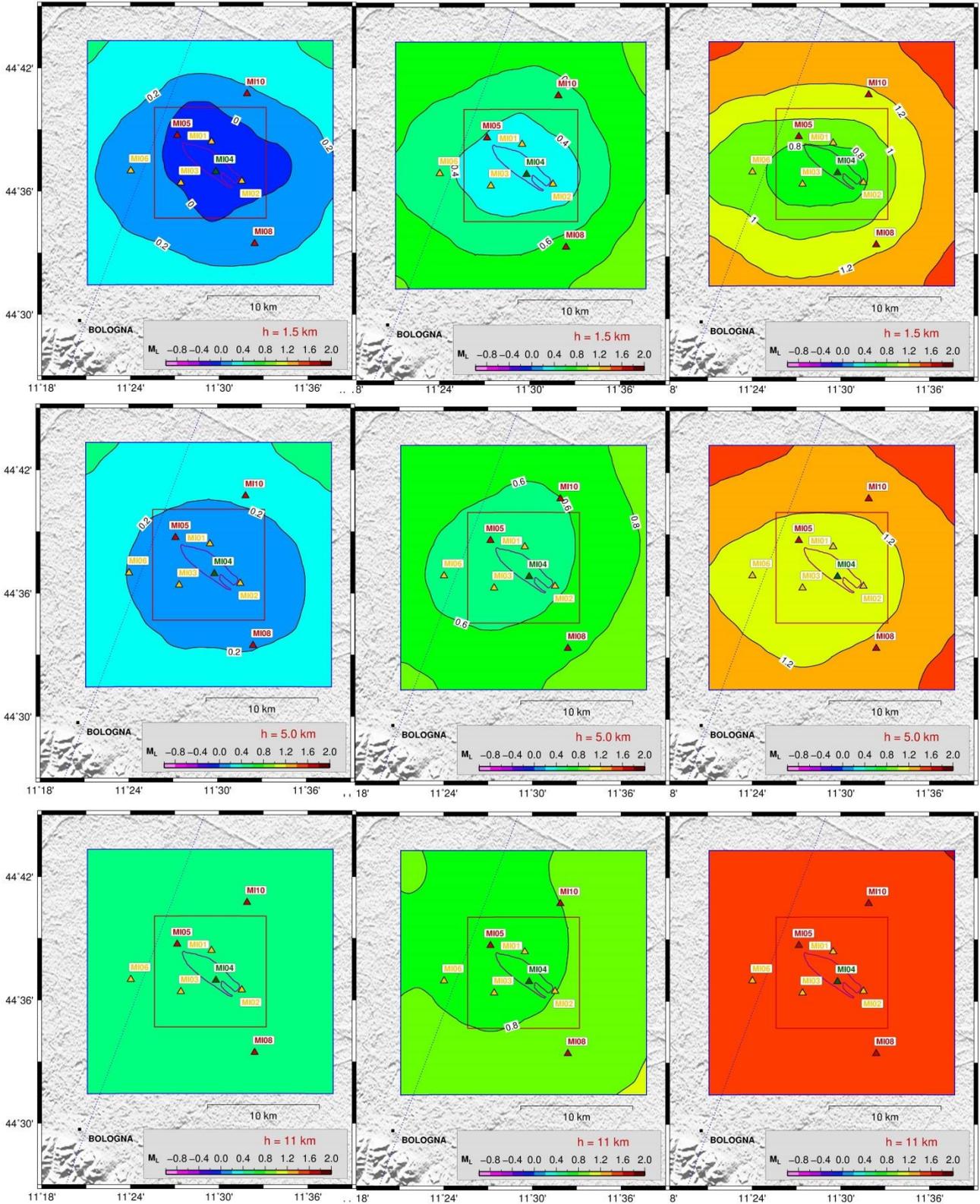


Figura 22c. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione STOGIT 2 a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di noise (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

INGV – STOGIT 1

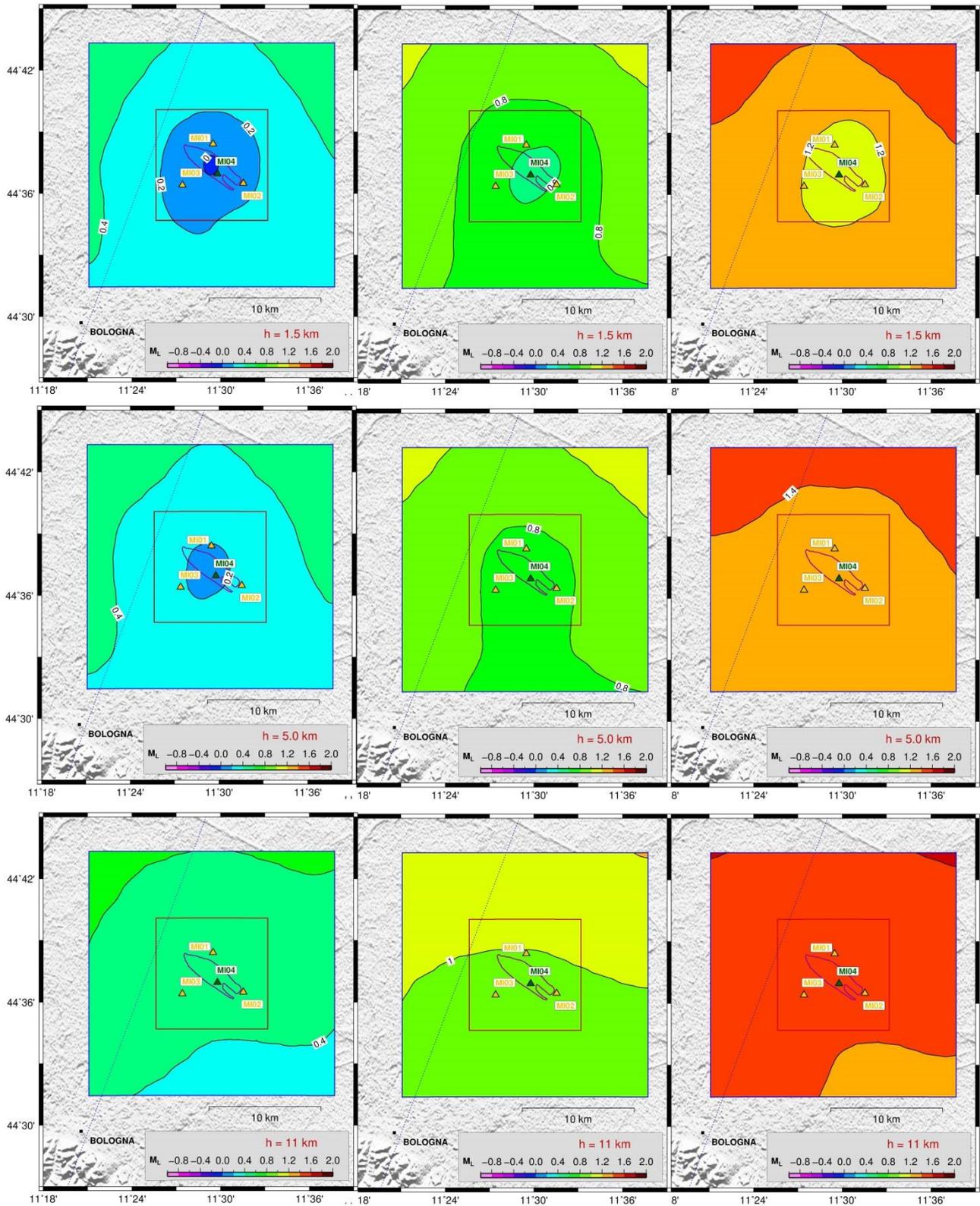


Figura 22d. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione INGV + STOGIT 1 a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di noise (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

INGV – STOGIT 2

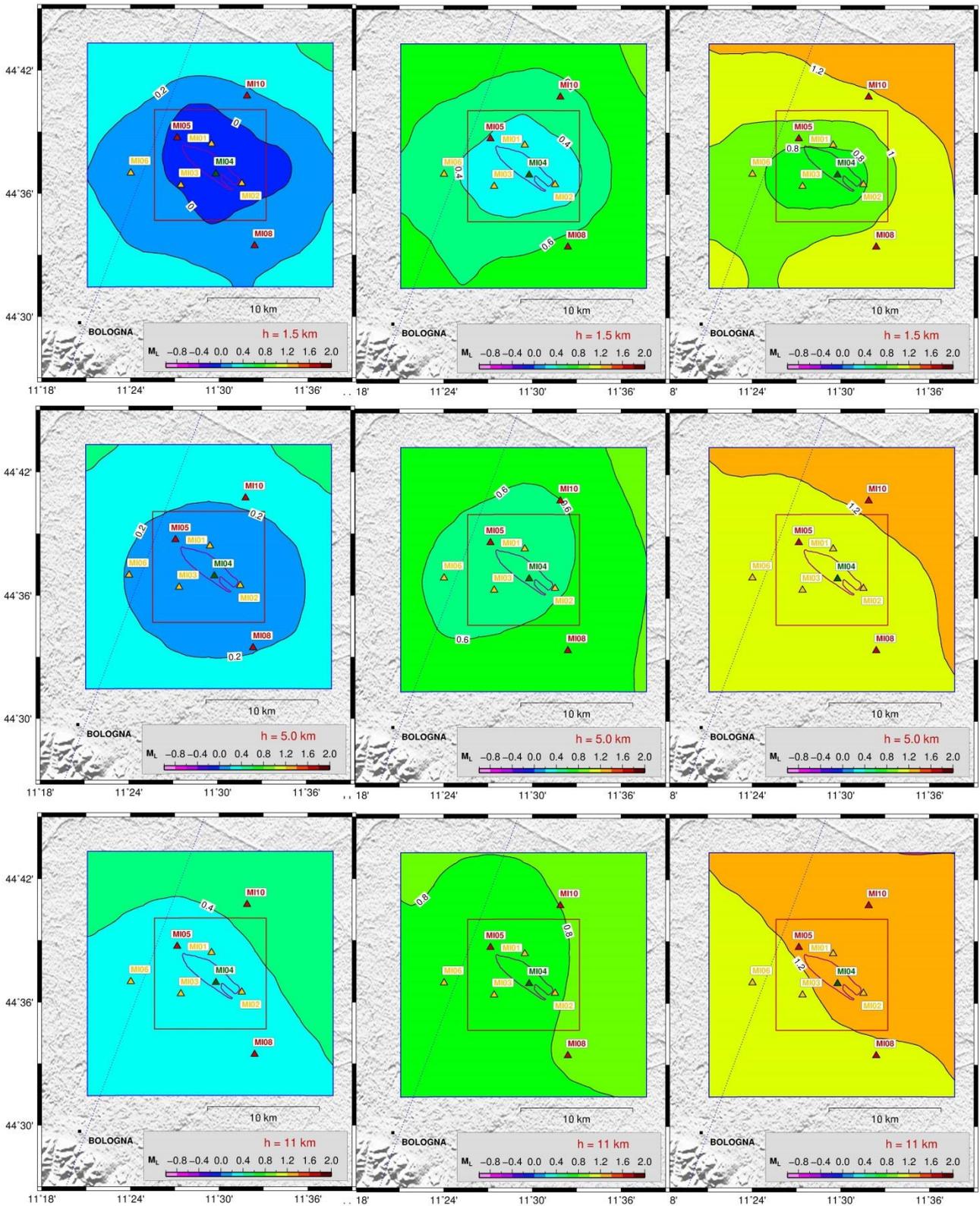


Figura 22e. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione INGV + STOGIT 2 a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di noise (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

INGV – STOGIT 2 - AlpArray

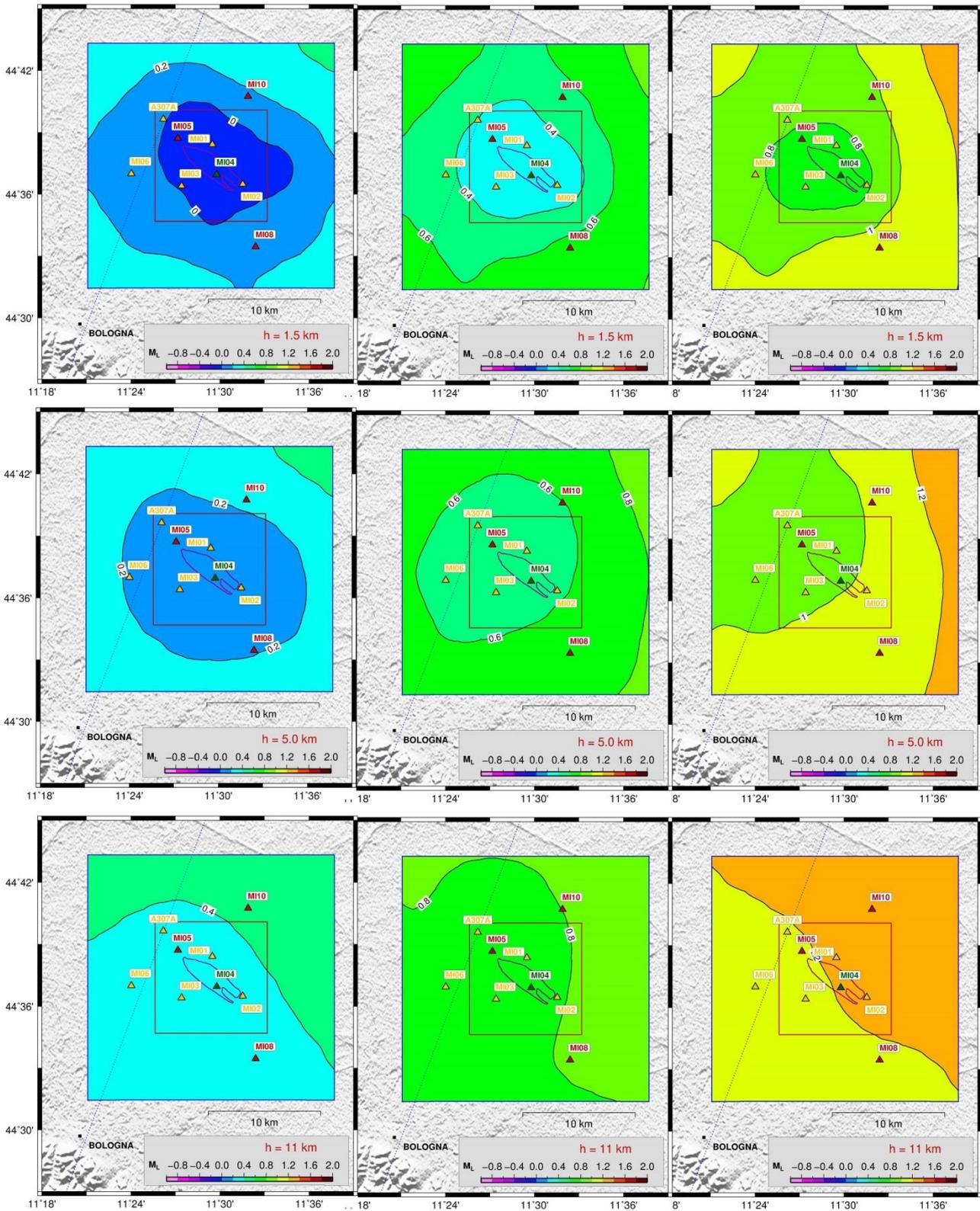


Figura 22f. Analisi di detezione: magnitudo minima localizzabile per configurazione INGV + STOGIT 2 * AlpArray a differenti profondità (1.5 km pannelli in alto, 5.0 km a metà e 11.0 km in basso) e per diversi livelli di rumore (basso rumore pannelli a sinistra, medio rumore pannelli centrali e altro rumore pannelli a destra).

1.8.3 Analisi di detezione: sintesi risultati e considerazioni

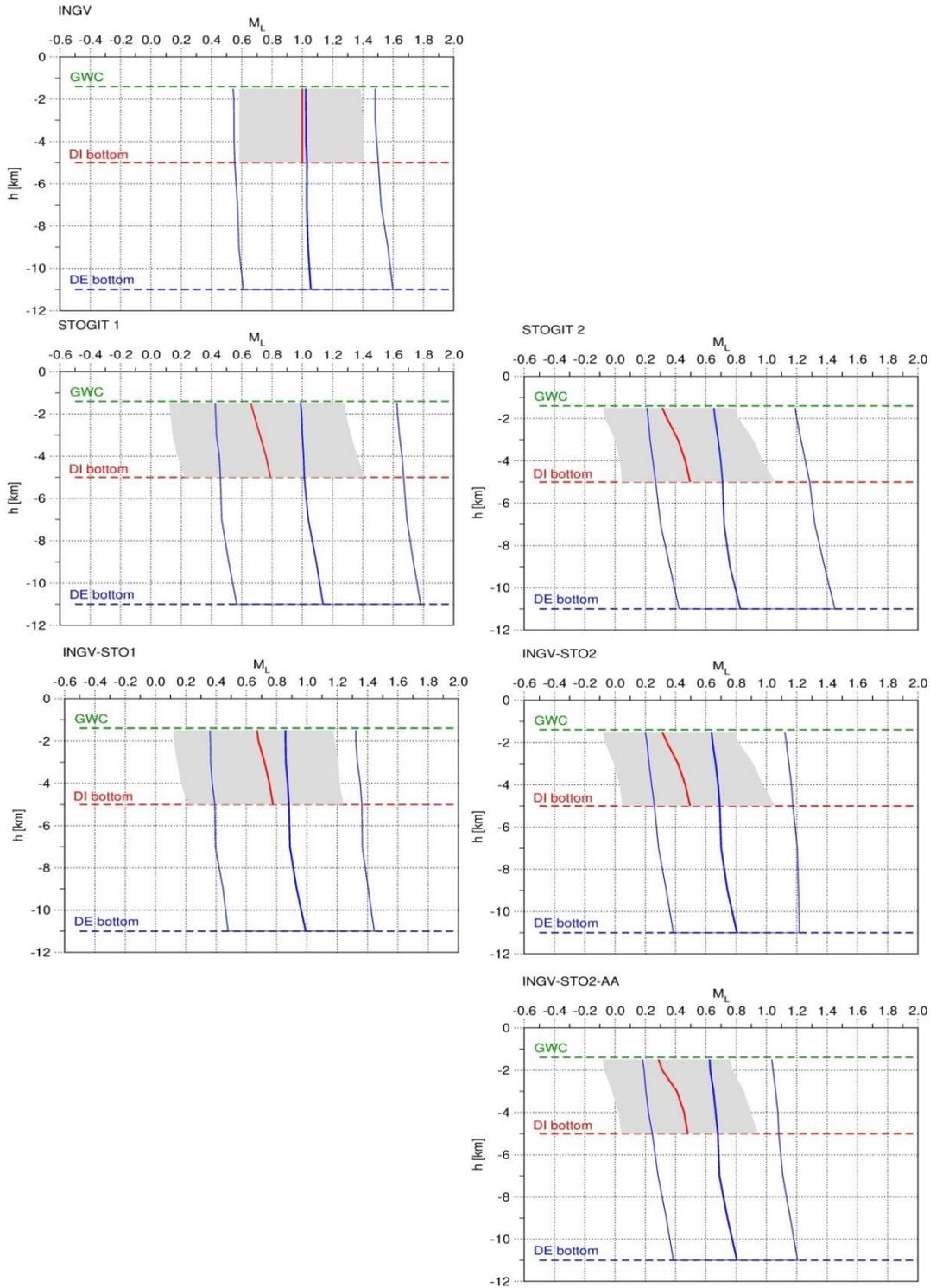


Figura 23. Valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo M_L in funzione della profondità, h , nel Dominio Interno di rilevazione, DI, e nella parte di Dominio Esteso non inclusa in DI. Le soglie di localizzazione sono state ottenute considerando il numero minimo di detezioni per la localizzazione pari a 4. In grigio viene mostrata la variabilità delle soglie ottenute nel DI al variare delle condizioni di rumore sismico ambientale. Linea rossa, mediana della soglia di localizzazione nel DI. Linee blu, valori di soglia al percentile 10, 50 e 90 considerando i punti appartenenti al DE escludendo il DI (DE-DI).

La Fig. 23 riepiloga le varie situazioni mostrate nelle figure 22a-f.

Sono illustrati i risultati ottenuti dalle simulazioni per le profondità di 1.5 (base giacimento), 5.0 (base DI) e 11.0 km (base DE), per le configurazioni di rete INGV, STOGIT 1, STOGIT 2, INGV-STOGIT 1, INGV-STOGIT2, INGV-STOGIT2-AlpArray.

I valori ottenuti si riferiscono alla soglia media di magnitudo M_L , calcolata per ogni profondità, in aree corrispondenti alla proiezione superficiale del DI e alla parte di DE non inclusa in DI, rispettivamente.

Considerando unicamente le stazioni della Rete Sismica Nazionale in corrispondenza della proiezione in superficie del DI, nel caso A1, corrispondente a rumore sismico ambientale estremamente favorevole, si ottengono mediamente le seguenti soglie di magnitudo di localizzazione: 0.6 (alla profondità del giacimento), 0.6 (alla base del DI).

Nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI (DE-DI) si ottengono mediamente le seguenti soglie di magnitudo di localizzazione: 0.5 (alla profondità del giacimento), 0.6 (alla base del DI) e 0.6 (alla base del DE).

Nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, le soglie di magnitudo di localizzazione sono mediamente più elevate, tranne per il caso in esame.

Infatti le stazioni della rete nazionale hanno una inter-distanza media superiore alle dimensioni del DI e del DE, per cui DI e DE presentano sempre il medesimo numero di stazioni (1 sola in DI - la stazione FIU coincidente con MI01 del Concessionario - e le rimanenti 12 al di fuori del DE), indipendentemente dal fatto che si considerino eventi entro il dominio in esame.

Il valore della soglia di localizzazione risulta quindi dipendente essenzialmente dal livello del noise e giocano un ruolo molto importante le stazioni meno rumorose (cfr. Fig. 17) MTRZ, BRIS e IMOL (posizionate a sud – sud est del centro rete) e ZCCA (a sud ovest) che di fatto regolano le soglie di localizzazione per tutti i domini.

I valori mediamente bassi di noise per queste stazioni permettono teoricamente di rilevare eventi debolmente energetici, si veda l'esempio in Fig. 24 relativo alla simulazione per un evento di magnitudo 1.0 posto a distanza di 35 km da IMOL e MTRZ e di 50 km da ZCCA.

Il livello dello spettro del segnale è ampiamente sopra la mediana dei valori di disturbo antropico nella banda di frequenza 1-20 hz.

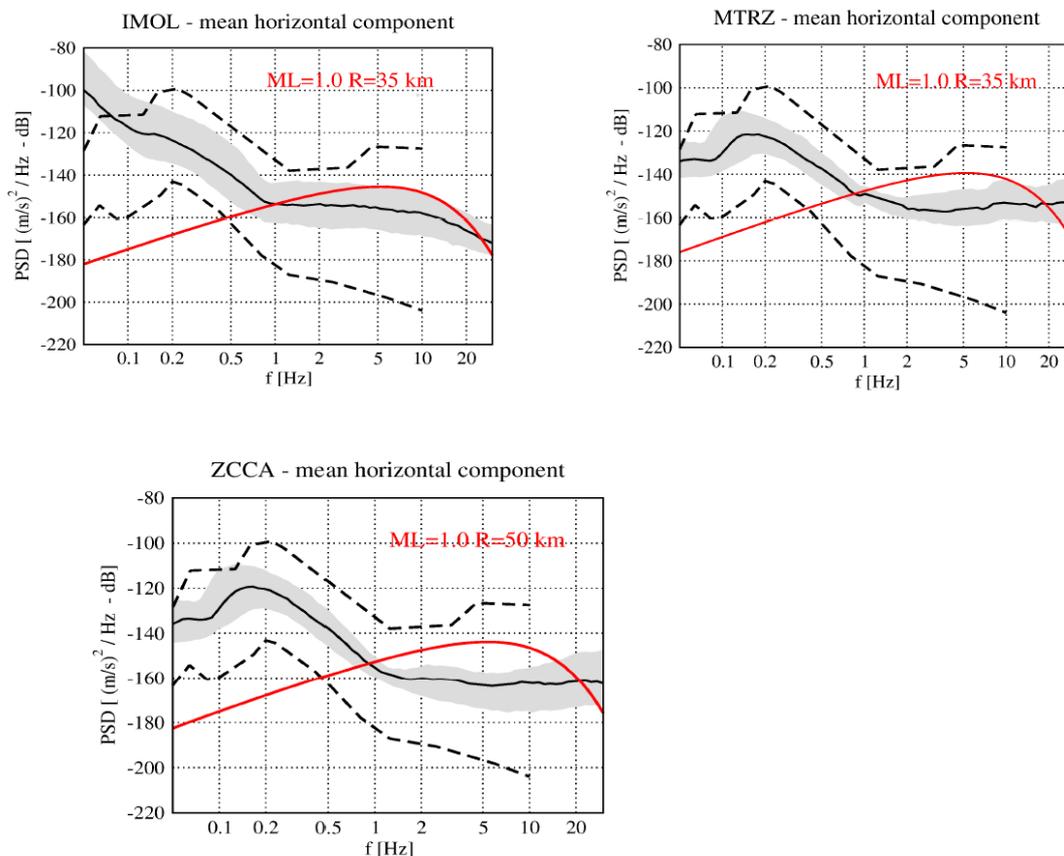


Figura 24. Densità dello spettro di potenza (PSD) per un evento simulato di $M=1.0$ (linea rossa) per alcune stazioni della RSN caratterizzate da un livello di noise mediamente basso (in nero mediana, tratteggiato curve standard di riferimento New High Noise e New Low Noise Model).

Al contrario, considerando le stazioni del concessionario e la loro piccola inter-distanza (paragonabile con le dimensioni del DI) è possibile notare una migliore risoluzione per i valori di magnitudo della soglia di localizzazione. Infatti il DI è “campionato” con 5 stazioni e le altre 3 sono posizionate nel dominio esteso, appena fuori quello interno e con una disposizione angolare ottimale.

Considerando anche soltanto le stazioni della rete del Concessionario a inizio progetto (STOGIT 1) o l’implementazione condotta nel corso del 2018 (STOGIT 2) si nota un miglioramento rispetto alla RSN, specie per quanto riguarda il dominio interno, ove si raggiunge una magnitudo minima per la detezione, considerando almeno 4 stazioni per la localizzazione degli eventi, pari a magnitudo 0.2 per eventi simulati a profondità di 5 km nel DI nella configurazione iniziale STOGIT 1 e magnitudo 0.0 considerando tutte le stazioni del Concessionario.

Nel DI e nel DE-DI non ci sono sostanziali differenze considerando solo le stazioni del Concessionario (configurazione STOGIT 2) e la Rete Operativa “finale” (data dall’integrazione delle stazioni della RSN INGV con STOGIT 2). Differenze di localizzazione si avrebbero naturalmente se si considerassero invece settori esterni al DE, ove il fatto di poter disporre delle stazioni RSN permette di avere un minor gap angolare e di analizzare gli eventi all’interno della rete sismica. E’ infatti ben noto che la precisione della localizzazione è fortemente influenzata, tra i vari parametri da considerare, oltre che dal numero di stazioni anche dalla loro posizione e distribuzione geografica.

Se l’evento si verifica al di fuori della copertura areale delle stazioni si va incontro a forti imprecisioni nella determinazione focale, come avviene ad esempio per gli eventi che si verificano in mare o nei margini di placca dei domini oceanici.

I criteri empirici solitamente impiegati per valutare l'affidabilità della stima dei parametri di localizzazione riguardano: il numero di fasi utilizzate (arrivi P ed S), il GAP (massimo angolo senza osservazioni), la distanza dell'epicentro dalla stazione più vicina e l'ampiezza media dei residui fra tempi di percorso (*travel time*) delle onde sismiche osservati e stimati.

Per una localizzazione accettabile, vengono solitamente richiesti un numero minimo di fasi pari a 8 (delle quali almeno una fase S) e un GAP minore di 180° (Husen e Hardebeck, 2010).

Se l'evento è "esterno" alla rete il GAP è sempre maggiore di 180° . Per il monitoraggio del giacimento potrebbero comunque essere assolutamente sufficienti le stazioni del concessionario (come indicano i valori di soglia calcolati nella configurazione STOGIT 2, mediamente sotto magnitudo 1.0 anche in condizioni di alto noise nel DI).

Secondo gli ILG, la rete pianificata dal Concessionario dovrebbe portare nell'intervallo [0.0-1.0] e a 1.0 le magnitudo di localizzazione ottenibili in DI e in DE, rispettivamente.

In effetti, con la Rete Operativa (INGV-STOGIT 2) nelle condizioni più sfavorevoli e di massimo disturbo (90° percentile), già si ottengono mediamente le seguenti soglie di magnitudo di localizzazione: 0.8 (alla profondità del giacimento), 1.0 (alla base del DI).

Nella parte di Dominio Esteso non compresa in DI, prendendo di nuovo come riferimento il caso con 4 stazioni che "triggerano" l'evento, si ottengono le seguenti soglie: 1.1 (alla profondità del giacimento), 1.2 (alla base del DI e alla base del DE).

Ricordiamo che mediamente la stima di magnitudo è affetta da una varianza pari a 0.2-0.3, siamo quindi entro la stima prevista da ILG anche per il caso, più restrittivo, di dover aver 4 stazioni con il livello segnale/noise oltre la soglia. I valori sarebbero ancora inferiori se considerassimo solo 3 stazioni, sufficienti per una localizzazione.

Se consideriamo condizioni di disturbo medio e minimo la Rete Operativa è ampiamente al di sotto di magnitudo 1 nel DI e nel DE-DI, raggiungendo teoricamente anche valori di magnitudo negativa, pari a -0.1, per eventi posti alla profondità di 1.5 km in DI.

In Tab. 7 sono indicati i valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo ML in funzione della profondità.

Infine, occorre tener presente che in generale si è fatto riferimento alle condizioni più sfavorevoli del disturbo per quanto riguarda il noise ambientale.

La variabilità del noise può infatti portare a avere condizioni favorevoli, in termini di performance della rete e di diminuzione e della soglia di magnitudo minima di localizzazione se, invece del 90° percentile della PDF del noise, andiamo a considerare le condizioni corrispondente a mediana e 10° percentile, con valori di magnitudo di soglia inferiori di circa 0.5 e 1.0, rispettivamente.

Configurazione INGV (solo stazioni RSN – riferimento per confronti)						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	0.6	0.5	1.0	1.0	1.4	1.5
h = 5.0 km	0.6	0.6	1.0	1.0	1.4	1.5
h = 11.0 km	-	0.6	-	1.1	-	1.6
Configurazione STOGIT 1(solo stazioni Stogit, stato iniziale)						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	0.1	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6
h = 5.0 km	0.2	0.5	0.8	1.0	1.4	1.7
h = 11.0 km	-	0.6	-	1.1	-	1.8
Configurazione STOGIT 2 (solo stazioni Stogit, situazione dopo implementazione)						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	-0.1	0.2	0.3	0.7	0.8	1.2
h = 5.0 km	0.0	0.3	0.5	0.7	1.1	1.3
h = 11.0 km	-	0.4	-	0.8	-	1.5
Configurazione INGV – STOGIT 1						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	0.1	0.4	0.7	0.9	1.2	1.3
h = 5.0 km	0.2	0.4	0.8	0.9	1.2	1.4
h = 11.0 km	-	0.5	-	1.0	-	1.4
Configurazione INGV – STOGIT 2 (risultato finale progetto – RETE OPERATIVA)						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	-0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.1
h = 5.0 km	0.0	0.3	0.5	0.7	1.1	1.2
h = 11.0 km	-	0.4	-	0.8	-	1.2
Configurazione INGV – STOGIT2 – AlpArray (rete operativa con 2 stazioni rete temporanea AlpArray)						
	10° percentile PDF noise		Mediana PDF noise		90° percentile PDF noise	
Area	DI	DE-DI	DI	DE-DI	DI	DE-DI
h = 1.5 km	-0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	1.0
h = 5.0 km	0.0	0.2	0.5	0.7	0.9	1.1
h = 11.0 km	-	0.4	-	0.8	-	1.2

Tabella 7. Valori medi delle soglie di localizzazione in unità di magnitudo ML in funzione della profondità, h, relativi ai punti di simulazione posizionati nel Dominio Interno di rilevazione (DI) e nella parte di Dominio Esteso non inclusa in DI (DE-DI). Il numero minimo di stazioni oltre soglia per la localizzazione è posto pari a 4. Lo sfondo in grigio si riferisce alla profondità di 11 km, non considerata per il DI (massima profondità pari a 5 km).

1.9 Sismicità registrata

Nel presente rapporto consideriamo la sismicità dell'area utilizzando i segnali registrati da tutte le stazioni che erano disponibili nel periodo 1/1/2018 – 31/5/2019 e acquisiti in tempo reale nel medesimo periodo presso INGV-MI.

Nel presente paragrafo indicheremo questa rete sismica (composta dall'integrazione della rete costituita dalle stazioni di proprietà del Concessionario, RMMS e dalle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV, RSN e del progetto AlpArray in un raggio di 50 km da Minerbio), con l'acronimo RSIMS.

E' stata applicata una procedura di analisi che consiste in due fasi successive:

- 1) procedura automatica - mediante un sistema di trigger off-line basato su un algoritmo di tipo STA/LTA che utilizza i dati dell'archivio delle forme d'onda in continuo convertiti nel formato SAC (Cattaneo et al., 2011), è stato prodotto automaticamente un data-set di segnali transienti in coincidenza temporale (eventi);
- 2) revisione manuale - mediante il software SacPicker (Spallarossa et al., 2011) ogni evento è stato processato manualmente al fine di identificarne l'eventuale natura sismica e in caso affermativo di stimarne la localizzazione e la magnitudo.

I parametri del trigger sono stati stabiliti mediante numerosi test effettuati con i dati registrati dalla rete sismica nel periodo 1/1/2017 – 31/12/2017, tenendo conto degli obiettivi del monitoraggio microsismico previsti dal Protocollo Operativo (RER, 2016a; 2016b).

Trattandosi di un data-set costituito da eventi che sarebbero stati sottoposti in seguito ad una fase di elaborazione manuale, si è deciso di applicare parametri di trigger che permettessero di individuare anche eventi (eventualmente non sismici) caratterizzati da rapporto segnale/rumore non particolarmente elevato. Si è preferito avere un potenziale maggior numero di "falsi" trigger piuttosto che rischiare di avere eventi "persi" dal sistema automatico di riconoscimento.

Questa scelta, operata allo scopo di sfruttare al massimo le capacità di detezione della rete, ha condotto a definire i seguenti parametri: $LTA = 30$ s; $STA = 1$ s; soglia trigger (STA/LTA) = 3; finestra di ricerca dei trigger in coincidenza = 3 s; numero minimo di stazioni per l'identificazione di un evento = 3.

L'applicazione dell'algoritmo STA/LTA è stata effettuata su segnali filtrati passa-banda nell'intervallo 2-25 Hz considerando esclusivamente le stazioni dotate di sensore velocimetrico.

In questa fase di sperimentazione degli ILG si è deciso infatti di non utilizzare gli accelerometri eventualmente installati nelle stazioni che vanno a completare la rete microsismica a causa del rapporto segnale/rumore non particolarmente elevato che caratterizza tali sensori.

L'applicazione ai dati del periodo 1/1/2018 - 31/5/2019 della fase 1) della procedura di cui sopra, ha consentito l'individuazione di 1941 potenziali eventi.

L'applicazione della fase 2) ha quindi permesso di identificare come eventi sismici 256 di essi, mentre i rimanenti sono stati catalogati come segnali transienti causati da disturbi di natura antropica o rumore ambientale. Dei 256 eventi sismici riconosciuti, 224 sono presenti nel catalogo degli eventi registrati dalla RSN (INGV-CNT, 2019b).

Al fine di caratterizzare pienamente la sismicità registrata, il catalogo degli eventi sismici riconosciuti è stato integrato con le informazioni desunte dal catalogo della RSN e completato con il risultato delle elaborazioni effettuate, soprattutto sugli eventi non presenti nel catalogo nazionale.

E' stato utilizzato lo schema riportato in Tab.8 operando una prima suddivisione fra eventi contenuti nel catalogo della RSN (A) ed eventi non contenuti nel medesimo catalogo (B).

I primi sono stati successivamente suddivisi nelle tipologie A0, A1, A2 e A3 a seconda del valore della distanza ipocentrale, R, considerando le distanze di riferimento $R_1 = 20$ km e $R_2 = 50$ km.

Il valore di R_1 approssima per eccesso la massima dimensione lineare del volume DE. Le tipologie A1 e A2, caratterizzate entrambe dalla condizione ($20 \leq R < 50$) km vengono distinte in base alla stazione del primo arrivo P, la quale può appartenere o meno alla rete microsismica del Concessionario (che, come definito inizialmente in questo paragrafo, indicheremo con l'acronimo RMMS).

Gli eventi non contenuti nel catalogo della RSN vengono invece suddivisi nelle tipologie B0, B1 e B2 a seconda che il primo arrivo P venga osservato ad una stazione che appartiene o meno alla RMMS e a seconda del numero di coppie di fasi dirette P ed S chiaramente osservabili.

Nel caso in cui la prima stazione appartenga alla RMMS, con meno di 4 coppie di fasi osservate l'evento viene ritenuto non localizzabile a causa del non sufficientemente elevato rapporto segnale/rumore. In questo caso viene classificato come B0 mentre in caso contrario viene classificato come B1. La tipologia B2 si riferisce invece a eventi non catalogati dal bollettino nazionale ma con il primo arrivo P osservato ad una stazione non appartenente alla RMMS.

Gli eventi appartenenti alle tipologie A0, A1 e B1 vengono quindi rilocalizzati (A0, A1) o localizzati (B1) mediante SacPicker (Spallarossa et al., 2011) che fornisce anche una stima della magnitudo locale (cfr. Tab.8 - colonna 4). Il risultato finale della procedura consiste quindi nella suddivisione di tutti gli eventi sismici in 4 diverse classi (Tab.8 - colonna 5) definite sulla base dell'appartenenza ai domini di rilevazione: classe 0 per eventi non localizzabili; classe 1 per eventi inclusi in DI; classe 2 per eventi compresi fra DI e DE; classe 3 per eventi esterni a DE.

Le possibili occorrenze prodotte dall'applicazione della procedura sopra descritta sono riportate in Tab. 9, nella quale i parametri di localizzazione e magnitudo (colonne 2 - 6) vengono stimati riportando i dati contenuti nel catalogo della RSN (A2, A3) o rilocalizzando gli eventi mediante SacPicker (A0, A1, B1).

	Appartenenza al catalogo della RSN	Tipologia evento	Rilocalizzazione	Classe evento
ID	SI (A)	A0: $R < 20$ km	SI	1; 2; (3)
		A1: ($20 \leq R < 50$) km ; primo arrivo P: MIxx	SI	1; 2; 3
		A2: ($20 \leq R < 50$) km ; prima arrivo P: XXXX \neq MIxx	NO	3
		A3: $R \geq 50$ km	NO	3
	NO (B)	B0: primo arrivo P: MIxx; $N < 4$	NO	0
		B1: primo arrivo P: MIxx; $N \geq 4$	SI	1; 2; 3
		B2: prima arrivo P: XXXX \neq MIxx	NO	3

Tabella 8. Schema di classificazione degli eventi sismici registrati dalla RSIMS (vedi testo). Stazioni della RMMS: MIxx; stazioni non appartenenti alla RMMS: XXXX. N indica il numero minimo di coppie di primi arrivi P ed S osservate.

ID_Detector	To	Lat	Lon	h (km)	Mag	T-Mag	D (km)		R (km)	Num. coppie di fasi S; P	Nome prima stazione	S-P prima stazione (s)	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia evento	Classe evento
							da Minerbio	da Minerbio							
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	R < 20	N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A0	1	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	R < 20	N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A0	2	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	20 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	1	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	20 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	2	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	20 ≤ R < 50	N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A1	3	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	20 ≤ R < 50		XXXX ≠ Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	A2	3	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx	D	R ≥ 50					A3	3	
YYYYMMDDhhmmxx									N < 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B0	0	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	1	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	2	
YYYYMMDDhhmmxx	YYYY-MM-DD hh:mm:ss.ssssss	xx.xxxx	xx.xxxx	xx.x	x.x	Mx			N ≥ 4	Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B1	3	
YYYYMMDDhhmmxx										XXXX ≠ Mixx	x.xx	XXXX; XXXX	B2	3	

Tabella 9. Elenco delle possibili occorrenze derivanti dall'applicazione dei criteri di classificazione illustrati in Tab.6. ID_Detector: codice identificativo del trigger: To: tempo origine; Lat, Lon, h: latitudine, longitudine e profondità dell'evento; Mag, T-Mag: valore e tipo di magnitudo; D, R: distanze epicentrale e ipocentrale da Minerbio (punto C di Fig.5); N: numero di coppie di fasi dirette P ed S, osservate alle stazioni della RSIMS; XXXX (MIxx): nomi delle stazioni della rete RSIMS (RMMS). I parametri di localizzazione e magnitudo (colonne 2-6) vengono stimati riportando i dati contenuti nel catalogo della RSN (campi indicati in colore) o rilocalizzando gli eventi mediante SacPicker (campi indicati in nero).

Occorre tener conto del fatto che le localizzazioni del catalogo RSN, riviste da un sismologo, vengono rese disponibili entro 30 minuti dal loro accadimento. Nel corso del tempo, anche a distanza di mesi dalla loro iniziale pubblicazione, le localizzazioni possono essere riviste e aggiornate (ad esempio per la pubblicazione del Bollettino Sismico Italiano, <http://cnt.rm.ingv.it/bsi>) con le integrazioni che si rendono via via disponibili.

Nelle precedenti relazioni trimestrali sono naturalmente stati utilizzati i dati disponibili al momento della redazione, in questa relazione finale abbiamo quindi rivisto e aggiornato al 31 maggio 2019 tutti parametri relativi alle localizzazioni degli eventi sismici ottenute dalla RSN (INGV-CNT, 2019b; Lista Terremoti, <http://cnt.rm.ingv.it/> - ultimo accesso 14 giugno 2019).

Gli eventi sismici registrati nel periodo 1/3/2018-31/5/2019 sono riportati in Tab.10 (utilizzando la codifica descritta nel testo e riportata in Tab. 9).

Non sono presenti eventi in DI (tipologia evento A0, classe evento 1).

Dei 256 terremoti, generalmente localizzati all'esterno del dominio esteso di rilevazione, 224 (tipologia evento A2 e A3, classe evento 3) sono anche presenti nel catalogo della RSN.

17 eventi non sono presenti nel catalogo RSN, poiché la stazione più vicina non appartiene alla rete del Concessionario, si tratta di eventi esterni a DE che non vengono localizzati (tipologia evento B2, classe 3).

In Tab. 10 sono presenti 13 eventi di tipo B1 e 2 eventi di tipo B0.

I 13 eventi di tipo B1 (prima stazione appartenente alla rete del Concessionario, almeno 4 stazioni con fasi utili per la determinazione focale) sono stati localizzati e sono risultati posizionati a distanze ipocentrali comprese tra 12 e 49 km.

Due di questi eventi (uno dei quali è l'evento di magnitudo 0.6 di cui parleremo tra poco) sono con distanza inferiore a 20 km e sono quindi stati classificati come tipo B1 e classe 2.

In generale si tratta comunque di eventi di bassa energia (valore di magnitudo massima pari a 2.0, un altro evento ha magnitudo pari a 1.8), gli altri 11 hanno magnitudo inferiore a 1.7.

L'evento più vicino (al bordo del DI, nei pressi della stazione MI10, a una distanza epicentrale dal centro rete pari a 10 km) è caratterizzato da magnitudo 0.6. E' stato localizzato a una profondità pari a 6.1 km.

Le registrazioni ottenute per questo evento (verificatosi in data 01/12/2018 alle ore 22:26 UTC) verranno mostrate nel paragrafo 1.11 (Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG). In particolare negli esempi di Fig. 28a, 28b e 28c noteremo come il segnale a bassa frequenza caratterizzi le finestre d'analisi. Vedremo inoltre che anche le registrazioni effettuate utilizzando un sensore a 1 Hz permettano la lettura delle fasi P e S anche per un evento di magnitudo molto bassa.

Nel periodo in esame (gennaio 2018 – maggio 2019) non sono stati registrati eventi sismici di magnitudo superiore ai livelli di detezione (descritti nel precedente paragrafo e riassunti in Tab. 7) che siano correlabili alle attività di stoccaggio/estrazione.

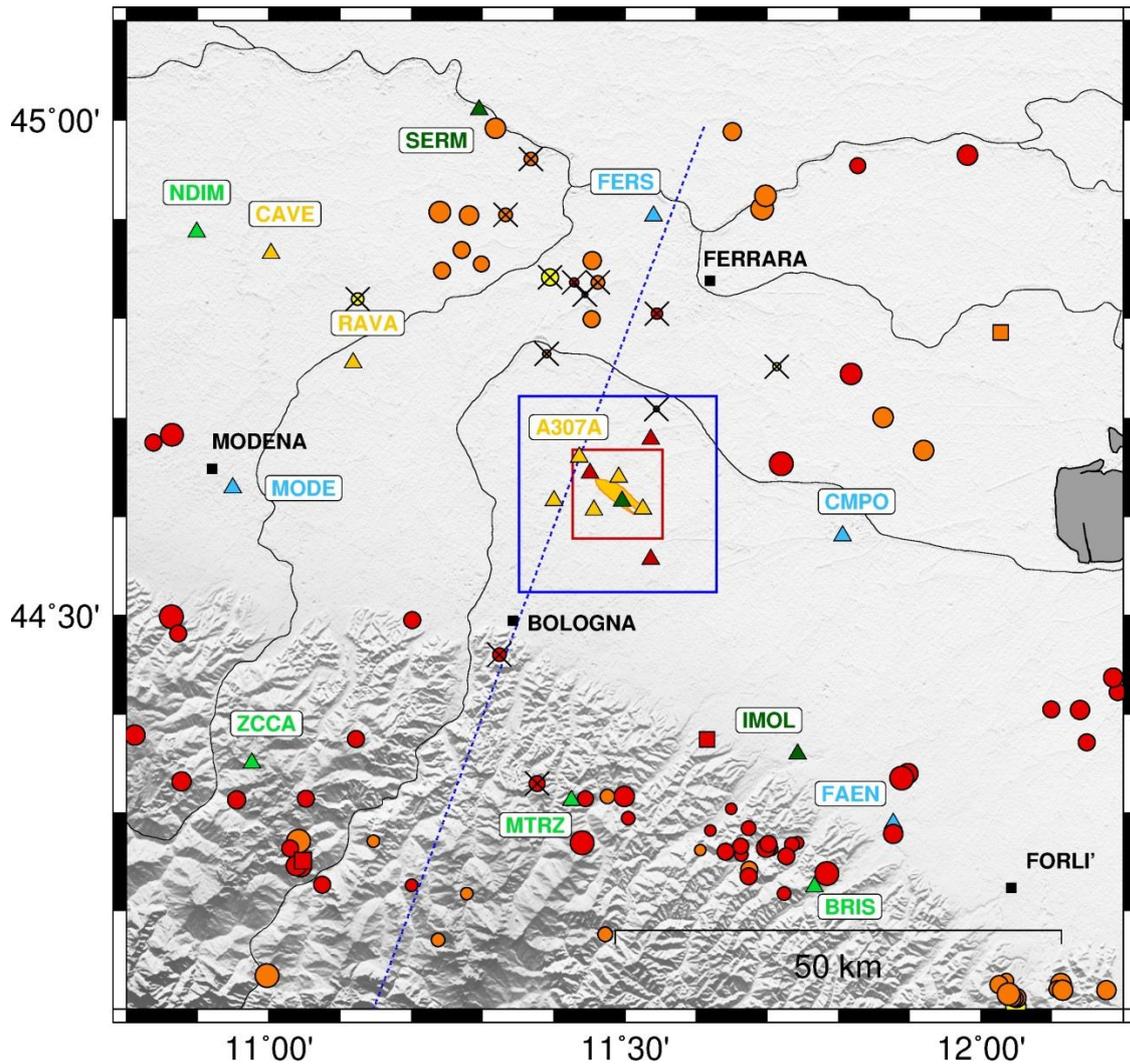


Figura 25. Eventi sismici localizzati registrati nel periodo 1/1/2018-31/05/2019. Cerchi rossi pieni: eventi con profondità maggiore di 11 km; cerchi arancione: eventi con profondità compresa fra 5 e 11 km, cerchi gialli: eventi con profondità inferiore a 5 km. I cerchi sono proporzionali alla magnitudo. Gli eventi di tipologia B1 (con la prima stazione appartenente alla rete del Concessionario e almeno 4 stazioni con fasi utili per la determinazione focale) sono contrassegnati da una crocetta. I triangoli mostrano la posizione delle stazioni. In figura vengono mostrate anche la proiezione in superficie del contorno dei volumi DI e DE (in rosso e in blu rispettivamente); la proiezione in superficie del GWC (area in giallo) e la traccia C-C' di Boccaletti et al. (2004) (linea blu tratteggiata).

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20180104104747	2018-01-04	10:46:12.49	42.6190	19.8865	10.1	5.2	mb	712	712					A3	3
20180104201352	2018-01-04	20:13:35.25	44.3398	11.4818	29.7	2.0	ML	32	43	3	MTRZ	3.5	BRIS; MI02	A2	3
20180104201635	2018-01-04	20:16:29.09	44.3165	11.4993	26.7	2.3	ML	34	43	7	MTRZ	4.5	BRIS; MI02	A2	3
20180107024533	2018-01-07	02:45:15.64	44.1008	10.7908	11.7	2.3	ML	80	81					A3	3
20180110060353	2018-01-10	06:03:16.88	44.6852	10.0443	20.2	2.6	ML	115	116					A3	3
20180110230353	2018-01-10	23:03:31.05	44.6428	9.9217	24.4	2.6	ML	124	127					A3	3
20180111034856	2018-01-11	03:48:02.23	42.6412	13.2900	8.1	3.4	Mw	264	264					A3	3
20180113203927	2018-01-13	20:39:14.59	44.2947	11.5045	31.5	1.6	ML	37	48					A3	3
20180122113844	2018-01-22	11:38:13.56	44.1193	12.1768	7.2	2.2	ML	78	79					A3	3
20180122193430										3	IMOL	4.5	BRIS; MTRZ	B2	3
20180122212758	2018-01-22	21:27:51.08	44.3040	11.6492	28.4	1.3	ML	38	47	3	IMOL	3.3	BRIS; MTRZ	A2	3
201801311125326	2018-01-31	12:54:26.85	44.2180	11.7238	19.1	1.6	ML	49	52					A3	3
20180131225140	2018-01-31	22:51:34.12	44.3167	11.4757	7.3	1.7	ML	34	35	6	BRIS	5.0	MI02; MI03	A2	3
20180201010240	2018-02-01	01:02:35.85	44.6540	11.7202	36.4	2.8	ML	19	41	16	CMPO	5.0	MI02; MI04	A2	3
20180201014820	2018-02-01	01:47:32.66	47.1813	9.9928	11.4	3.8	ML	307	308					A3	3
20180203125423	2018-02-03	12:53:11.68	43.3178	16.8530	19.7	4.8	mb	453	454					A3	3
20180203131824	2018-02-03	13:18:11.60	44.9883	11.6507	10.7	2.1	ML	43	44	4	FERS	3.0	SERM; MI04	A2	3
20180204185807	2018-02-04	18:57:43.17	45.7087	10.6057	6.3	2.8	ML	140	140					A3	3
20180216122726	2018-02-16	12:27:11.42	44.4958	11.2018	29.7	1.9	ML	27	40	3	ZCCA	4.8	MTRZ; BRIS	A2	3
20180218040830	2018-02-18	04:07:49.92	44.2492	12.9372	24.6	2.0	ML	123	125	1	A308A	2.6		A2	3
20180219192940	2018-02-19	19:29:28.68	44.3752	11.1227	24.1	2.0	ML	40	47					A3	3
20180222043340	2018-02-22	04:33:25.04	44.4238	10.3633	22.5	3.4	ML	92	95					A3	3
20180225081705	2018-02-25	08:16:29.30	46.3763	12.5938	7.7	3.8	ML	213	213					A3	3
20180225155342	2018-02-25	15:53:04.86	46.3812	12.5987	7.0	3.6	ML	214	214					A3	3
20180301215246	2018-03-01	21:52:24.04	44.5290	10.2512	28.1	2.8	ML	99	103					A3	3
20180303201206										2	RAVA	2.6	CAVE	B2	3
20180304201652										6	FERS	3.1	A307A; MI01	B2	3
20180305215052	2018-03-05	21:50:35.89	43.9293	11.9653	6.8	3.7	Mw	86	86					A3	3
20180307201644	2018-03-07	20:15:15.40	39.3250	14.5012	379.0	4.4	ML	640	744					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20180323131224	2018-03-23	13:12:11.09	44.7442	11.8177	29.2	2.5	ML	29	41	5	A308A	3.9	FERS; MI02	A2	3
20180324210231	2018-03-24	21:01:58.68	44.0872	10.8188	10.9	2.4	ML	80	81					A3	3
20180326224343	2018-03-26	22:43:07.65	43.0467	12.8798	7.3	3.2	Mw	208	208					A3	3
20180326231116	2018-03-26	23:10:50.10	43.9740	11.8198	25.9	2.1	ML	77	81					A3	3
20180327171355										1	BRIS	3.2		B2	3
20180328033448	2018-03-28	03:34:33.73	43.9662	11.8147	26.9	2.3	ML	78	82					A3	3
20180328073721	2018-03-28	07:36:52.52	45.8702	11.8083	8.2	2.9	ML	141	141					A3	3
20180329163015	2018-03-29	16:31:10.06	44.2697	11.7428	22.8	1.4	ML	44	50					A3	3
20180329163016	2018-03-29	16:31:10.92	44.2697	11.7428	22.8	1.4	ML	44	50	1	BRIS	3.3		A2	3
20180329163016	2018-03-29	16:31:23.45	44.2678	11.7347	24.4	1.7	ML	44	50	1	BRIS	3.3		A2	3
20180329230119	2018-03-29	23:00:42.95	43.0322	11.5752	7.8	2.9	ML	177	177					A3	3
20180330001238	2018-03-30	00:11:29.07	46.9193	11.2387	11.3	2.7	ML	256	256					A3	3
20180331011928	2018-03-31	01:18:44.44	42.3528	13.4697	18.8	3.8	Mw	299	299					A3	3
20180401002222	2018-04-01	00:22:10.79	44.2558	11.7272	19.1	1.9	ML	45	49	11	BRIS	3.7	IMOL; FAEN	A2	3
20180401023217	2018-04-01	02:32:09.75	44.2605	11.6412	15.4	2.0	ML	43	44	10	BRIS	3.4	IMOL; FAEN	A2	3
20180401152223										5	MTRZ	6.8	ZCCA; MI03	B2	3
20180404022022	2018-04-04	02:19:45.51	43.0598	13.0312	7.8	3.9	ML	214	214					A3	3
20180404070324	2018-04-04	07:03:18.25	44.2633	11.7057	21.2	1.6	ML	44	48					A3	3
20180404184209	2018-04-04	18:41:28.71	43.0657	13.0298	8.1	3.9	ML	213	213					A3	3
20180405011507	2018-04-05	01:14:54.98	44.9917	11.3183	6.5	2.4	ML	43	44	12	SERM	2.1	FERS; CAVE	A2	3
20180409015814	2018-04-09	01:58:09.67	44.2643	11.6987	19.0	2.2	ML	43	47	13	BRIS	3.3	IMOL; FAEN	A2	3
20180410031130	2018-04-10	03:11:30.76	43.0687	13.0365	8.1	4.6	Mw	213	213					A3	3
20180411044223	2018-04-11	04:41:52.10	43.1340	10.8168	6.2	3.3	ML	174	174					A3	3
20180412022524	2018-04-12	02:23:59.78	47.0893	9.9788	8.2	2.9	ML	299	299					A3	3
20180421024724	2018-04-21	02:47:09.42	44.2682	11.7013	21.8	1.9	ML	43	48	4	BRIS	3.1	IMOL; MTRZ	A2	3
20180423013547	2018-04-23	01:35:24.03	44.6992	9.7093	26.2	2.3	ML	141	144					A3	3
20180423014451	2018-04-23	01:44:07.82	44.6972	9.6987	27.4	2.0	ML	142	145					A3	3
20180423031602	2018-04-23	03:15:58.02	44.9107	11.6928	7.6	2.6	ML	36	37	16	FERS	2.9	MI10; MI05	A2	3
20180423031743	2018-04-23	03:17:34.35	44.9237	11.6973	7.1	2.5	ML	37	38					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20180423050712	2018-04-23	05:07:12.08	44.7860	12.0277	8.4	3.0	ML	47	47					A3	3
20180425010852	2018-04-25	01:08:16.48	43.0612	13.0378	8.1	3.5	ML	214	214					A3	3
20180425094939	2018-04-25	09:48:41.28	41.8785	14.8598	28.7	4.3	Mw	410	411					A3	3
20180429014219										3	CAVE	2.8	NDIM; MI10	B2	3
20180501051722	2018-05-01	05:16:58.20	43.2280	10.9312	7.4	3.6	ML	162	162					A3	3
20180503141909	2018-05-03	14:19:09.57	44.0502	11.7198	6.7	3.3	ML	66	67					A3	3
20180503184604	2018-05-03	18:46:04.65	44.0555	11.7137	7.4	3.6	ML	66	66					A3	3
20180503190330	2018-05-03	19:03:14.37	44.0548	11.7157	6.0	2.6	ML	66	66					A3	3
20180503235237	2018-05-03	23:52:21.63	44.0883	11.7303	5.0	2.6	ML	63	63					A3	3
20180504014239	2018-05-04	01:42:18.35	44.7730	10.6902	8.4	2.3	ML	65	66					A3	3
20180506020101	2018-05-06	02:00:59.06	44.8487	11.2432	6.3	2.0	ML	32	32	18	RAVA	3.8	CAVE; NDIM	A2	3
20180509214836	2018-05-09	21:48:01.94	46.3032	13.1048	9.1	3.6	ML	226	226					A3	3
20180511025742	2018-05-11	02:57:36.61	44.8552	11.2983	8.0	1.8	ML	30	31	11	RAVA	4.6	A307A;CAVE	A2	3
20180511162234	2018-05-11	16:22:27.70	44.7007	11.8632	7.4	2.3	ML	31	32	7	A308A	3.8	MI10 ; MI02	A2	3
20180519000151	2018-05-19	00:01:27.14	44.8682	9.6973	23.6	2.2	ML	144	146					A3	3
20180519013803	2018-05-19	01:37:44.71	44.8697	9.6927	22.7	2.7	ML	145	147					A3	3
20180519164121	2018-05-19	16:41:21.94	44.8233	9.6822	28.7	4.1	ML	145	148					A3	3
20180519165150	2018-05-19	16:51:06.83	44.8452	9.7052	23.1	2.6	ML	143	145					A3	3
20180519200642	2018-05-19	20:06:18.55	44.8387	9.7057	25.0	3.0	ML	143	145					A3	3
20180521034955	2018-05-21	03:49:32.66	45.5907	10.1948	6.7	2.9	ML	148	148					A3	3
20180521085008	2018-05-21	08:49:26.51	43.0822	13.0158	8.4	3.9	ML	211	211					A3	3
20180521220358	2018-05-21	22:03:55.64	44.7998	11.4538	8.8	1.9	ML	20	22	12	FERS	3.3	MI10; A307A	A2	3
20180522221000	2018-05-22	22:09:54.89	44.2422	11.6748	10.0	1.9	ML	45	46	3	BRIS	2.9	IMOL; MTRZ	A2	3
20180606001440	2018-06-06	00:13:57.14	44.8942	9.6798	20.1	2.0	ML	147	148					A3	3
20180609215940	2018-06-09	21:59:24.92	44.2177	11.2783	9.8	1.4	ML	48	49	3	ZCCA	6.3	BRIS; MI08	A2	3
20180625051917	2018-06-25	05:14:47.26	36.7348	21.4058	19.1	5.3	Mw	1211	1211					A3	3
20180625115046	2018-06-25	11:50:30.48	44.1343	10.9978	9.7	2.7	ML	67	68					A3	3
20180701073232	2018-07-01	07:32:16.68	44.1803	10.5480	14.2	3.6	ML	90	91					A3	3
20180701073905	2018-07-01	07:38:47.33	44.2052	10.5597	11.8	2.8	ML	87	88					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20180701081026	2018-07-01	08:10:07.77	44.2017	10.5725	14.4	2.8	ML	87	88					A3	3
20180701105950	2018-07-01	10:59:26.56	44.2105	10.5613	12.7	2.1	ML	87	88					A3	3
20180701154558	2018-07-01	15:45:40.75	44.1960	10.5505	11.1	2.4	ML	89	89					A3	3
20180701180838	2018-07-01	18:08:21.57	44.1918	10.5587	14.5	2.6	ML	89	89					A3	3
20180701190251	2018-07-01	19:02:34.63	44.1868	10.5497	17.9	2.9	ML	89	91					A3	3
20180701234133	2018-07-01	23:41:17.92	44.1737	10.5402	18.1	3.0	ML	91	92					A3	3
20180702124052	2018-07-02	12:40:29.55	44.4053	12.3622	31.8	2.5	ML	73	80					A3	3
20180704090247	2018-07-04	09:01:08.97	41.4475	19.5630	14.6	5.1	Mb	745	746					A3	3
20180708125044	2018-07-08	12:50:11.32	44.5110	10.2097	22.2	1.7	ML	102	105					A3	3
20180722041630	2018-07-22	04:16:04.06	44.8187	10.7680	31.7	2.0	ML	61	69					A3	3
20180722101242	2018-07-22	10:07:26.40	34.4500	46.1300	10.0	5.8	Mw	3154	3154					A3	3
20180726012702	2018-07-26	01:26:46.91	44.7638	12.6593	33.3	2.0	ML	94	100					A3	3
20180811032800	2018-08-11	03:26:58.86	46.3357	13.0517	8.9	3.1	ML	226	226					A3	3
20180811033115	2018-08-11	03:30:38.78	46.3387	13.0357	10.3	3.6	Mw	226	226					A3	3
20180811154017	2018-08-11	15:38:35.57	41.5389	20.0513	18.2	5.2	Mb	776	776					A3	3
20180811232511										6	FERS	1.8	MI10; SERM	B2	3
20180812214401	2018-08-12	21:43:16.54	43.5678	12.1032	7.3	2.9	ML	127	127					A3	3
20180813200442										8	A308A	4.0	CMPO; MI10	B2	3
20180814214926	2018-08-14	21:48:30.98	41.8877	14.8407	19.2	4.6	Mw	408	408					A3	3
20180815092759	2018-08-15	09:27:22.73	45.7192	11.2443	12.6	2.3	ML	124	124					A3	3
20180816182002	2018-08-16	18:19:04.60	41.8742	14.8648	19.6	5.1	Mw	410	411					A3	3
20180816202331	2018-08-16	20:22:34.78	41.8728	14.8747	21.6	4.4	Mw	411	412					A3	3
20180818123141	2018-08-18	12:30:57.03	44.4633	9.8233	17.2	2.6	ML	133	135					A3	3
20180819003832	2018-08-19	00:19:38.75	-18.0773	-178.0660	574.2	8.1	Mwprd	16950	16961					A3	3
20180821003345	2018-08-21	00:33:45.61	44.7933	10.6638	8.1	3.7	Mw	68	69					A3	3
20180821010732	2018-08-21	01:07:06.78	44.7837	10.6580	5.5	2.3	ML	68	68					A3	3
20180821132609	2018-08-21	13:26:04.46	44.8587	11.4542	7.8	2.1	ML	26	28	4	FERS	2.6	MI10; A307A	A2	3
20180821214250	2018-08-21	21:31:41.28	10.6664	-62.8945	105.5	7.0	Mwprd	7953	7953					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20180830033411	2018-08-30	03:33:05.07	44.0402	16.5674	9.8	4.8	mb	409	410					A3	3
20180831130340	2018-08-31	13:03:17.67	43.9880	12.8890	33.3	3.5	Mw	132	136					A3	3
20180905014211	2018-09-05	01:41:59.07	44.3792	10.8117	26.1	2.3	ML	60	66					A3	3
20180906160814	2018-09-06	17:49:17.81	-18.4711	179.4420	647.7	7.7	Mwprd	16917	16930					A3	3
20180907203702	2018-09-07	20:35:04.00	43.4500	17.2500	8.0	4.0	ML	479	479					A3	3
20180909032309	2018-09-09	03:22:48.42	44.4157	10.7302	25.0	2.1	ML	65	69					A3	3
20180910063226	2018-09-10	06:32:00.10	44.9543	11.8273	31.1	1.8	ML	46	55					A3	3
20180911215755	2018-09-11	21:57:13.78	42.9475	13.1785	7.6	3.6	ML	231	231					A3	3
20180915031004	2018-09-15	03:09:14.00	43.8000	15.7500	10.0	4.2	ML	352	352					A3	3
20180915080123	2018-09-15	08:01:16.39	44.9040	11.2813	10.5	2.2	ML	35	37	3	RAVA	4.3	SERM CAVE	A2	3
20180919095501	2018-09-19	09:54:41.48	44.2380	11.7837	20.1	2.7	ML	49	53					A3	3
20180923161730	2018-09-23	16:17:05.05	44.0490	11.8627	32.5	1.8	ML	70	76					A3	3
20180929070248										3	RAVA	4.1	CAVE;A307A	B2	3
20181001185200	2018-10-01	18:51:46.07	44.3143	11.0523	20.6	2.0	ML	49	53					A3	3
20181006233512	2018-10-06	23:34:56.62	44.2577	11.6638	18.9	1.5	ML	43	47	3	BRIS	3.3	IMOL; MI08	A2	3
20181007075100	2018-10-07	07:50:59.20	44.2622	11.6063	9.2	1.3	ML	41	42	2	BRIS	3.2	IMOL	A2	3
20181009005654	2018-10-09	00:56:37.50	44.2355	11.6742	19.4	1.9	ML	47	50	3	BRIS	3.3	IMOL; MI08	A2	3
20181013025126	2018-10-13	02:50:51.67	44.2742	12.6947	29.5	2.4	ML	103	106					A3	3
20181014042046	2018-10-14	04:20:29.36	44.1187	12.1155	7.5	2.1	ML	75	75					A3	3
20181014072322	2018-10-14	07:23:06.63	44.1262	12.1123	6.1	2.4	ML	74	74					A3	3
20181014143504	2018-10-14	14:34:38.13	44.1207	12.1082	6.3		ML	74	75					A3	3
20181014225721	2018-10-14	22:57:06.25	44.1193	12.1147	6.7		ML	75	75					A3	3
20181018032018	2018-10-18	03:20:13.79	44.8143	10.7493	9.4		ML	62	63					A3	3
20181022171604	2018-10-22	17:15:23.45	44.7015	9.7818	8.6		ML	136	136					A3	3
20181022174441	2018-10-22	17:44:22.18	43.9413	11.4878	5.8	2.4	ML	76	76					A3	3
20181025225713	2018-10-25	22:54:50.82	37.4924	20.5950	10.0	6.8	Mwp	1100	1100					A3	3
20181029115939										3	ZCCA	6.5	MI08; MI10	B2	3
20181030151435	2018-10-30	15:12:01.16	37.4889	20.5774	10.0	6.0	Mwp	1100	1100					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20181103093633	2018-11-03	09:36:24.32	44.4992	10.8632	27.6	2.7	ML	52	59					A3	3
20181108083518	2018-11-08	08:34:59.83	44.6127	10.1458	25.3	2.5	ML	107	109					A3	3
20181111072637	2018-11-11	07:26:31.86	44.2842	11.6740	24.5	1.7	ML	40	47					A3	3
20181113032538	2018-11-13	03:25:16.69	44.2712	11.1468	10.7	1.4	ML	48	49	3	ZCCA		MTRZ; BRIS	A2	3
20181115003832	2018-11-15	00:38:15.66	44.4715	10.3052	25.4	1.8	ML	95	99					A3	3
20181118124859	2018-11-18	12:48:46.40	44.0513	12.4858	36.8	4.2	ML	102	108					A3	3
20181118230738	2018-11-18	23:07:22.34	44.2663	11.6632	21.9	1.8	ML	42	47	3	BRIS	3.3	IMOL; MI08	A2	3
20181125064539	2018-11-25	06:45:10.97	43.9957	11.9100	26.0	1.6	ML	77	82					A3	3
20181125233222										3	CAVE	2.3	RAVA; NDIM	B2	3
20181126230444	2018-11-26	23:04:21.10	44.6317	9.5083	8.2	3.2	ML	157	157					A3	3
20181201222626	2018-12-01	22:26:22.04	44.7090	11.5440	6.1	0.6	ML	10	12	4	MI10	2.0	A307; MI05	B1	2
20181203000655	2018-12-03	00:06:47.74	44.2515	11.0478	19.6	3.2	ML	54	58					A3	3
20181203001114	2018-12-03	00:11:05.65	44.2458	11.0447	15.4	2.5	ML	55	57					A3	3
20181203013344	2018-12-03	01:33:37.11	44.2462	11.0387	14.8	2.3	ML	55	57					A3	3
20181204000820	2018-12-04	00:07:55.59	44.1077	10.7835	63.7	2.4	ML	80	103					A3	3
20181209202800	2018-12-09	20:27:21.85	45.5125	9.9053	9.9	2.6	ML	159	160					A3	3
20181212195121	2018-12-12	19:51:15.00	44.3397	11.8975	20.6	2.4	ML	45	50					A3	3
20181218040207	2018-12-18	04:02:00.49	44.8357	10.7273	7.7	2.3	ML	65	65					A3	3
20181219193721	2018-12-19	19:36:59.67	44.3317	10.8778	25.8	2.2	ML	58	64					A3	3
20181221090418	2018-12-21	09:04:02.21	44.6752	10.8382	31.0	2.0	ML	52	60					A3	3
20181221090824	2018-12-21	09:08:15.88	44.6832	10.8642	31.3	2.6	ML	50	59					A3	3
20181221175110	2018-12-21	17:50:45.08	43.5742	12.3357	8.0	3.5	ML	135	135					A3	3
20181221204127										5	IMOL	5.1	BRIS; MI08	B2	3
20181222091608	2018-12-22	09:15:53.34	44.9647	11.9817	19.1	2.3	ML	54	58					A3	3
20181223075250	2018-12-23	07:52:29.95	45.7617	11.7030	10.6	2.6	ML	128	128					A3	3
20181225222934	2018-12-25	22:29:20.25	44.2818	11.6202	41.5	1.3	ML	40	57					A3	3
20181226145348	2018-12-26	14:53:39.50	44.2710	11.4407	25.3	1.8	ML	40	47	3	MTRZ	3.0	BRIS; IMOL	A2	3
20181229185648	2018-12-29	18:56:43.23	44.2695	11.4402	22.7	2.7	ML	40	46	3	MTRZ	4.0	BRIS; IMOL	A2	3
20190101183836	2019-01-01	18:37:46.96	41.8777	13.5488	16.5	4.2	ML	349	349					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20190101212910	2019-01-01	21:28:35.32	43.8732	12.0298	6.8	1.9	ML	94	94					A3	3
20190102070116										3	MI10	2.2	MI02; MI08	B0	0
20190104192938	2019-01-04	19:23:39.30	42.2000	19.8200	10.0	4.7	ML	725	725					A3	3
20190106234904	2019-01-06	23:48:37.73	44.1255	13.1588	26.3	2.3	ML	144	146					A3	3
20190107185723	2019-01-07	18:57:07.66	44.2637	11.0302	16.6	1.9	ML	54	57					A3	3
20190108010820	2019-01-08	01:08:18.25	44.8242	11.4438	0.5	0.6	ML	23	23	5	MI10	2.3	MI05; MI01	B1	3
20190111014813	2019-01-11	01:48:10.64	44.7517	11.7137	4.6	0.9	ML	23	23	5	MI10	2.3	MI02; MI01	B1	3
20190114230405	2019-01-14	23:03:57.02	44.3467	12.2857	20.6	4.6	ML	70	73					A3	3
20190114231810	2019-01-14	23:17:48.02	44.3580	12.2377	24.5	1.9	ML	66	71					A3	3
20190114232918	2019-01-14	23:29:07.99	44.3322	12.2932	22.0	3.0	ML	72	75					A3	3
20190115004554	2019-01-15	00:45:40.00	44.4750	12.2875	11.4	2.2	ML	65	66					A3	3
20190115013019										3	BRIS	4.6	MI10; MI08	B2	3
20190115034433	2019-01-15	03:44:13.90	44.3718	12.1487	20.5	2.0	ML	59	63					A3	3
20190115035753	2019-01-15	03:57:28.72	44.4052	12.0988	22.9	2.0	ML	54	59					A3	3
20190117071621	2019-01-17	07:15:56.84	44.4042	12.1393	21.0	2.2	ML	57	61					A3	3
20190119024205										7	A308A	6.6	BRIS; MI08	B2	3
20190119123718	2019-01-19	12:36:49.52	44.1292	12.2463	6.6	1.5	ML	82	82					A3	3
20190120211815	2019-01-20	21:17:50.53	44.4293	12.2318	9.5	1.7	ML	63	64					A3	3
20190120232429	2019-01-20	23:24:17.16	44.4228	12.1927	17.9	1.9	ML	60	63					A3	3
20190121184031	2019-01-21	18:40:26.98	44.8370	11.4625	7.3	1.5	ML	24	25	9	MI10	2.5	A307A; MI05	B1	3
20190122203053	2019-01-22	20:30:35.81	44.1652	10.6243	7.9	2.4	ML	86	86					A3	3
20190123201741	2019-01-23	20:17:31.07	44.3295	11.3765	32.5	1.8	ML	34	47	4	MI08	4.9	MI03; MI02	B1	3
20190125210209	2019-01-25	21:02:03.70	44.3350	11.8887	22.3	2.8	ML	45	50	16	IMOL	5.7	BRIS; A308A	A3	3
20190126091810										1	MI10	5.6		B0	0
20190126151918	2019-01-26	15:19:11.85	44.6672	11.9198	9.4	2.4	ML	35	36	13	A308A	3.3	CMPO; MI10	A2	3
20190201221820	2019-02-01	22:18:09.07	43.9970	11.6558	6.3	3.3	ML	71	71					A3	3
20190202164043										2	MTRZ	4.6	MI08	B2	3
20190204222519										4	A308A	5.7	BRIS; MI08	B2	3
20190205021935	2019-02-05	02:19:32.63	44.4952	10.0953	21.9	2.8	ML	112	114					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20190205114818	2019-02-05	11:47:51.69	44.4375	12.1860	31.0	2.2	ML	59	67					A3	3
20190206233341	2019-02-06	23:33:23.54	44.0060	11.6678	6.3	2.1	ML	70	70					A3	3
20190208040649	2019-02-08	04:06:43.34	44.2783	11.8767	24.6	2.2	ML	49	55					A3	3
20190215043932	2019-02-15	04:39:18.45	44.3062	10.6810	6.8	2.2	ML	73	74					A3	3
20190217145416	2019-02-17	14:35:55.00	-3.3500	152.2300	359.0	6.2	Mwp	14045	14049					A3	3
20190218182351	2019-02-18	18:23:40.89	44.7437	10.6502	28.0	2.4	ML	69	73					A3	3
20190301030640	2019-03-03	03:06:26.41	44.2262	11.2008	19.3	1.4	ML	50	53					A3	3
20190303034943	2019-03-03	03:49:33.13	44.4607	11.3243	43.3	1.5	ML	22	49	7	MI06	5.4	MI01; MI03	B1	3
20190307020720	2019-03-07	02:06:59.77	43.8088	11.9600	9.7	2.3	ML	98	99					A3	3
20190307024319	2019-03-07	02:43:07.98	44.1708	11.2378	10.8	1.6	ML	54	55					A3	3
20190308165504	2019-03-08	16:55:01.91	44.8417	11.3947	4.1	2.0	ML	25	25	9	A307A	2.8	MI05; MI10	B1	3
20190313142225	2019-03-13	14:22:18.68	44.9075	11.2398	9.4	2.5	ML	37	38	9	RAVA	5.1	SERM; CAVE	A2	3
20190316061027	2019-03-16	06:10:23.58	44.3745	11.6153	34.6	3.0	ML	29	45	16	IMOL	6.2	BRIS; MTRZ	A2	3
20190321214307	2019-03-21	21:42:47.17	44.4857	9.8368	7.7	3.0	ML	132	132					A3	3
20190322215920	2019-03-22	21:59:00.12	44.1115	12.0503	7.5	2.2	ML	72	72					A3	3
20190322220838	2019-03-22	22:08:12.75	44.1110	12.0475	7.2	2.0	ML	72	72					A3	3
20190322222205	2019-03-22	22:21:38.24	44.1293	12.0358	8.5	1.7	ML	70	71					A3	3
20190322222415	2019-03-22	22:23:57.49	44.1253	12.0253	9.4	2.1	ML	70	71					A3	3
20190322222635										7	FAEN	4.8	BRIS; IMOL	B2	3
20190322222646	2019-03-22	22:27:11.64	44.1111	12.0455	5.8	1.8	ML	72	72					A3	3
20190322222856	2019-03-22	22:28:38.02	44.1023	12.0492	4.9	2.3	ML	73	73					A3	3
20190322223108	2019-03-22	22:30:55.82	44.1152	12.0393	8.2	2.6	ML	71	72					A3	3
20190323120405	2019-03-23	12:03:37.32	44.0953	11.0207	9.9	1.8	ML	70	70					A3	3
20190402011130	2019-04-02	01:11:02.25	43.6025	12.3073	8.8	2.4	ML	131	131					A3	3
20190402061645	2019-04-02	06:16:38.00	44.9050	11.3330	8.4	1.6	ML	34	35	4	MI10	4.0	A307;MI01	B1	3
20190402231227	2019-04-02	23:11:41.85	45.9108	11.8633	7.1	2.1	ML	146	147					A3	3
20190403200132	2019-04-03	20:01:17.00	44.1763	11.4722	8.7	1.7	ML	50	50	7	MTRZ	3.4	BRIS; IMOL	A2	3
20190407212634	2019-04-07	21:26:22.95	44.4822	10.8725	19.7	2.0	ML	51	55					A3	3
20190410200222	2019-04-10	20:01:55.00	44.8200	10.5700	10.0	2.0	ML	76	77					A3	3

# Identificativo	Data	Tempo origine	Lat. (N)	Lon (E)	h[km]	Mag	T-Mag	D [km] da Minerbio	R [km] da Minerbio	NS P	Nome prima stazione	S-P	Nome prime 2 stazioni successive	Tipologia Evento	Classe Evento
20190419232510	2019-04-19	23:25:00.82	44.0798	11.3723	9.9	2.5	ML	61	62					A3	3
20190420171242	2019-04-20	17:12:35.00	44.8370	11.4290	16.1	1.1	ML	24	29	6	MI10	2.2	MI01;MI02	B1	3
20190421194139	2019-04-21	19:41:32.00	44.9610	11.3680	5.7	1.6	ML	39	39	8	MI10	4.1	MI05;MI01	B1	3
20190421232750	2019-04-21	23:27:13.00	43.7953	12.0993	10.4	2.0	ML	104	105					A3	3
20190422050700	2019-04-22	05:06:28.40	44.4137	9.8217	6.0	2.6	ML	134	135					A3	3
20190423213543	2019-04-23	21:35:14.67	44.6503	10.4202	18.7	2.2	ML	85	87					A3	3
20190426042448	2019-04-26	04:24:32.42	44.1597	12.3407	10.3	1.9	ML	85	86					A3	3
20190426054914	2019-04-26	05:49:25.00	44.0780	11.3752	7.7	2.3	ML	61	62					A3	3
20190429031107	2019-04-29	03:10:39.60	45.8782	11.4907	12.4	2.7	ML	140	140					A3	3
20190429054047	2019-04-29	05:40:42.00	44.8050	11.5450	22.9	1.3	ML	21	31	3	MI10	2.4	MI05;MI04	B1	3
20190501004035	2019-05-01	00:41:31.00	43.9828	11.8092	29.7	1.3	ML	76	81					A3	3
20190501213201	2019-05-01	21:31:33.75	45.8138	11.8092	29.7	1.3	ML	135	138					A3	3
20190504230157	2019-05-04	23:01:51.10	44.8692	11.2713	5.2	1.9	ML	32	33	8	RAVA	4.1	SERM; CAVE	A2	3
20190508191951	2019-05-08	19:19:35.75	44.3143	11.4450	34.4	1.8	ML	34	49	3	MTRZ	3.4	BRIS; MI08	A2	3
20190509031501	2019-05-09	03:14:50.00	45.9592	13.7812	12.3	3.3	ML	233	233					A3	3
20190509210559	2019-05-09	21:05:22.41	43.8125	11.9628	8.3	1.8	ML	98	98					A3	3
20190510023551	2019-05-10	02:35:44.00	44.8200	11.1250	4.5	1.4	ML	36	37	5	MI10	2.8	MI01;MI04	B1	3
20190510040018	2019-05-10	04:00:13.00	44.7650	11.3900	5.0	0.9	ML	18	18	3	MI10	1.8	MI01;MI02	B1	2
20190511043401	2019-05-11	04:33:37.80	44.3130	10.9545	32.8	2.1	ML	55	64					A3	3
20190514023642	2019-05-14	02:36:16.80	43.4100	11.3107	6.7	2.6	ML	136	136					A3	3
20190515001959	2019-05-15	00:19:33.19	43.4162	11.3008	7.5	2.6	ML	135	135					A3	3
20190516135329	2019-05-16	13:53:23.26	44.2712	11.0420	9.5	2.8	ML	53	54					A3	3
20190521081444	2019-05-21	08:13:33.25	41.2992	16.3003	29.9	3.7	Mw	539	540					A3	3
20190522143755	2019-05-22	14:37:36.03	44.8467	9.9272	23.0	3.5	ML	126	128					A3	3
20190525103820	2019-05-25	10:38:20.30	44.5293	10.1343	23.2	3.4	ML	108	110					A3	3
20190528023520	2019-05-28	02:35:11.64	44.2267	11.0752	14.4	2.0	ML	55	57					A3	3

Tabella 10. Elenco degli eventi localizzati. Sono riportati di seguito, come indicato anche in Tab. 9: codice identificativo del trigger; Data, Tempo origine dell'evento; latitudine, longitudine e profondità dell'evento; Mag, T-Mag: valore e tipo di magnitudo; distanze epicentrale e ipocentrale da Minerbio (punto C di Fig.5); NSP: numero di coppie di fasi dirette P ed S osservate alle stazioni della rete integrata; nomi delle stazioni della rete. I parametri di localizzazione e magnitudo (colonne 2-7) vengono stimati riportando i dati contenuti nel catalogo della RSN (campi indicati in colore) o rilocalizzando gli eventi mediante SacPicker (campi indicati in nero).

1.10 Dati dal monitoraggio delle pressioni di poro

Il Concessionario ha regolarmente fornito, sin dalle fasi iniziali del progetto, le misure relative al monitoraggio delle pressioni di poro. In particolare sono state fornite le misure con sensori permanenti (DPTT) e con sensori temporanei (memory-gauges).

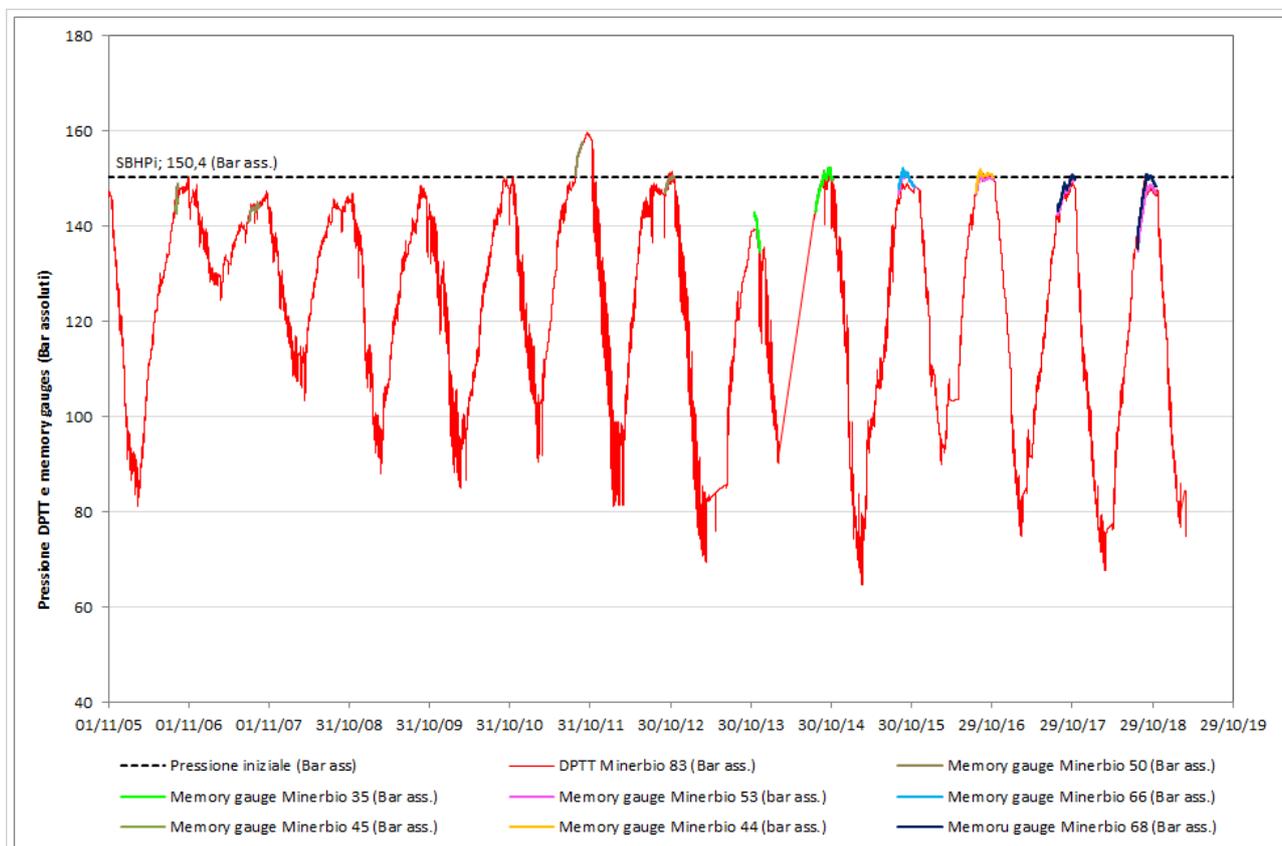


Figura 26. Valori di pressione per sensori DPTT e memory-gauges dal novembre 2005.

Nella Fig. 26 (fonte SNAM Stogit, Aprile 2019), a titolo di esempio, sono riportati i valori di pressione (in Bar assoluti) dei sensori DPTT e dei memory-gauges a partire dal novembre 2005. La linea tratteggiata indica il valore di pressione iniziale.

Sono stati inoltre resi disponibili i volumi dei gas movimentati, attualmente con i valori giornalieri dei volumi iniettati/erogati (la serie storica risale al 1 febbraio 1959, con campionamento mensile; dal 1 novembre 2001 con valori cumulati giornalieri).

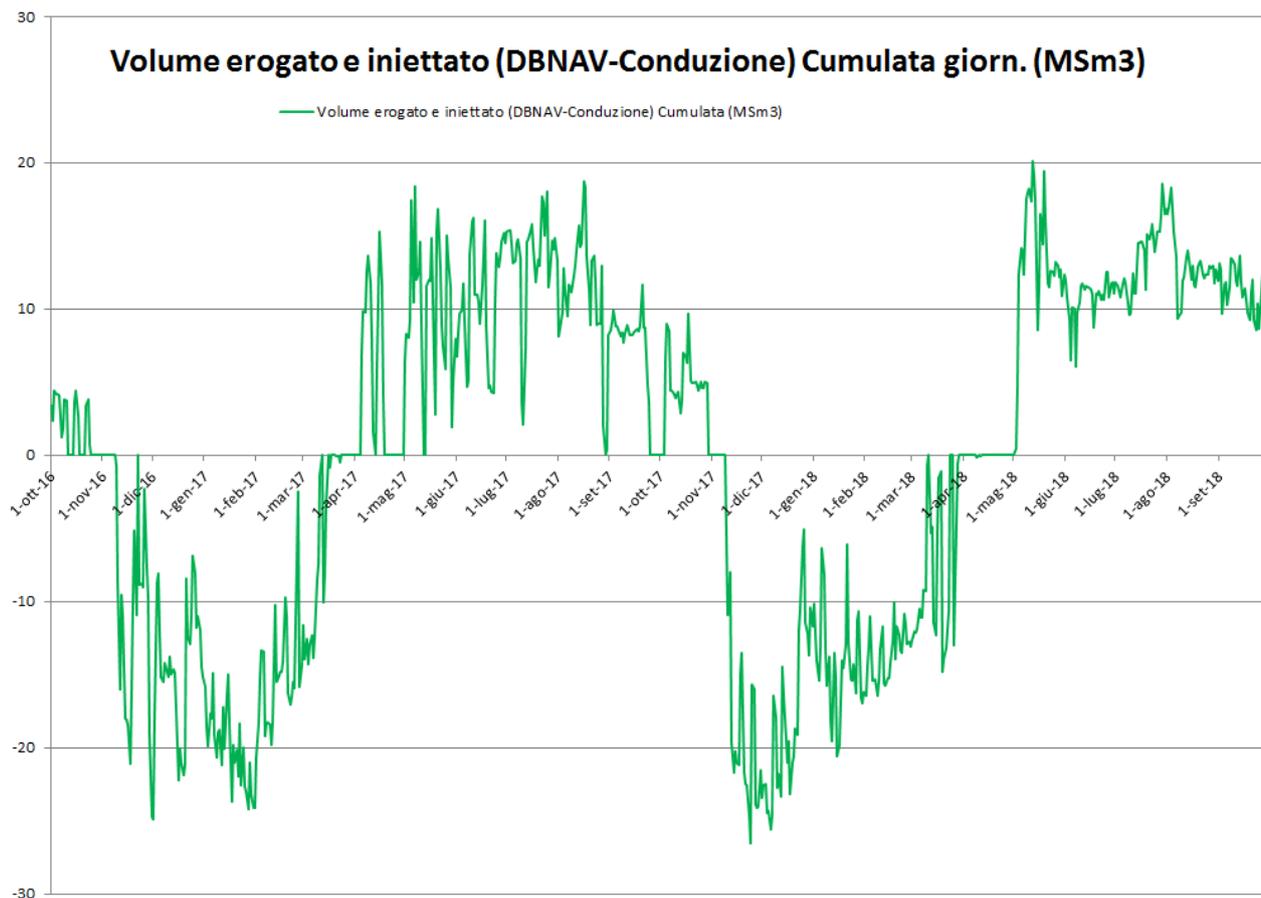


Figura 27. Volume erogato e iniettato per il periodo ottobre 2016 – settembre 2018.

Nella Fig. 27 (elaborazione da dati SNAM Stogit, Aprile 2019) sono riportati, a titolo di esempio, i volumi giornalieri erogati e iniettati (espressi in MSm^3) nel periodo ottobre 2016 – settembre 2018. I valori relativi alle pressioni di poro e ai dati di produzione possono rappresentare un valido contributo, ad esempio, per verificare gli andamenti stagionali dei parametri della deformazione del suolo da dati GPS e SAR, che risultano quindi connessi al ciclo annuale di stoccaggio. Tale ciclo consiste in una fase di iniezione di gas nel sottosuolo (in genere durante il periodo aprile-ottobre) e una fase di erogazione (nel periodo novembre-marzo).

Non essendo stata rilevata nel corso della Convenzione con il Comune di Minerbio sismicità di particolare rilievo nei DI e DE non è stato necessario effettuare correlazioni con tale parametro relativamente a dati di sismicità. I dati del monitoraggio della pressione di poro sono stati invece considerati per quanto riguarda le analisi delle deformazioni del suolo da dati GPS e InSAR.

1.11 Considerazioni relative a possibili modifiche nelle indicazioni contenute in ILG

Parte sismologica

Il protocollo sottoscritto da MiSE, RER e Concessionario (RER, 2016a) si propone di:

- 1) applicare in via sperimentale gli ILG alla concessione “Minerbio stoccaggio”, quale caso pilota, al fine della loro prova in campo, regolando l’adeguamento e l’eventuale potenziamento della rete di monitoraggio esistente e disciplinando la conduzione dei monitoraggi;
- 2) condurre per almeno un anno il monitoraggio con la rete rispondente ai criteri indicati nelle linee guida allo scopo di definire le caratteristiche sismo-tettoniche dell’area;
- 3) fornire gli elementi necessari per un eventuale aggiornamento degli ILG in base all’esperienza acquisita, così come previsto dagli ILG stessi (RER, 2016b).

Tutte queste indicazioni sono state rispettate e, in stretta collaborazione con il Concessionario, informando delle attività in corso e programmate in occasione di ogni incontro i costituenti del Comitato, si è provveduto a effettuare:

- la verifica delle reti di monitoraggio esistenti;
- la programmazione dell’implementazione e il potenziamento progressivo delle reti di monitoraggio sulla base dei risultati sperimentali acquisiti;
- la trasmissione diretta dei dati rilevati dalla rete di monitoraggio;
- l’elaborazione ed interpretazione dei dati acquisiti durante il monitoraggio e l’utilizzo dei dati di produzione e stoccaggio, geologici e di sottosuolo forniti dal Concessionario, unitamente ai risultati dei monitoraggi fin qui condotti dal Concessionario stesso.

Per quanto riguarda la parte del monitoraggio sismico, alcune delle indicazioni contenute in ILG tendono a considerare queste reti con prevalente indirizzo per successive applicazioni legate allo sviluppo tecnologico e alla ricerca scientifica piuttosto che per consolidati scopi di monitoraggio.

In particolare, non sembra necessario attrezzare tutti i siti con sensori *broad band* e accelerometrici. Tra l’altro, in questi contesti, siamo generalmente interessati a rilevare eventi sismici di bassa magnitudo, caratterizzati da un contenuto in alta (e non in bassa) frequenza. Inoltre, la detezione automatica dei segnali viene ad esempio effettuata a partire da 1 o 2 Hz e, generalmente, se si è in possesso di una registrazione con contenuto spettrale in bassa frequenza, si opera un filtraggio passa alto prima di procedere alla lettura delle varie fasi nel *picking* dei segnali.

Negli esempi di Fig. 28a, 28b e 28c si nota come il segnale a bassa frequenza caratterizzi le finestre d’analisi. Le registrazioni sul sensore a 1 Hz permettono anch’esse senza difficoltà la lettura delle fasi P e S anche per un evento di magnitudo molto bassa (in questo caso evento con M inferiore a 1.0).

Pur se allo stato attuale non sono più rilevanti le differenze nei costi della strumentazione (fino a pochi anni fa un sensore *very broad band* aveva costi proibitivi per molti osservatori sismologici), i sensori *broad band* sono in generale più sensibili a derive termiche e barometriche. Sono quindi ancora adesso necessarie procedure di installazione più laboriose e onerose, per ottenere pieno vantaggio dall’utilizzo di un sensore di tale tipo.

Un solo sensore *broad band*, installato tra l’altro nel sito con minor *noise* sismico, piuttosto che dove è posizionato il sensore GPS, potrebbe essere assolutamente sufficiente.

Può risultare utile, come suggerito in ILG, effettuare il campionamento dei segnali velocimetrici a 200 Hz, per migliorare ad esempio la risoluzione su impulsi di limitata durata temporale (e quindi

con elevato contenuto energetico in alta frequenza oltre i 40 Hz) se questi si verificano a breve distanza (ad es. ordine di centinaia di metri) dal rilevatore.

Pur comprendendo che un approccio cautelativo potrebbe suggerire di installare sensori accelerometrici in ogni postazione (per evitare fenomeni di saturazione per eventi anche di moderata magnitudo se a distanza chilometrica), considerando le relativamente basse distanze tra le varie stazioni, sembrerebbe sufficiente poter disporre di un unico accelerometro, specie se posizionato nel DI.

Ogni sito ha caratteristiche peculiari, e risulta senza dubbio difficile compiere una generalizzazione valida per tutte le condizioni. Le stazioni posizionate in pianura padana soffrono infatti di una delle condizioni più svantaggiose in campo sismico: un elevatissimo valore del disturbo antropico, dovuto alle varie attività industriali e civili e alla propagazione di tale disturbo nel deposito alluvionale tipico dell'area. Come noto un vantaggio può essere ottenuto posizionando le stazioni non direttamente in superficie ma in pozzo (a profondità dell'ordine dei 100-200m), anche se con costi più rilevanti sia per l'installazione che per la manutenzione.

Il Concessionario ha provveduto a implementare la rete sismica esistente posizionando 4 nuove stazioni, di cui 3 installate in pozzo a -150m di profondità, in questo caso si è ottenuto un netto miglioramento per quanto riguarda il rapporto segnale/disturbo.

Il numero e il posizionamento delle stazioni sismiche del Concessionario consentono infatti, sulla base delle simulazioni effettuate e delle registrazioni ottenute nel corso del progetto, di raggiungere pienamente gli obiettivi prefissati.

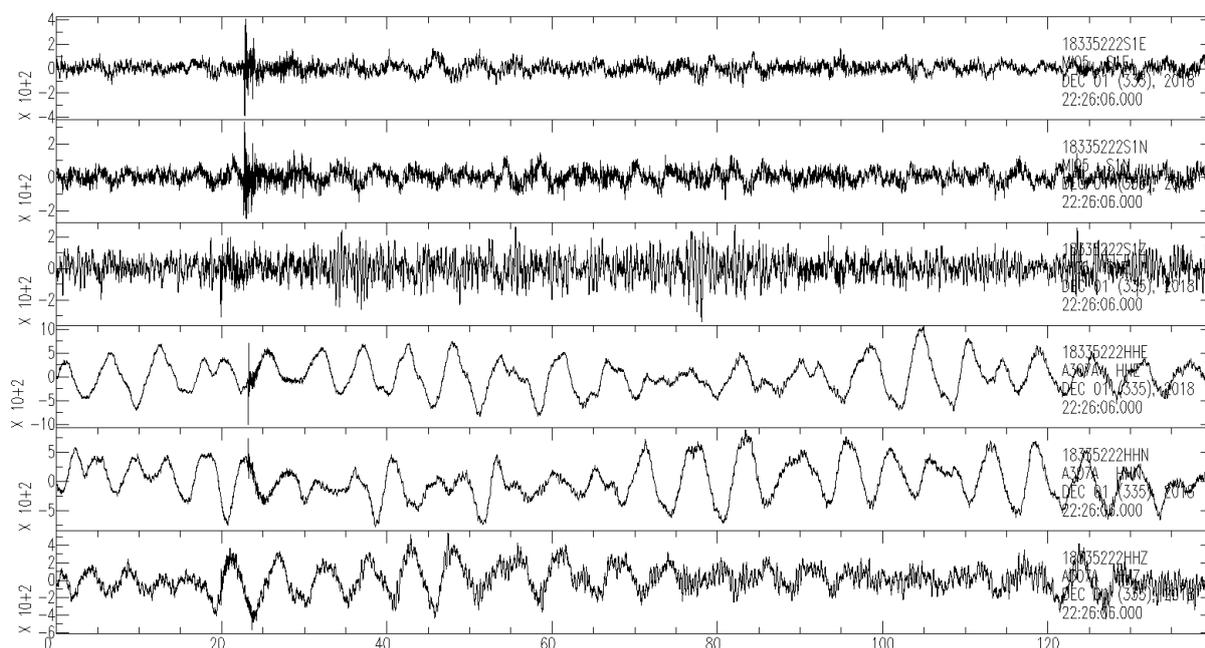


Figura 28a. Esempio di evento su sensore 1 Hz (stazione MI05, primi 3 pannelli in alto) e broad band (stazione A307A). Finestra di circa 2 minuti.

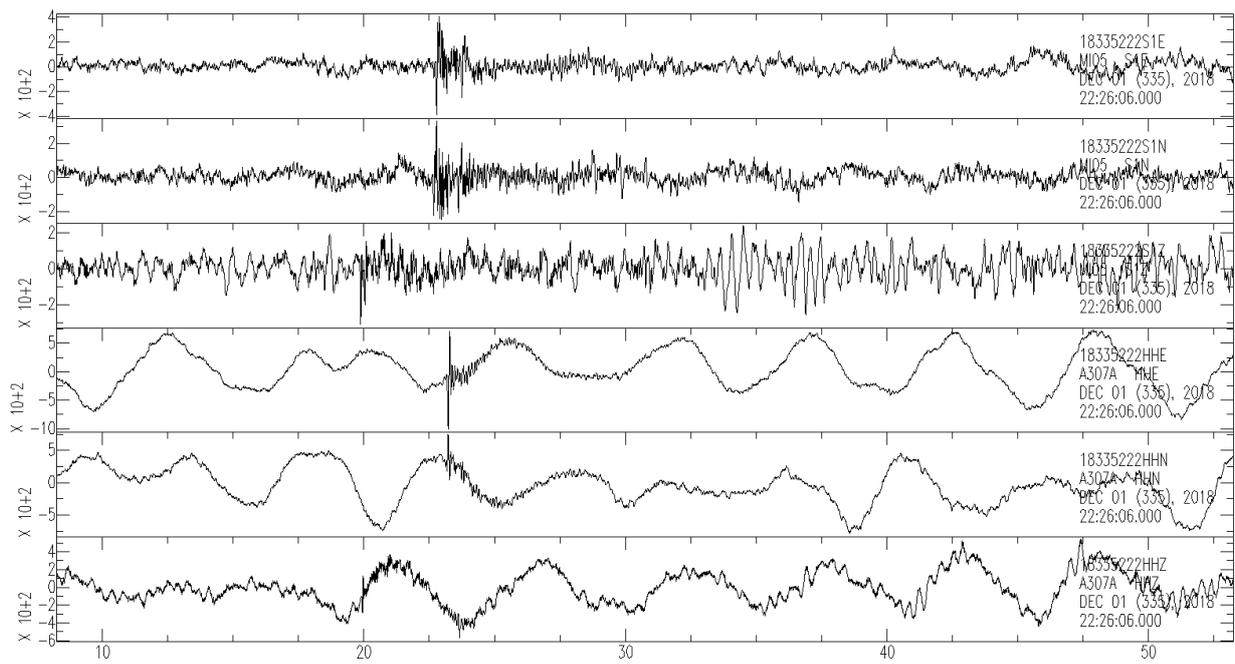


Figura 28b. Zoom della figura precedente. Finestra di circa 45 secondi.

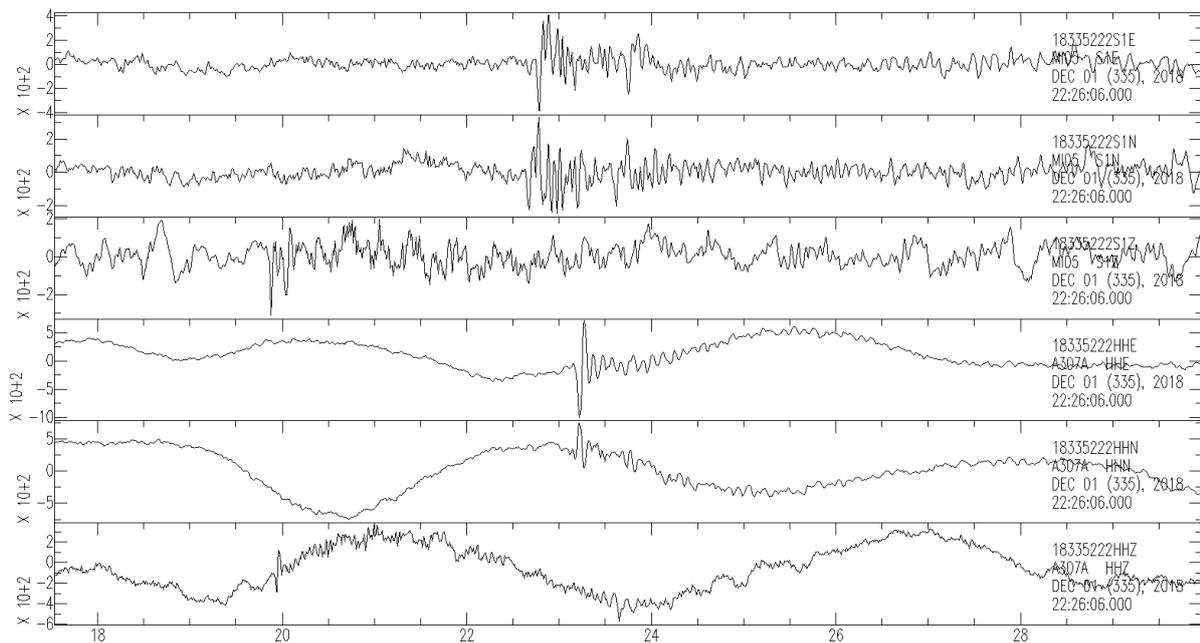


Figura 28c. Ulteriore zoom della figura precedente. Finestra di circa 12 secondi.