

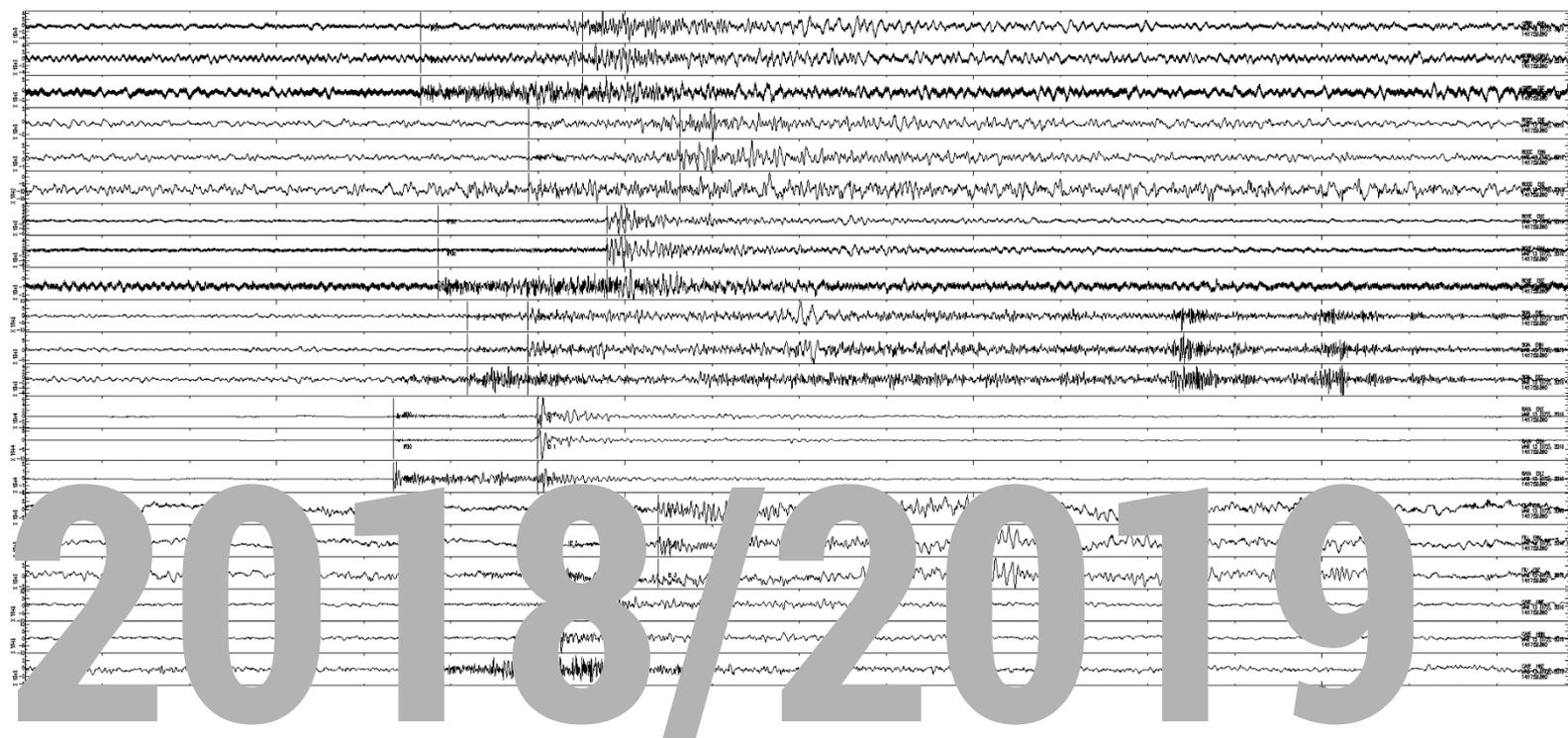
Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

Sperimentazione degli ILG nella concessione di “Mirandola”: Relazione finale

Responsabile di Progetto: L. Zaccarelli

Autori: L. Zaccarelli, M. Anselmi, M. Vassallo, E. Venturini, I. Munafò, L. Faenza, L. Sandri, B. Lolli, A. Garcia, M. Polcari, G. Pezzo, E. Serpelloni, L. Anderlini, M. Errico, G. Zerbinato, A. Morelli.

Redazione: M. Errico



1.	LA SPERIMENTAZIONE DEGLI ILG NELLA CONCESSIONE DI "MIRANDOLA"	5
2.	ASSETTO GEOLOGICO E TETTONICO DELL'AREA	7
2.1	GIACIMENTO DI CAVONE	8
3.	MONITORAGGIO SISMICO	10
3.1	STORIA E CARATTERISTICHE DELLA RETE SISMOLOGICA	10
3.2	VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLA RETE E RISPOSTA AGLI ILG	15
3.2.1	Analisi del rumore sismico ambientale	15
3.2.2	Stima delle soglie di detezione alla rete di Cavone	19
3.3	ANALISI DELLA SISMICITÀ REGISTRATA PRIMA DELLA SPERIMENTAZIONE (1982-2017/2018)	21
3.3.1	Magnitudo momento M_w	26
3.3.2	PGA, PGV e scuotimento del suolo	27
3.4	ANALISI DELLA SISMICITÀ REGISTRATA NEL PERIODO DI SPERIMENTAZIONE: 2018-2019	29
3.4.1	Prestazioni effettive della rete	33
4.	MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DEL SUOLO DA STAZIONI GPS IN CONTINUO	35
4.1	LA STAZIONE GPS DI CAVONE	35
4.1.1	Analisi della qualità dei dati	38
4.1.2	Elaborazione dei dati	39
4.2	RISULTATI: SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO	41
4.3	DISCUSSIONE	42
5.	ANALISI INSAR	43
5.1	DATASET	43
5.2	RISULTATI	44
5.3	CONFRONTO CON LE ELABORAZIONI FORNITE DAL CONCESSIONARIO	46
6.	ANALISI PRESSIONI DI PORO/DATI DI PRODUZIONI	48
7.	INFRASTRUTTURA INFORMATICA PER IL MONITORAGGIO	51
8.	SITO <i>WEB</i> DEDICATO	53
8.1	DESCRIZIONE TECNICA	53
8.2	SCELTE DI ORGANIZZAZIONE DELLE PAGINE	53
9.	CONCLUSIONI	58
	APPENDICE	60
	SIMULAZIONE DI RETE SISMICA PER MIGLIORARE LA SOGLIA DI DETEZIONE	60
	BIBLIOGRAFIA	62
	ELENCO DELLE FIGURE	66
	ELENCO DELLE TABELLE	69
	ELENCO DELLE FIGURE APPENDICE	69

Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

Relazione Finale

Lucia Zaccarelli⁽¹⁾, Mario Anselmi⁽²⁾, Maurizio Vassallo⁽³⁾, Elisa Venturini^(1,4), Irene Munafò⁽³⁾, Licia Faenza⁽²⁾, Laura Sandri⁽¹⁾, Barbara Lolli⁽¹⁾, Alexander Garcia⁽¹⁾, Marco Polcari⁽²⁾, Giuseppe Pezzo⁽²⁾, Enrico Serpelloni⁽²⁾, Letizia Anderlini⁽¹⁾, Maddalena Errico⁽¹⁾, Giampaolo Zerbinato⁽¹⁾, Andrea Morelli⁽¹⁾.

¹ INGV, Sezione di Bologna, Bologna; ² INGV, Sezione ONT, Roma; ³ INGV, Sezione di Roma 1, Roma; ⁴ InOGS.

Bologna, 28/06/2021

1. La sperimentazione degli ILG nella concessione di “Mirandola”

A seguito degli eventi sismici del maggio 2012 verificatisi in Emilia-Romagna, il Presidente della Giunta regionale ha autorizzato il Capo del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri a costituire una commissione tecnico-scientifica (successivamente identificata con l'acronimo ICHESE) per lo studio delle possibili relazioni tra le attività di esplorazione finalizzate alla ricerca e allo sfruttamento di campi di idrocarburi e l'aumento di attività sismica nell'area interessata da dette attività.

Nel suo rapporto (ICHESE, 2014), la Commissione ha escluso qualsiasi relazione tra l'aumento dell'attività sismica nell'area emiliano-romagnola colpita dalla sequenza del 2012 e varie attività di produzione e stoccaggio di idrocarburi e di sfruttamento di risorse geotermiche della zona, mentre ha evidenziato che non è esclusa, ma neanche provata, la possibilità che le attività di estrazione e re-iniezione al tempo in essere presso il campo di Cavone, all'interno della concessione “Mirandola”, abbiano contribuito ad “innescare” l'attività sismica del 2012 in Emilia ed ha formulato raccomandazioni per una gestione ottimale delle attività di sfruttamento del sottosuolo.

Il Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE), tramite la Direzione generale per le risorse minerarie ed energetiche, a seguito dei risultati della Commissione ICHESE, ha attivato nell'ambito della CIRM (Commissione per gli Idrocarburi e le Risorse Minerarie), con Decreto del 27 febbraio 2014, un gruppo di lavoro costituito da specialisti nel settore della geologia, della sismologia e della prevenzione del rischio, provenienti dal Dipartimento della Protezione Civile e da istituti di ricerca (CNR, OGS, INGV, UNIVERSITÀ) al fine di definire gli “Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e della pressione di poro nell'ambito delle attività antropiche” (Dialuce et al., 2014; d'ora in avanti “ILG”) come da raccomandazioni della commissione ICHESE.

In data 17 aprile 2014 è stato stipulato l'accordo di collaborazione relativo all'attività di monitoraggio e studio nella concessione Mirandola “Laboratorio Cavone”, a firma del Presidente della Regione Emilia-Romagna, del Ministro dello Sviluppo Economico e dell'Amministratore Unico di Società Padana Energia S.p.A.; in base a tale accordo la Regione Emilia-Romagna, il MiSE e la Società Padana Energia si sono impegnati a sottoporre il sito Cavone, per novanta giorni, ad un'attività di monitoraggio e ricerca da svolgersi in coerenza con le raccomandazioni del rapporto ICHESE (ICHESE, 2014), al fine di fornire una risposta esaustiva alle questioni lasciate aperte dallo

stesso rapporto ICHESE. I monitoraggi della attività di estrazione e re-iniezione nei pozzi del campo di Cavone sono stati condotti con la supervisione di tecnici dell'Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (UNMIG) di Bologna e del servizio geologico, sismico e dei suoli della Regione Emilia-Romagna. I risultati dei monitoraggi sono stati e vengono tuttora pubblicati su un sito internet dedicato (www.labcavone.it, d'ora in avanti "LabCavone").

In base a prove di campo e ad una modellazione combinata fluidodinamica e geomeccanica, il Laboratorio Cavone ha mostrato come le attività industriali di estrazione e iniezione in atto al campo di Cavone non potessero generare variazioni di pressione atte ad innescare i terremoti del 20 e 29 maggio 2012 (Juanes et al. 2016, LabCavone). La Regione Emilia-Romagna, ritenendo necessario provvedere al recepimento degli ILG scaturiti dal Gruppo di Lavoro istituito dal MiSE il 27 febbraio 2014 nell'ambito della CIRM, che forniscono una risposta adeguata e tecnicamente avanzata alle Raccomandazioni della Commissione ICHESE, nella Deliberazione della Giunta Regionale n. 903, ha deciso di procedere ad una prima applicazione in forma sperimentale su 3 casi pilota (Sezione 3 degli ILG), individuati nei seguenti siti della Regione Emilia-Romagna:

- concessione di coltivazione idrocarburi "Mirandola" (Campo di Cavone);
- concessione di stoccaggio gas "Minerbio";
- concessione di coltivazione di risorse geotermiche "Casaglia".

Il 16 novembre 2016 viene approvato (a firma Ministero dello Sviluppo Economico, Regione Emilia-Romagna, Società Padana Energia, Assomineraria) il Protocollo Operativo per l'applicazione in via sperimentale degli ILG alla concessione di coltivazione di idrocarburi "Mirandola" che assegna il compito di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM) all'INGV.

I citati ILG riportano che: *"Per meglio garantire l'indipendenza del soggetto preposto al monitoraggio rispetto al titolare della concessione di coltivazione e stoccaggio, si suggerisce di prevedere, se del caso anche attraverso un opportuno strumento normativo, l'istituzione presso il MiSE di un apposito fondo, alimentato dai Concessionari, con cui il MiSE stesso potrà curare direttamente l'affidamento dei monitoraggi mediante procedure pubbliche."*

In considerazione della momentanea impossibilità normativa ad istituire tale fondo, il MiSE, con nota del 13/03/2018, accertata la disponibilità del Comune di San Possidonio a costituire ente di riferimento per gli aspetti amministrativi necessari alla prosecuzione della sperimentazione degli ILG, ha richiesto alle parti firmatarie del citato Protocollo Operativo del 16/11/2016, nelle more dell'istituzione del fondo

presso il Ministero Sviluppo Economico, di approvare formalmente l'istituzione di un fondo Comunale come integrazione al Protocollo Operativo.

Il 21/01/2019 il Comune di San Possidonio e l'INGV firmano la Convenzione per l'attuazione del monitoraggio nella concessione di coltivazione idrocarburi "Mirandola" finalizzata alla messa in opera della sperimentazione degli indirizzi e linee guida per i monitoraggi ed assunzione delle funzioni di Struttura Preposta al Monitoraggio, dando così formalmente inizio alla sperimentazione.

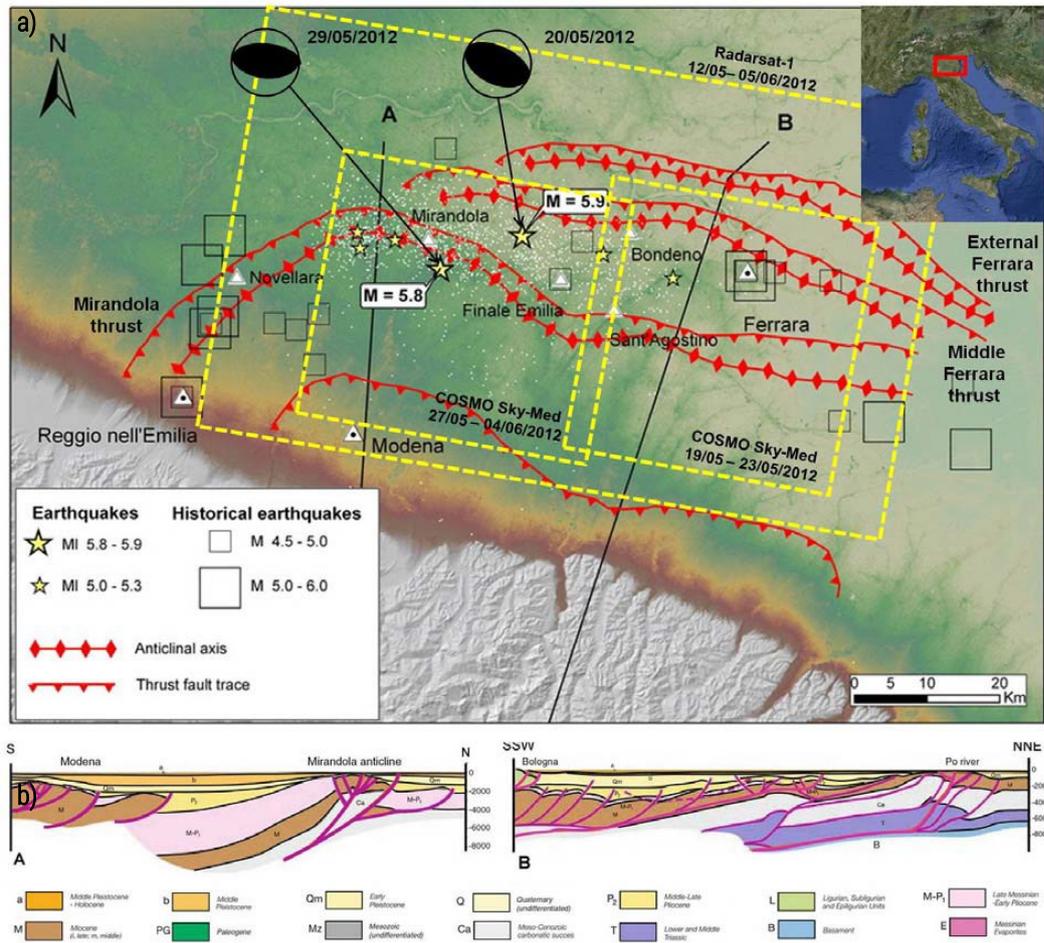
2. Assetto geologico e tettonico dell'area

La catena appenninica si è sviluppata durante il movimento di arretramento della subduzione vergente a Ovest a partire dall'oligocene fino ad oggi. L'arretramento radiale della subduzione, orientato rispettivamente a Nord-Est, Est, Sud-Est e Sud, ha permesso la progressiva migrazione verso Est dei fronti dei sovrascorrimenti, dei bacini di avanfossa e della tettonica estensionale di retroarco (Malinverno and Ryan, 1986; Royden et al., 1987; Doglioni et al., 1999). Il raccorciamento al fronte della catena e l'estensione di retroarco nella parte interna sono processi tuttora attivi che agiscono contemporaneamente; entrambi i processi migrano verso Est nel tempo. In particolare nell'Appennino settentrionale, il sistema a pieghe e sovrascorrimenti, seppellito completamente sotto una spessa copertura sedimentaria rappresentata dai sedimenti quaternari della pianura Padana, è costituito da sovrascorrimenti ciechi e pieghe relative ad essi, che coinvolgono la principale successione sedimentaria costituita da evaporiti triassiche, carbonati mesozoici e basso-terziari e successioni clastiche oligo-mioceniche (Carminati et al., 2010; Fantoni and Franciosi, 2010). Le unità mesozoiche giacciono sui depositi clastici permo-triassici e sul basamento cristallino paleozoico. Le unità mioceniche sono coperte invece da depositi terrigeni plio-pleistocenici di natura sin-tettonica, principalmente caratterizzati da torbiditi e sabbie marine. Lo spessore di tali depositi varia dai 7000–8000 m nella parte delle sinclinali più profonde ai circa 150 m nelle parti al di sopra delle anticlinali legate ai sovrascorrimenti (Figura 2.1).

Dal punto di vista strutturale, l'arco di Ferrara-Romagna, il più a Est, può essere suddiviso in tre archi di secondo ordine: l'arco di Ferrara, l'arco di Romagna e quello delle Pieghe Adriatiche. L'anticlinale di Mirandola, relativa al fronte dell'arco di Ferrara, si localizza nella parte interna rispetto all'omonimo fronte. Il raccorciamento attivo lungo questa struttura è documentato dalla sedimentazione sin-tettonica (Burrato et al., 2003; Scrocca et al., 2007), sebbene vi fosse assenza di sismicità storica e strumentale fino alla sequenza del 2012 (Govoni et al., 2014; Malagnini et

al., 2012; Pezzo et al., 2018). La sismicità della sequenza del 2012 si localizza sulle strutture dell'arco Ferrarese (evento di $M_W=6.0$ del 20 maggio) e dell'Anticlinale di Mirandola (evento $M_W=5.8$ del 29 maggio).

Figura 2.1. (a) Mappa strutturale semplificata della zona emiliana, raffigurante le principali linee di sovrascorrimento dell'Appennino settentrionale (da Pezzo et al., 2013). Le stelle indicano gli epicentri degli eventi più energetici della sequenza del 2012, mentre i terremoti storici vengono segnati coi quadrati. (b) Sezioni geo-logiche tracciate lungo le linee nere A e B della Figura 2.1a (tratta da Boccaletti et al., 2010).

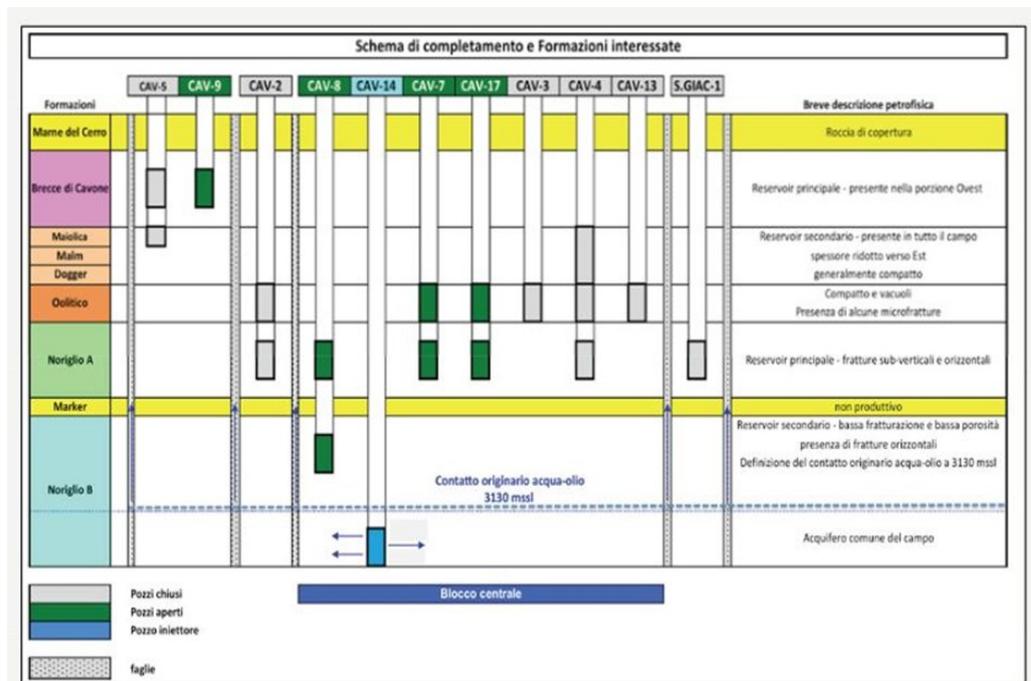


2.1 Giacimento di Cavone

Il giacimento ad olio di Cavone è posto all'interno dell'anticlinale di Mirandola, appartenente alla parte più interna dell'Arco Ferrarese. Esso ricade nella concessione "Mirandola" di titolarità di Società Padana Energia S.r.l. (inizialmente di titolarità Eni S.p.A., nel 2010 acquisita dal gruppo Gas Plus S.p.A.) ed avente un'estensione di circa 60.86 km², ubicata prevalentemente in Emilia-Romagna in provincia di Modena, e in parte in Lombardia, in provincia di Mantova. L'area vera e propria del giacimento mineralizzato ha un'estensione di circa 15 km², con le rocce serbatoio costituite dalle formazioni dei calcari grigi di Noriglio, calcare oolitico e brecce di Cavone, mentre le rocce di copertura sono costituite dalle marne del Cerro. Il giacimento si trova ad una profondità di circa 2900 m. La trappola è costituita da un'anticlinale allungata in direzione Est-Ovest e fagliata sia longitudinalmente che trasversalmente. Il fluido

estratto dal giacimento è composto da olio, gas metano ed acqua di strato (ossia acqua "fossile" caratterizzata da un elevato contenuto di sali). La scoperta del campo, legata all'esplorazione del fronte più avanzato dei sovrascorrimenti della dorsale Ferrarese, è avvenuta nel 1973 dopo l'esito minerario positivo del primo pozzo perforato *Cavone1*. Degli 11 pozzi del campo (Figura 2.2), uno è sterile, 4 producono spontaneamente e gli altri tramite pompe a cavalletto. I pozzi *Cavone5* e *Cavone14*, vista la loro scarsa produttività, sono stati adibiti alla re-iniezione delle acque di produzione, sebbene al momento solo il pozzo *Cavone14* sia effettivamente utilizzato a questo scopo. Ai pozzi dell'alto della struttura di Cavone si aggiunge il pozzo *SanGiacomo*, perforato in corrispondenza della struttura adiacente a Est.

Figura 2.2. Schema (non in scala) del completamento dei pozzi del giacimento di Cavone, con le profondità di ciascun pozzo e le formazioni geologiche interessate (dalla documentazione tecnica nel sito di LabCavone).



Il giacimento è entrato in produzione nella stagione 1979/1980 con il pozzo *Cavone2*, registrando una produzione giornaliera di circa 400 m³ fino al 1986. Al momento il giacimento produce da cinque pozzi (oltre al 2, il 7, 8, 9, 17, in verde nella Figura 2.2). Il giacimento principale è situato nei calcari di Noriglio-A, dal quale quasi tutti i pozzi attingono. Uniche eccezioni sono il pozzo *Cavone8*, che si spinge in profondità nella formazione di Noriglio-B, e il pozzo *Cavone9* che invece estrae dalle breccie di Cavone, più superficiali e presenti solo nella parte occidentale. Il pozzo di re-iniezione *Cavone14* re-inietta le acque di produzione a profondità maggiori, alla base della formazione di Noriglio-B, al di sotto del contatto acqua-olio di 3130 metri sotto al livello del mare.

3. Monitoraggio sismico

Gli ILG definiscono due domini di rilevazione su cui concentrare il monitoraggio: un Dominio Interno (DI) nel quale *“si ritiene possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all’attività svolta”* e un Dominio Esteso (DE) *“circostante il Dominio Interno di rilevazione che comprende una porzione maggiore di crosta terrestre, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati”*. Nel caso di attività di estrazione di olio da giacimento con re-iniezione di acqua all’interno del giacimento stesso (il caso di Cavone), DI e DE vengono definiti rispettivamente come: *“il volume che si estende fino alla superficie comprendendo la zona mineralizzata (giacimento), come ricostruita dallo studio geologico preliminare, e un’ulteriore fascia che si estende ai lati e sotto fino ad una distanza di 5 km dal bordo del giacimento stesso”* e il volume che si estende *“oltre il Dominio Interno di rilevazione per una fascia di ampiezza compresa tra 5-10 km”*. Nel seguito mostriamo i risultati delle analisi del monitoraggio facendo riferimento a questi due domini di interesse.

3.1 Storia e caratteristiche della rete sismologica

La prima rete sismologica fu installata nel dicembre 1982, in un raggio di circa 5 km intorno al giacimento di Cavone ed era costituita da 10 stazioni a una componente (verticale), con registrazione di tipo digitale ed in modalità continua. Nel giugno del 1986 le 10 stazioni sono state sostituite con 2 stazioni a 3 componenti per mantenere il controllo dell’area, anche se le 2 stazioni da sole non garantivano la possibilità di individuare e localizzare sismicità (per localizzare un evento sono necessarie almeno 4 stazioni). La registrazione di tali segnali veniva trasmessa via radio ad un centro di raccolta dati e veniva gestita insieme alla rete di “Minerbio” (concessione per stoccaggio gas al tempo gestita da Eni, come “Mirandola”). La configurazione a 2 stazioni è rimasta attiva fino all’ottobre 1990, con gestione da parte di società esterne che si occupavano anche dell’elaborazione dei dati registrati. Nell’aprile del 1987 si verificarono due sciami sismici, uno ad Est ed uno a Ovest del giacimento di Cavone, in corrispondenza della dorsale ferrarese, ma nessuno di questi terremoti è stato localizzato sulla verticale del giacimento stesso (con la precisione di localizzazione possibile all’epoca). Le sigle e le coordinate di ogni stazione sono riportate nella Tabella 3.1, (quote riferite a livello mare, riferimento cartografico ED50), il posizionamento della rete a 10 stazioni è visibile nella Figura 3.1, quella della rete a 2 stazioni in Figura 3.2.

Tabella 3.1. Coordinate delle 10 stazioni operanti tra il 1982 e il 1986 (CA01-CA10) e delle 2 stazioni operanti dal 1986 al 1990 (GIA e ROV).

PERIODO	STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m)
1982-1986	CA01	44.89420	11.09420	18
1982-1986	CA02	44.94170	11.01720	15
1982-1986	CA03	44.94750	10.91500	19
1982-1986	CA04	44.90920	10.81180	19
1982-1986	CA05	44.83300	10.83640	22
1982-1986	CA06	44.87620	10.93080	19
1982-1986	CA07	44.86830	11.02630	18
1982-1986	CA08	44.82620	11.07920	21
1982-1986	CA09	44.77120	10.94220	25
1982-1986	CA10	44.83800	10.97450	24
1986-1990	GIA	44.86030	11.03780	20
1986-1990	ROV	44.84970	10.95470	22

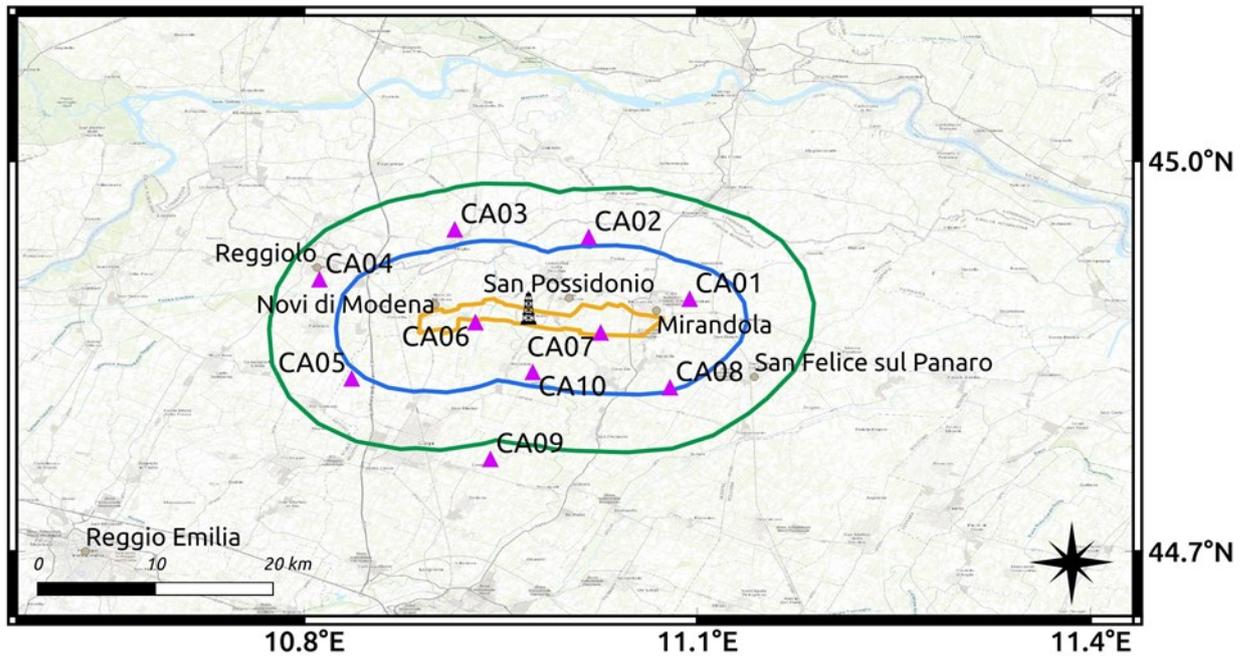


Figura 3.1. Mappa della proiezione in superficie del giacimento (contorno giallo) con le stazioni sismiche operanti dal giugno 1982 al giugno 1986 (triangoli viola). I contorni blu e verde indicano l'estensione dei domini di rilevazione come definiti negli ILG. Il simbolo del pozzo mostra la posizione di *Cavone14*.

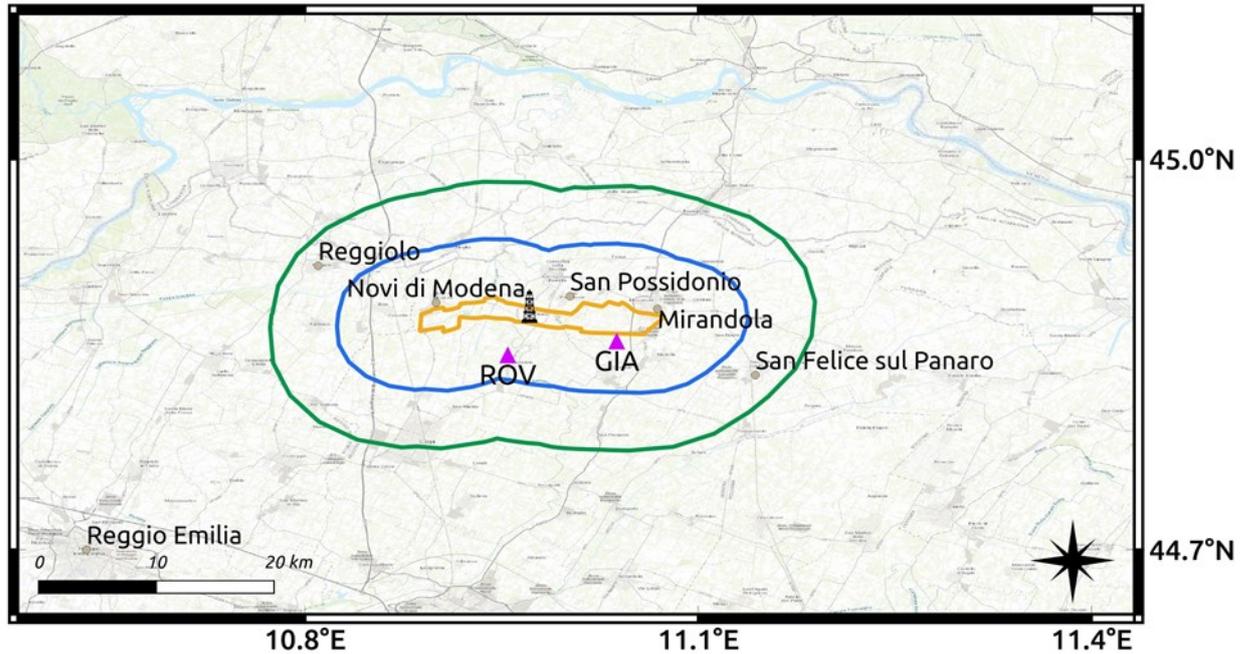


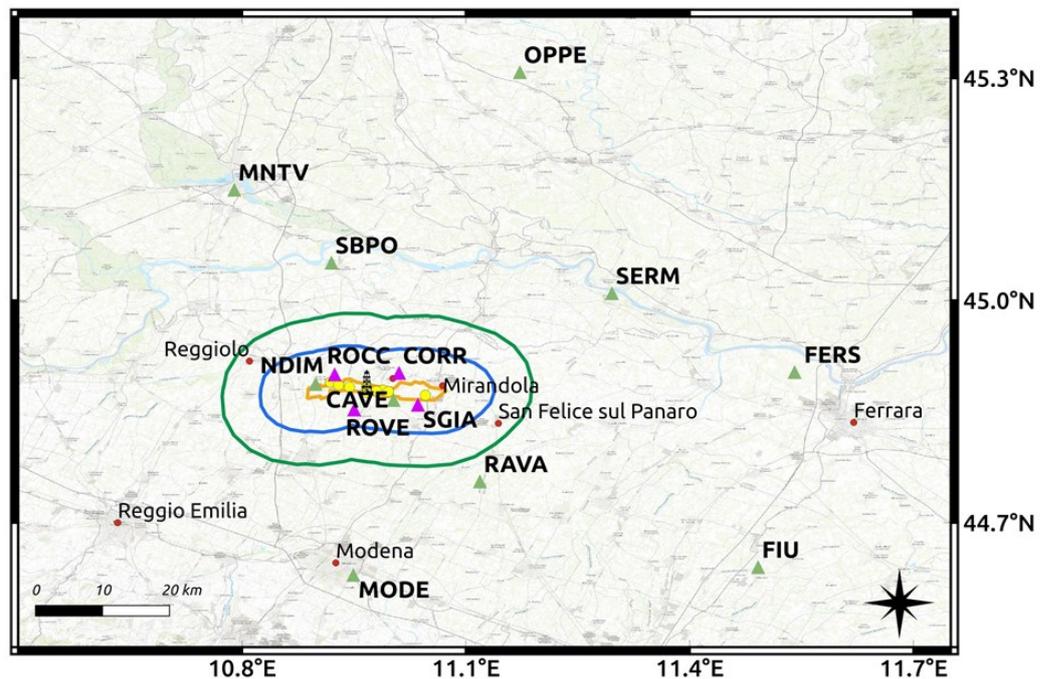
Figura 3.2. Mappa della proiezione in superficie del giacimento di Cavone (contorno giallo) con le stazioni sismiche operanti dal 1986 al 1990 (triangoli viola). I contorni blu e verde indicano l'estensione dei domini di rilevazione come definiti negli ILG. Il simbolo del pozzo mostra la posizione di *Cavone14*.

La rete sismica di Cavone nella sua configurazione attuale a 4 stazioni, è stata installata nel novembre 1990, con il passaggio della gestione direttamente a Eni. Le sigle e le coordinate di ogni stazione sono riportate nella Tabella 3.2, la loro posizione è visibile nella mappa di Figura 3.3. Le 4 stazioni, equipaggiate con sismometri a 3 componenti Le-3D/1s, inizialmente si avvalevano di acquisitori Lennartz MARS88, della stessa Lennartz Electronic GmbH, che funzionavano in modalità trigger (ovvero tenendo in memoria solo brevi periodi di segnale in occasione di un aumento improvviso di ampiezza) e venivano sincronizzate temporalmente tramite il segnale radio DCF-77. Questo fino al 18 dicembre 2018 quando, nell'ambito della sperimentazione degli ILG, Eni, su richiesta di Società Padana Energia, ha incaricato la ditta Solgeo S.r.l. di sostituire gli acquisitori con dei Dymas24 della Sara Electronic Instruments S.r.l. che consentissero un'acquisizione in continuo e la sincronizzazione del tempo tramite satelliti GPS (più affidabile delle onde radio), adeguandosi così agli attuali standard delle reti sismiche. Per garantire unicità del flusso di dati, la rete locale è stata registrata alla International Federation of the Digital Seismic Networks (FDSN, <https://www.fdsn.org/networks/>) con la sigla VO, mentre le stazioni con le sigle CORR, ROCC (ex ROC), ROVE e SGIA sono state inserite nell'analogo registro internazionale delle stazioni sismiche (IR, <http://www.isc.ac.uk/registries/>). La frequenza di campionamento è attualmente di 200 Hz, che consente una banda utile di segnale pari a 1-50 Hz.

Tabella 3.2. Coordinate delle stazioni dal 1990 ad oggi.

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m)
CORR	44.90190	11.00944	20
ROCC	44.90000	10.92417	17
ROVE	44.85307	10.94972	21
SGIA	44.85917	11.03583	20

Figura 3.3. Mappa delle stazioni sismiche della rete VO (in viola) e della rete IV (in verde) con la proiezione in superficie del giacimento (contorno giallo) e i domini di rilevazione (contorni blu e verde). I cerchi gialli rappresentano la posizione dei pozzi del campo, mentre il simbolo del pozzo evidenzia il punto di re-iniezione Cavone 14.



In ambito sperimentazione degli ILG la rete locale viene integrata con le 10 stazioni della rete sismica nazionale (codice rete IV) gestite dall'INGV, entro un raggio di 50 km da San Possidonio (il comune più centrale rispetto all'estensione del giacimento), Per le caratteristiche tecniche relative alle stazioni IV rimandiamo alla pagina *web* dedicata (INGV Seismological Data Centre, 2006). Riportiamo invece le coordinate e i nomi in Tabella 3.3.

Tabella 3.3. Coordinate delle stazioni della rete sismica nazionale (IV) che partecipano al monitoraggio sismico integrando la rete sismica locale VO.

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m)
CAVE	44.86580	11.00310	18
FERS	44.90350	11.54060	3
FIU	44.64031	11.49165	12
MNTV	45.14950	10.78970	36
MODE	44.62972	10.94917	41
NDIM	44.88730	10.89870	19
OPPE	45.30820	11.17240	20
RAVA	44.75587	11.11880	15
SBPO	45.05108	10.91987	10
SERM	45.00997	11.29582	7

La rete sismica integrata si compone perciò di 14 stazioni in totale, delle quali 6 si trovano molto ravvicinate all'interno della proiezione in superficie del giacimento (Figura 3.3), una stazione (RAVA) è di poco esterna ai domini di rilevazione, mentre le restanti 7 si situano molto più lontane.

3.2 Valutazione delle prestazioni della rete e rispondenza agli ILG

Le prestazioni di una rete sismica sono strettamente dipendenti dal livello di rumorosità registrato dalle stazioni che la compongono. Più alto è il livello di rumore ad una stazione e più è alta la magnitudo che un evento deve avere affinché possa essere registrato alla stazione stessa con un buon rapporto segnale/rumore. Al di là dell'interesse scientifico nel testare il possibile rendimento della rete sismica, gli ILG richiedono dei requisiti minimi in termini di prestazione. In particolare la rete sismica dovrebbe *"nel dominio interno di rilevazione, rilevare e localizzare i terremoti a partire da magnitudo locale M_L compresa tra 0 e 1 ($0 \leq M_L \leq 1$) e con incertezza nella localizzazione dell'ipocentro di alcune centinaia di metri"*.

3.2.1 Analisi del rumore sismico ambientale

Per stimare le caratteristiche del rumore sismico registrato alle stazioni della rete di Cavone, sono stati analizzati 15 giorni di segnale sismico acquisito tra l'1 e il 15 settembre 2018 alle stazioni NDIM e CAVE. Queste due stazioni fanno parte della rete IV e sono quelle più prossime al centro olio di Cavone (a pochi chilometri dalle stazioni locali, si veda la mappa di Figura 3.3). All'epoca di questo studio le stazioni della rete locale non acquisivano il rumore di fondo, registrando solo in modalità *trigger*, in mancanza di dati registrati in continuo e data la vicinanza delle due stazioni IV, consideriamo le stime sui livelli di rumore prodotte per NDIM e CAVE come valide per tutte le stazioni della rete locale. Questa assunzione si basa sul fatto che le sei stazioni sono installate sullo stesso tipo di terreno alluvionale (si veda anche §3.3.2), trascurando ogni altra peculiarità specifica dei singoli siti (comunque ignota al tempo dell'analisi).

Per ogni stazione e componente il rumore sismico registrato è stato analizzato per caratterizzare i suoi livelli spettrali in termini di *Power Spectral Density* (PSD; Peterson, 1993) e valutarne la sua stabilità temporale, in modo da enfatizzare eventuali caratteristiche peculiari da attribuire alle principali sorgenti di rumore presenti nell'area investigata. Per ogni componente le PSD sono state calcolate su segmenti di segnale di 60 minuti (semi-sovrapposti al 50%) e trasformate in dB (Peterson, 1993). Per ogni giorno di segnale sono state calcolate 48 PSD per ogni componente analizzata. In totale, per il periodo di 15 giorni analizzato, sono stati calcolati 719 spettri di PSD per ogni componente. In Figura 3.4 vengono riportati gli spettrogrammi ottenuti a partire dalle PSD calcolate per le due stazioni NDIM e CAVE. Il rumore sismico (in termini di dB e rispetto al periodo, ovvero l'inverso della frequenza) presenta una chiara variazione giorno-notte con livelli di rumore che

crescono durante le ore diurne e diminuiscono nelle ore notturne. Questa caratteristica è più evidente per le alte frequenze (frequenze maggiori di 1 Hz, periodi minori di 1 s), ma si riscontra a entrambe le stazioni e tutte le componenti analizzate. In Figura 3.5 vengono riportate le variazioni temporali del rumore sismico calcolate in tre differenti intervalli di frequenza: $7.2 \div 14$ s, $0.7 \div 1.4$ s, $6.8 \div 14$ Hz. Il rumore sismico registrato a CAVE ad alta frequenza ($6.8 \div 14$ Hz) diminuisce di circa 20-25 dB nelle ore notturne rispetto ai livelli diurni. Simili variazioni si osservano anche per la stazione NDIM dove si osserva, su tutte le componenti, una diminuzione dei livelli di rumore di circa 25-30 dB nelle ore notturne. Anche nella banda di frequenze intermedia (fra $0.7 \div 1.4$ Hz) si osserva una variazione giorno-notte importante ma più contenuta rispetto alla precedente banda. Infatti, sia per CAVE che per NDIM il livello di rumore diminuisce di notte di circa 10-15 dB. Infine, nella banda $7.2 \div 14$ s (bassa frequenza), non si osservano importanti variazioni attribuibili al passaggio giorno-notte. La Figura 3.5 evidenzia anche una diminuzione del rumore nelle due bande ad alta frequenza ($0.7 \div 1.4$ s, $6.8 \div 14$ Hz) durante i giorni del *weekend* analizzati (i giorni: 1, 2, 8, 9, e 15 settembre 2018). Sia le variazioni giorno-notte osservate che la diminuzione del rumore durante i *weekend*, sono chiari segnali di un'origine antropica come sorgente principale del rumore ad alta frequenza (frequenze superiori a 0.7 Hz) registrato alle due stazioni.

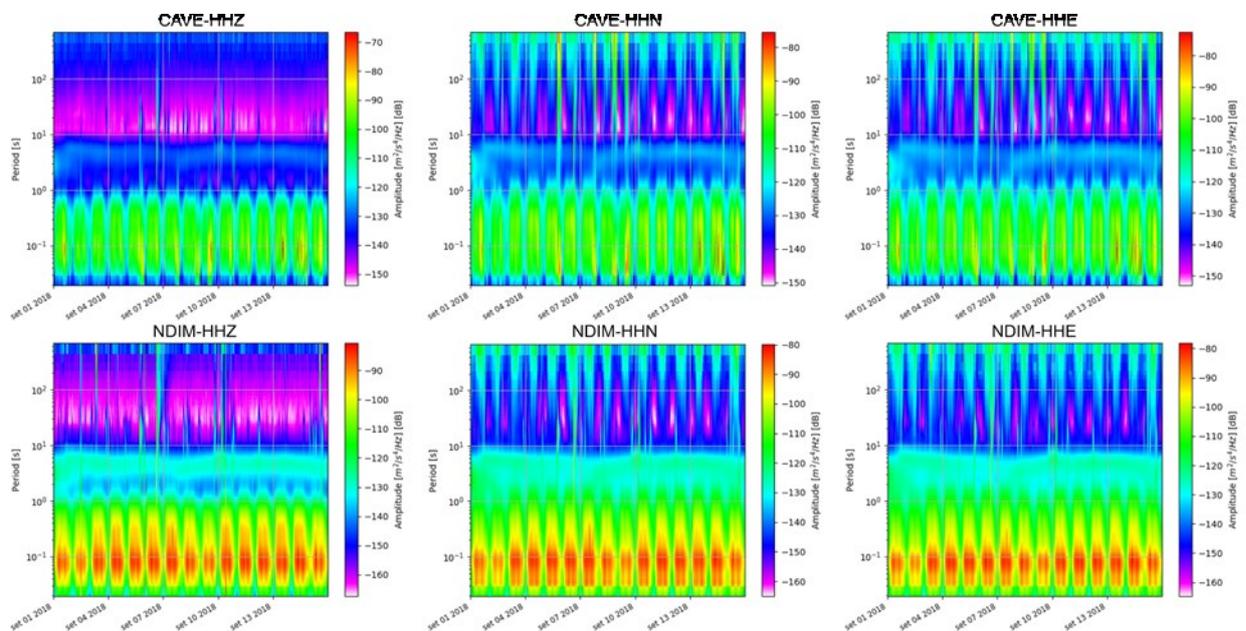


Figura 3.4. Spettrogrammi relativi alle diverse componenti (HHZ, HHN, HHE) ottenuti per le stazioni CAVE e NDIM a partire dai dati registrati tra l'1 e il 15 settembre 2018. Gli spettri sono PSD espressi in dB rispetto a $1 (m/s)^2/Hz$.

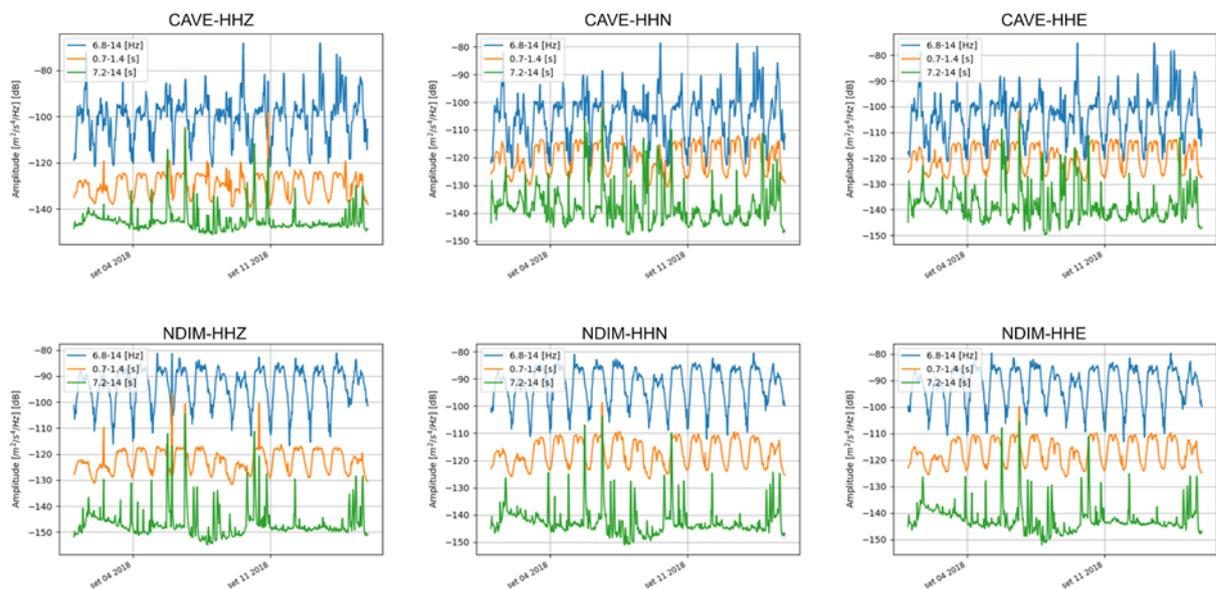


Figura 3.5. Variabilità temporale del rumore (PSD in dB) calcolato in tre diverse bande di frequenza (7.2÷14s, 0.7÷1.4s, 6.8÷14 Hz) per le componenti HHZ, HHN, HHE delle stazioni CAVE e NDIM a partire dai dati registrati tra il 2018/09/01 e il 2018/09/15.

Per ricavare dei livelli di rumore caratteristici alle due stazioni è stata effettuata un'analisi statistica di tutte le curve spettrali calcolate su ogni segmento di 30 minuti di segnale, seguendo la strategia proposta da McNamara and Buland (2004) per la costruzione di *Probability Density Function* (PDF) ricavate da tutti gli spettri stimati. In Figura 3.6 vengono riportate le PDF calcolate dalle stime dei livelli spettrali relativi alle registrazioni delle tre componenti delle stazioni sismiche CAVE e NDIM. La figura evidenzia valori elevati di massima PDF che ad alta frequenza (frequenze > 1 Hz, periodi <1 s) superano i livelli di NHHM (*New global High-Noise Model*) definito insieme al *New global Low-Noise Model* (NLNM, Peterson, 1993) che rappresentano lo standard mondiale di riferimento di alta e bassa rumorosità per le stazioni sismiche.

Dai valori di PDF è stato calcolato (ad ogni frequenza e per ogni componente) il livello di 90° percentile per le PSD, utilizzato come curva rappresentativa del livello di rumorosità delle due stazioni analizzate. La Figura 3.7 mostra i livelli di 90° percentile ottenuti per le differenti componenti delle stazioni CAVE e NDIM. Nella banda di frequenze compresa fra 1 Hz e 3 Hz le curve calcolate superano di circa 10-15 dB i livelli di NHHM. Sempre ad alta frequenza, la stazione NDIM risulta mediamente più rumorosa (di circa 5-10 dB) di CAVE fra i 5 Hz e i 30 Hz.

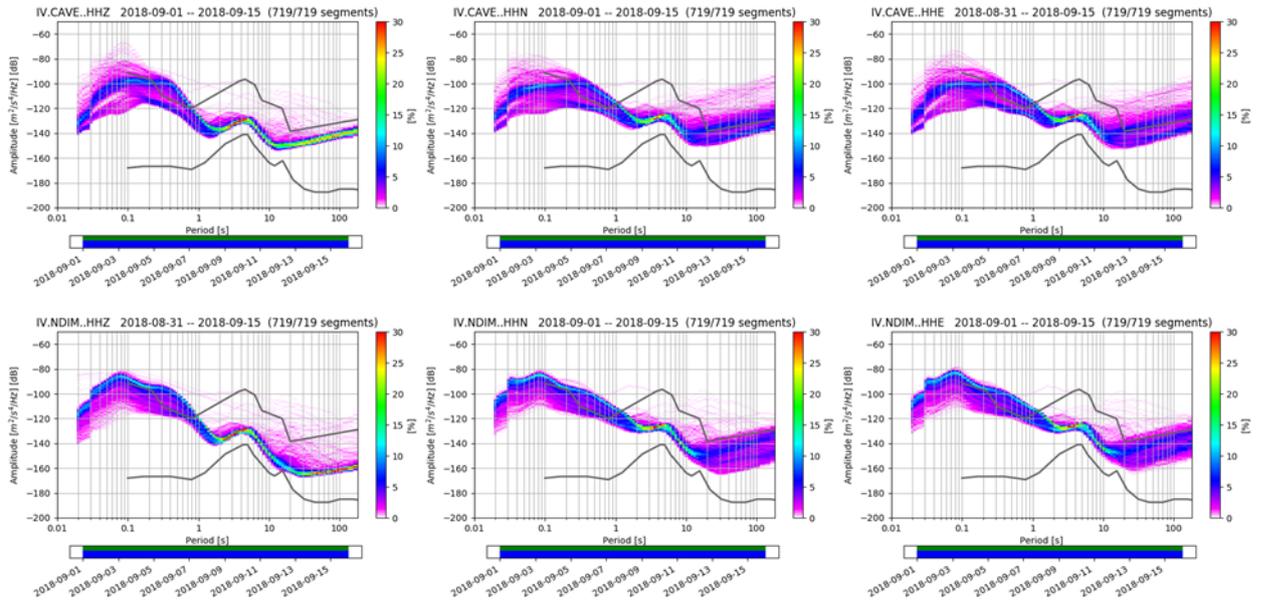
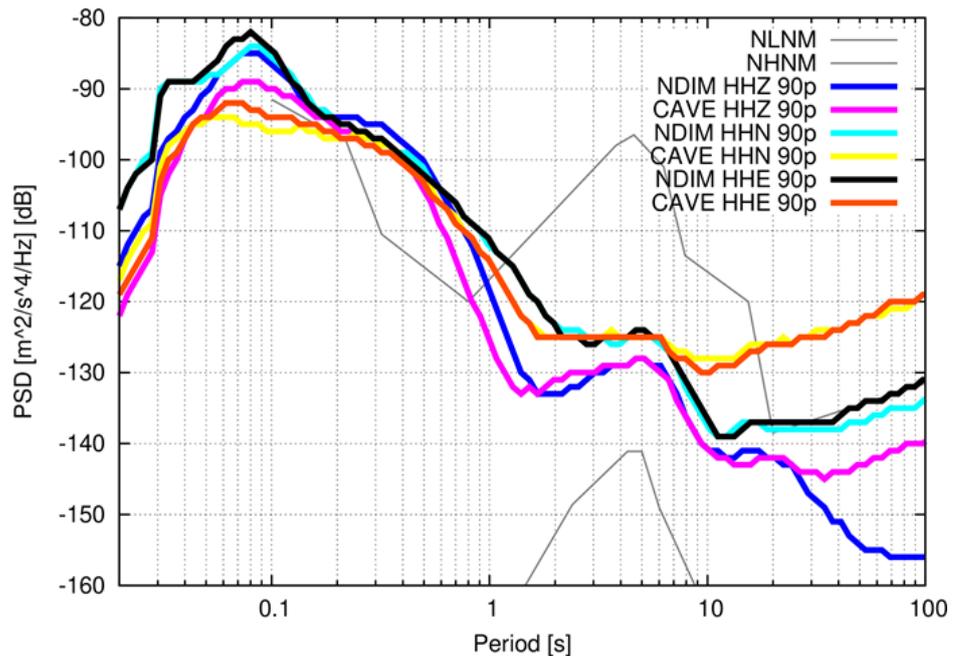


Figura 3.6. PDF calcolate per le tre componenti delle stazioni CAVE e NDIM. Le PDF sono state ottenute dalle PSD relative ai dati acquisiti tra il 2018/09/01 e il 2018/09/15. Le curve grigie rappresentano le curve NNM e NLNM, utilizzate come valori standard di riferimento di alto e basso livello di rumorosità per stazioni sismiche.

Sempre al di sopra di 1 Hz, per NDIM i livelli di rumore sono generalmente paragonabili su tutte e tre le componenti, compresa la verticale. Nel caso di CAVE, la componente verticale risulta essere più rumorosa (di circa 5 dB) delle due componenti orizzontali fra i 5 Hz e i 15 Hz.

Figura 3.7. Livelli di 90° percentile di PSD calcolati per le diverse componenti delle stazioni sismiche CAVE e NDIM. Le curve grigie rappresentano i livelli di NNM e NLNM utilizzate come valori standard di riferimento di alto e basso livello di rumorosità per stazioni sismiche.



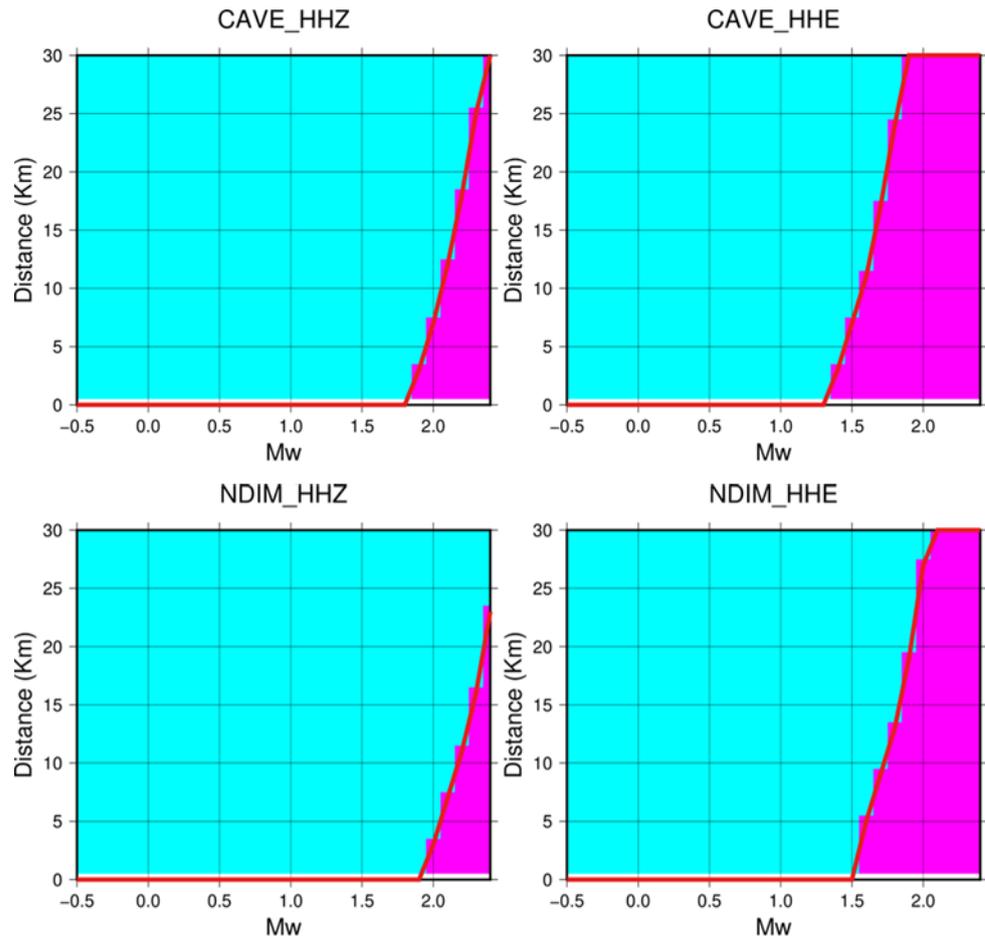
3.2.2 Stima delle soglie di detezione alla rete di Cavone

Per comprendere le prestazioni, in termini di soglia di detezione di eventi sismici della rete di monitoraggio di Cavone, è stata effettuata un'analisi basata sul rapporto segnale/rumore del minimo evento registrato ad ogni stazione, seguendo il metodo proposto da Vassallo et al. (2012). Il livello di rumore caratteristico ad una fissata stazione è pari al 90° percentile mediato fra 1 Hz e 30 Hz. Alle stazioni della rete che non acquisiscono il segnale in continuo (CORR, ROC, ROVE, SGIA) come livello caratteristico è stato assegnato il livello della stazione CAVE. Lo spettro relativo alle fasi P ed S di un evento sismico viene calcolato seguendo l'approccio di Brune (Brune, 1970; Brune, 1971) in cui il segnale spettrale atteso, per un terremoto di fissata magnitudo e distanza dalla stazione, viene calcolato utilizzando i parametri relativi alla sorgente sismica e al mezzo di propagazione (*stress-drop*, densità, velocità delle onde P ed S, attenuazione anelastica). Per la stima degli spettri, sono stati utilizzati i seguenti parametri di sorgente e di propagazione: *stress-drop* $\Delta\sigma=1.0$ MPa, attenuazione $t^*=0.08$ s (tempo ridotto), $V_p=4400$ m/s, $V_s=2500$ m/s, densità $\rho=2.4$ g/cm³. I parametri di propagazione sono stati fissati anche tenendo conto della profondità media degli eventi registrati nell'area del giacimento e nei domini (interno ed esteso) di rilevazione pari a circa 6 Km (in base alle analisi presentate nella Sezione 3.3).

Fissato un evento di magnitudo M_w che accade ad una distanza R da una stazione, il terremoto verrà rilevato se avrà un rapporto segnale/rumore superiore a 5. Questa soglia ci assicura che la fase considerata (sia P che S) abbia un'ampiezza che supera il livello di rumore caratteristico della stazione, consentendo in tal modo l'individuazione del tempo di arrivo della fase stessa dalla lettura manuale del sismogramma. Per ogni stazione è quindi possibile calcolare, per una fissata magnitudo, la distanza al di sotto della quale l'evento è registrato con un rapporto segnale/rumore maggiore di 5. La Figura 3.8 mostra le soglie di rilevabilità per la fase P e per la fase S per le due stazioni CAVE e NDIM. Il livello di rumore (90° percentile) medio calcolato fra 1 Hz e 30 Hz per la componente HHZ viene utilizzato per stimare la detezione delle onde P mentre quello ricavato per la componente HHE è stato utilizzato per la definizione della detezione della fase S. Nella figura la curva rossa separa gli eventi (definiti dalla coppia magnitudo-distanza) rilevabili alla stazione (area magenta) da quelli non rilevabili (area azzurra).

Date due stazioni, per una fissata magnitudo, l'influenza di un livello di rumore maggiore ad una stazione si traduce in una diminuzione della distanza massima di rilevabilità. Dalla Figura 3.7 si evince che la stazione NDIM è più rumorosa della stazione CAVE, per questo motivo la distanza massima di rilevabilità S (componenti

Figura 3.8. Soglie di rilevabilità a singola stazione. Ogni figura mostra le coppie magnitudo-distanza registrate con un rapporto segnale/rumore maggiore di 5 (dati nell'area magenta) e con un rapporto segnale/rumore minore di 5 (area azzurra). Le soglie sono ricavate utilizzando il rumore registrato alla stazione CAVE (in alto) e NDIM (in basso). Le componenti HHZ sono state utilizzate per determinare la soglia di rilevabilità della fase P (a sinistra) mentre le componenti HHE sono state usate per le soglie delle fasi S (a destra).



HHE di figura 3.8) per un evento di magnitudo $M_w=1.6$ risulta pari a 5 km per NDIM e 9 km per CAVE.

Avendo a disposizione le curve di rilevabilità per ogni stazione della rete, è possibile calcolare la soglia di detezione per l'intera rete di Cavone composta dalle 6 stazioni interne al DE. Ciò viene fatto stimando per ogni punto sorgente (sia interno che esterno alla rete) la magnitudo minima che un evento deve avere per essere registrato con un rapporto segnale rumore superiore a 5 ad almeno 5 stazioni. La scelta della soglia sul numero di stazioni è determinata dalla necessità di poter localizzare l'evento con una certa precisione. Per essere ben localizzato, infatti, un evento deve essere registrato con un buon rapporto segnale rumore ad almeno 5 stazioni della rete. La Figura 3.9 mostra le soglie di detezione per le fasi P ed S stimate per la rete di Campo di Cavone.

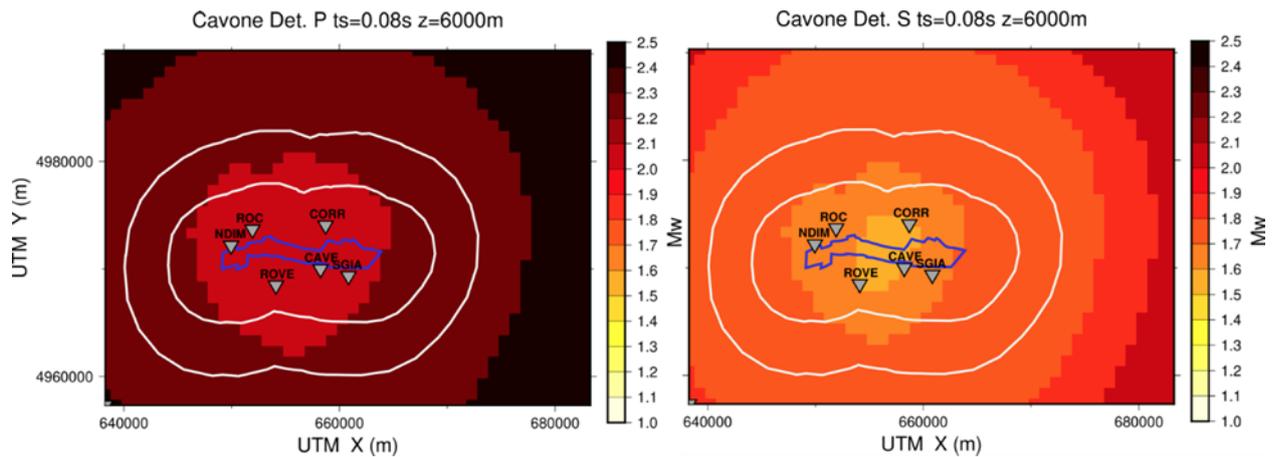


Figura 3.9. Soglie di deteazione stimate per la rete sismica di Cavone (concessione Mirandola). I colori associati ai punti delle mappe rappresentano la M_w minima che un evento sismico (profondo 6 km) deve avere per poter essere registrato con un rapporto segnale rumore superiore a 5 ad almeno 5 stazioni. A sinistra vengono riportate le soglie di deteazione per la fase P mentre a destra sono riportate quelle relative alla fase S. Nelle mappe le linee bianche delimitano le aree del Dominio Interno di rilevazione e Dominio Esteso di rilevazione, la linea blu delimita la proiezione in superficie del giacimento.

Sulla base di questi risultati, per la rete locale di Cavone stimiamo una soglia di deteazione per la fase P pari a $M_w=2.1$ sia per il dominio interno che per quello esteso, mentre per la fase S la soglia di deteazione è pari a $M_w=1.6$ per il dominio interno ed esteso. La scelta del 90° percentile insieme alla soglia di rapporto segnale/rumore paria a 5 (entrambe alquanto conservative) ci permettono di confrontare questo valore di soglia di deteazione, non tanto con la magnitudo minima registrata dalla rete, quanto più direttamente con la magnitudo di completezza del catalogo degli eventi registrati (ovvero la magnitudo minima a partire dalla quale siamo sicuri di rilevare tutti gli eventi). Il fatto di aver considerato solo le quattro stazioni centrali invece che tutta la rete non ha un impatto sulla soglia di rilevazione all'interno del DI dato che le altre stazioni della rete sismica nazionale sono installate troppo lontane (ben oltre il DE) per poter incidere sul risultato.

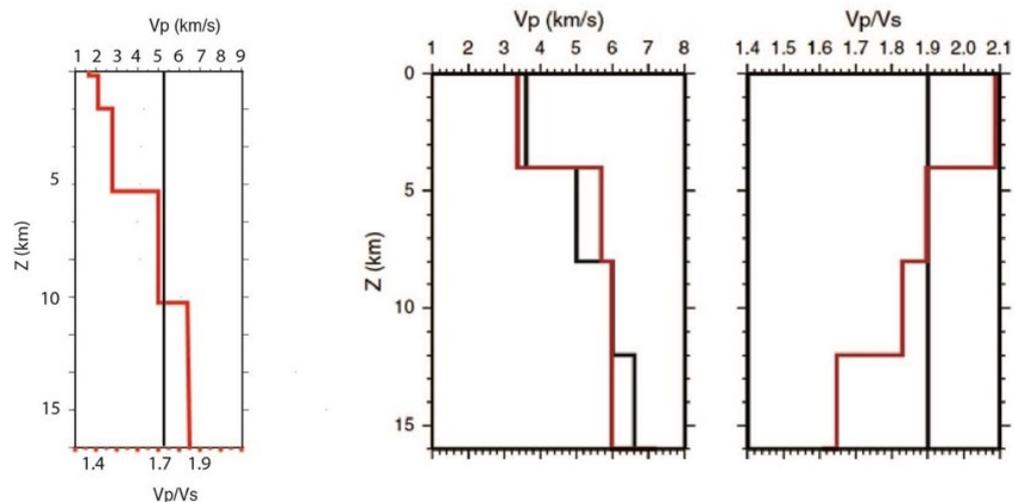
3.3 Analisi della sismicità registrata prima della sperimentazione (1982-2017/2018)

L'analisi della sismicità passata dell'area risulta abbastanza complessa per via della eterogeneità nella copertura spaziale da parte delle reti di monitoraggio nel corso del tempo. Come descritto in precedenza (Sezione 3.1), la rete di monitoraggio del campo ha subito dal 1982 ad oggi due importanti variazioni, passando dalle 10 stazioni iniziali monocomponente a solo 2 stazioni, sebbene a 3 componenti. La situazione è andata avanti fino al 1990, quando poi sono state installate le 4 stazioni

a tre componenti che attualmente operano il monitoraggio del campo. In ogni caso le registrazioni delle stazioni sismiche della rete di Cavone sono state integrate, quando possibile, con quelle delle stazioni della Rete Sismica Nazionale più vicine all'area.

Per l'analisi della sismicità dal 1982 al 2017 abbiamo preso in considerazione le letture dei tempi di arrivo dei terremoti rese disponibili da Società Padana Energia, e calcolato le localizzazioni. Abbiamo confrontato i risultati ottenuti tramite l'utilizzo di due diversi modelli di velocità 1-D: il primo è il modello di velocità solitamente utilizzato da Eni per la localizzazione degli eventi sismici nel campo (d'ora in avanti "modello Eni", riportato in Figura 3.10, a sinistra) e messo a disposizione dalla Società Padana Energia. Il secondo è il modello di Govoni et al. (2014) per lo studio della sequenza dell'Emilia 2012 (Figura 3.10, al centro e a destra, "modello Govoni"). Le localizzazioni sono calcolate tramite il *software* HYPOELLIPSE (Lahr, 1999) e i risultati ottenuti coi due diversi modelli di velocità sono riportati in Figura 3.11 e Figura 3.12 (modello Eni e Govoni rispettivamente).

Figura 3.10. A sinistra: Modello di velocità creato ad hoc per il centro olio Cavone (modello Eni) per le localizzazioni nell'area del giacimento. Al centro e a destra: Modello di velocità 1-D dal lavoro di Govoni et al. (2014).



I 1113 terremoti analizzati mostrano profondità variabile tra 1 e 46 km, con la quasi totalità degli eventi entro i 15 km per il modello Eni, mentre per il modello Govoni le soluzioni sembrano in generale meno profonde. Le sezioni 1-1' e 2-2' sono orientate S-SO/N-NE e O-NO/E-SE, rispettivamente in maniera pressappoco perpendicolare e parallela alle strutture dei sovrascorrimenti dell'area di "Mirandola", ed evidenziano la differente distribuzione degli eventi in profondità ottenute dai due diversi modelli. Nella sezione 1-1' la distribuzione degli ipocentri ottenuta con il modello Eni mostra un maggior numero di terremoti entro i 5 km che definisce una o più strutture allungate tra i 2 e i 12 km, mentre nella sezione 2-2' si osserva un *cluster* di sismicità che non definisce alcun tipo di struttura. Nessuna struttura viene invece evidenziata dalle localizzazioni ottenute con il modello Govoni, per nessuna delle due sezioni.

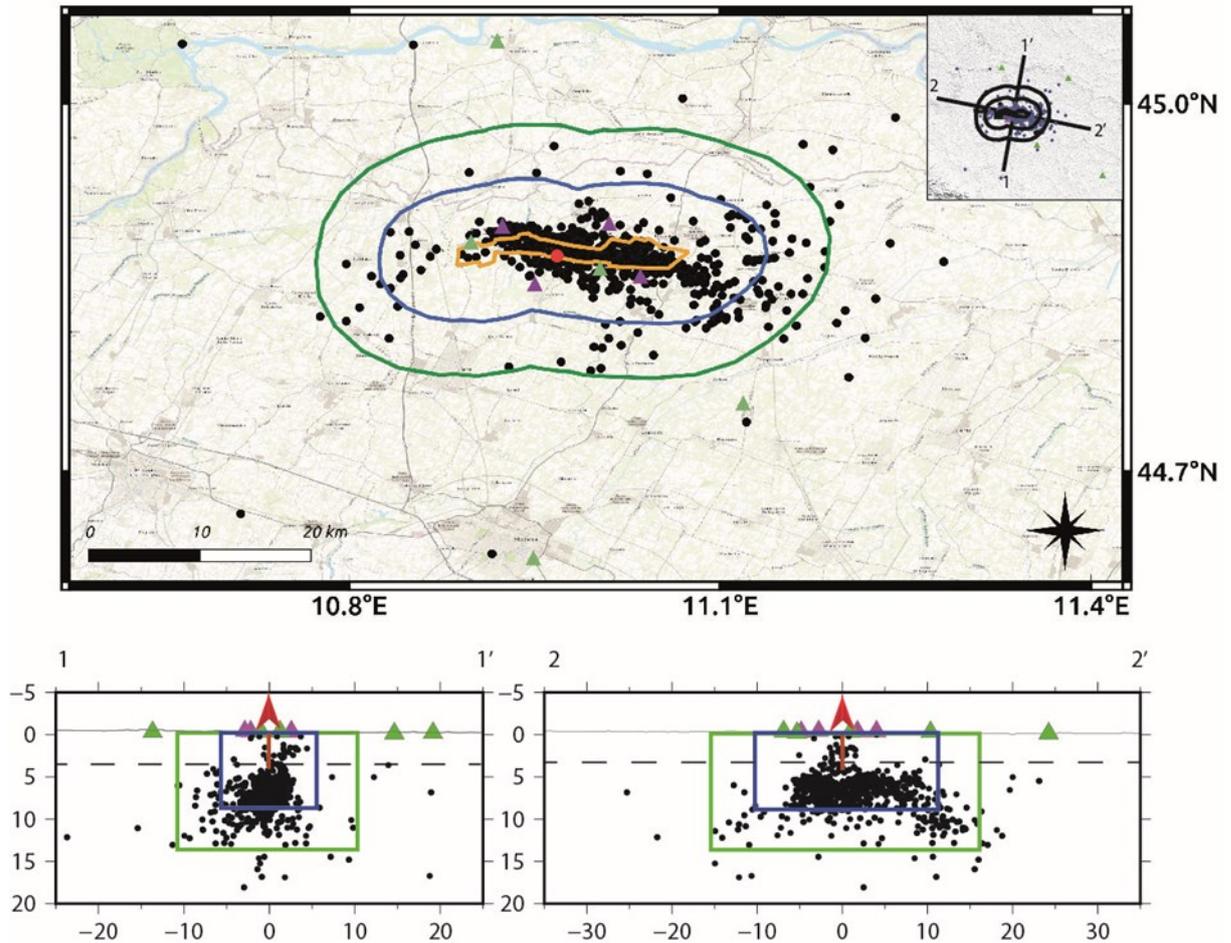


Figura 3.11. Sismicità registrata dalla rete di Cavone nel periodo 1982-2017 e localizzata con il modello Eni (punti neri). Vengono riportati in mappa i contorni della proiezione in superficie del giacimento (in giallo) e dei domini di rilevazione D1 e DE (blu e verde). Nella sezione invece la profondità del giacimento viene indicata dalla linea tratteggiata, con la linea continua la topografia e con gli stessi colori della mappa i contorni dei domini. I triangoli indicano le posizioni delle stazioni sismiche, in verde quelle della rete IV, in viola quelle della rete VO. In rosso (cerchio in mappa o freccia con segmento nelle sezioni) viene mostrato il pozzo di re-iniezione *Cavone14*.

Abbiamo utilizzato un *dataset* appena più ristretto, ma omogeneo in termini di rete sismica, con gli eventi avvenuti nel periodo 1990-2017 per fare alcuni test di valutazione della qualità delle localizzazioni confrontando i due diversi modelli di velocità, sia per quanto riguarda gli errori orizzontali che verticali. Abbiamo suddiviso gli eventi in base alla loro posizione epicentrale se all'interno o all'esterno della proiezione in superficie del giacimento. In questo modo vogliamo capire quanto il modello Eni, costruito ad hoc per Cavone, sia estendibile a tutta l'area emiliana della sequenza 2012, e viceversa quanto il modello Govoni sia utilizzabile all'interno del giacimento. I risultati (dettagliati nella relazione "Analisi della sismicità dal 1982 al 2017" mostrata in sede di comitato operativo durante la riunione dell'11/06/2018) evidenziano come per eventi che ricadono all'interno della proiezione in superficie del giacimento gli errori di localizzazione siano minori utilizzando il modello Eni. Mentre gli eventi che ricadono all'esterno di questo contorno mostrano errori (orizzontali) più

elevati con il modello Eni, che si riducono utilizzando il modello Govoni. Dai risultati di queste analisi risulta consigliabile utilizzare il modello di velocità 1-D creato *ad hoc* per il giacimento Cavone (modello Eni), soprattutto per quanto riguarda il monitoraggio delle aree all'interno della proiezione in superficie del giacimento (estendibile a tutto il DI) mentre allontanandosi dal giacimento, e in particolare già all'esterno del DI, la preferenza per qualità delle localizzazioni va al modello Govoni.

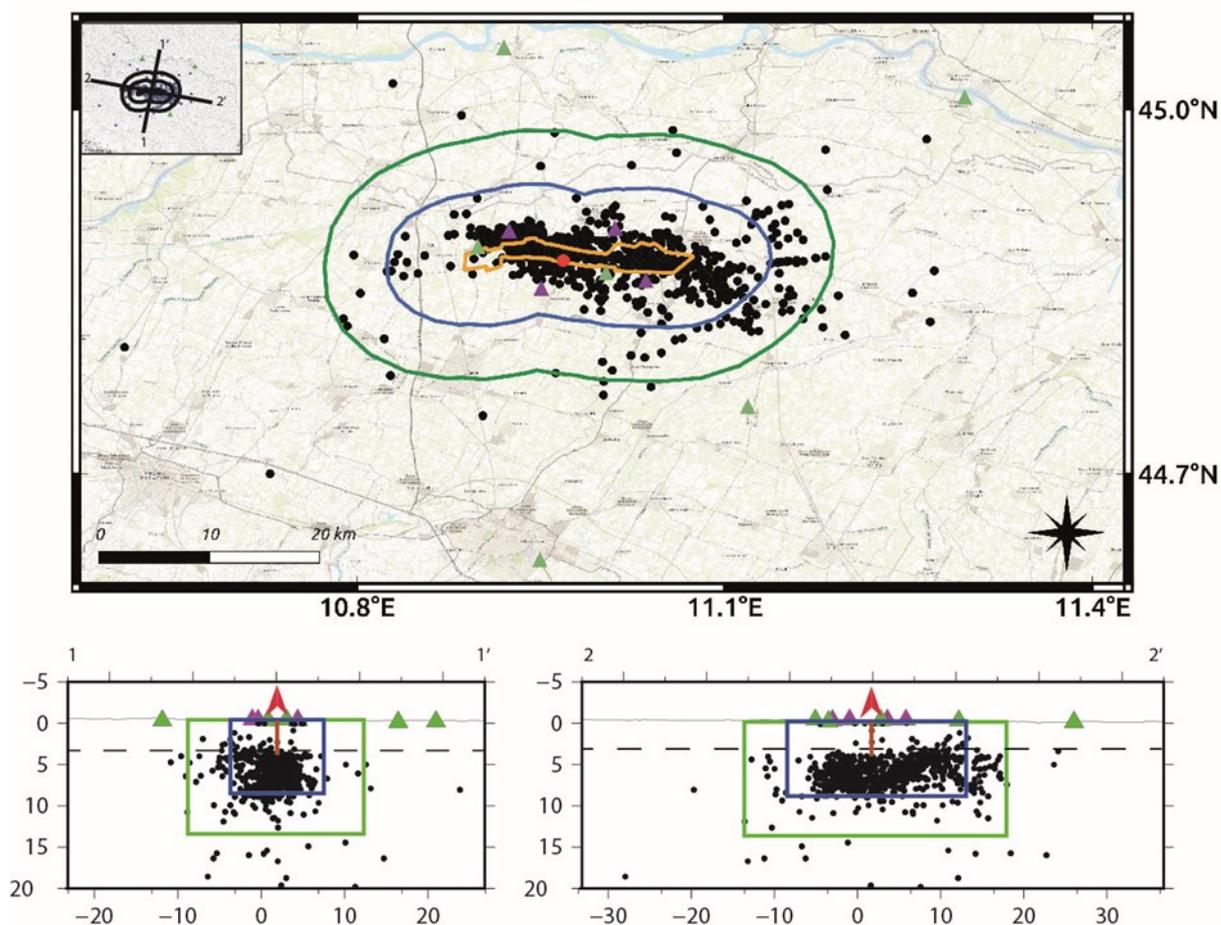


Figura 3.12. Sismicità registrata dalla rete di Cavone nel periodo 1982-2017 e localizzata con il modello Govoni. I simboli sono gli stessi della Figura 3.11.

Abbiamo quindi analizzato più nel dettaglio un *dataset* composto da 213 terremoti, avvenuti tra il gennaio 2011 e il dicembre 2018, ad esclusione del periodo da maggio 2012 a giugno 2013 in cui la rete VO non ha funzionato per danneggiamenti subiti a causa della sequenza sismica dell'Emilia (Microseismic Team GEOM - Geodynamics & Geophysical Monitoring, Eni, comunicazione personale). L'analisi in questo caso è stata fatta interamente dalla SPM, ovvero ridefinendo manualmente i tempi di arrivo delle fasi P ed S a tutte le stazioni della rete del campo di Cavone, e delle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV più vicine al giacimento (NDIM, RAVA, CAVE,

SBPO, SERM, FIU). Il *software* di inversione utilizzato per la localizzazione 1-D assoluta è sempre HYPOELLIPSE (Lahr, 1999). In base ai risultati precedentemente descritti e alla localizzazione della sismicità rilevata abbiamo optato per il modello di velocità Eni. La Figura 3.13 mostra la mappa dei 213 terremoti localizzati. La sismicità appare abbastanza concentrata lungo una direttrice orientata E-NE/O-SO, quasi la metà degli eventi (circa 90) mostra epicentri compresi all'interno del poligono che delimita la proiezione in superficie del giacimento. Guardando le sezioni verticali si può vedere come la maggior parte della sismicità sia contenuta nei primi 12 km di profondità. Soprattutto nella sezione verticale 1-1' (definita come nelle precedenti mappe) si nota una sismicità abbastanza concentrata intorno alle principali strutture tettoniche conosciute (cfr. Carminati and Vadacca, 2010), sebbene non si delinea chiaramente nessuna di tali strutture. Solo alcuni eventi ricadono tra i 12 e i 15 km di profondità, e raramente ancora più in profondità.

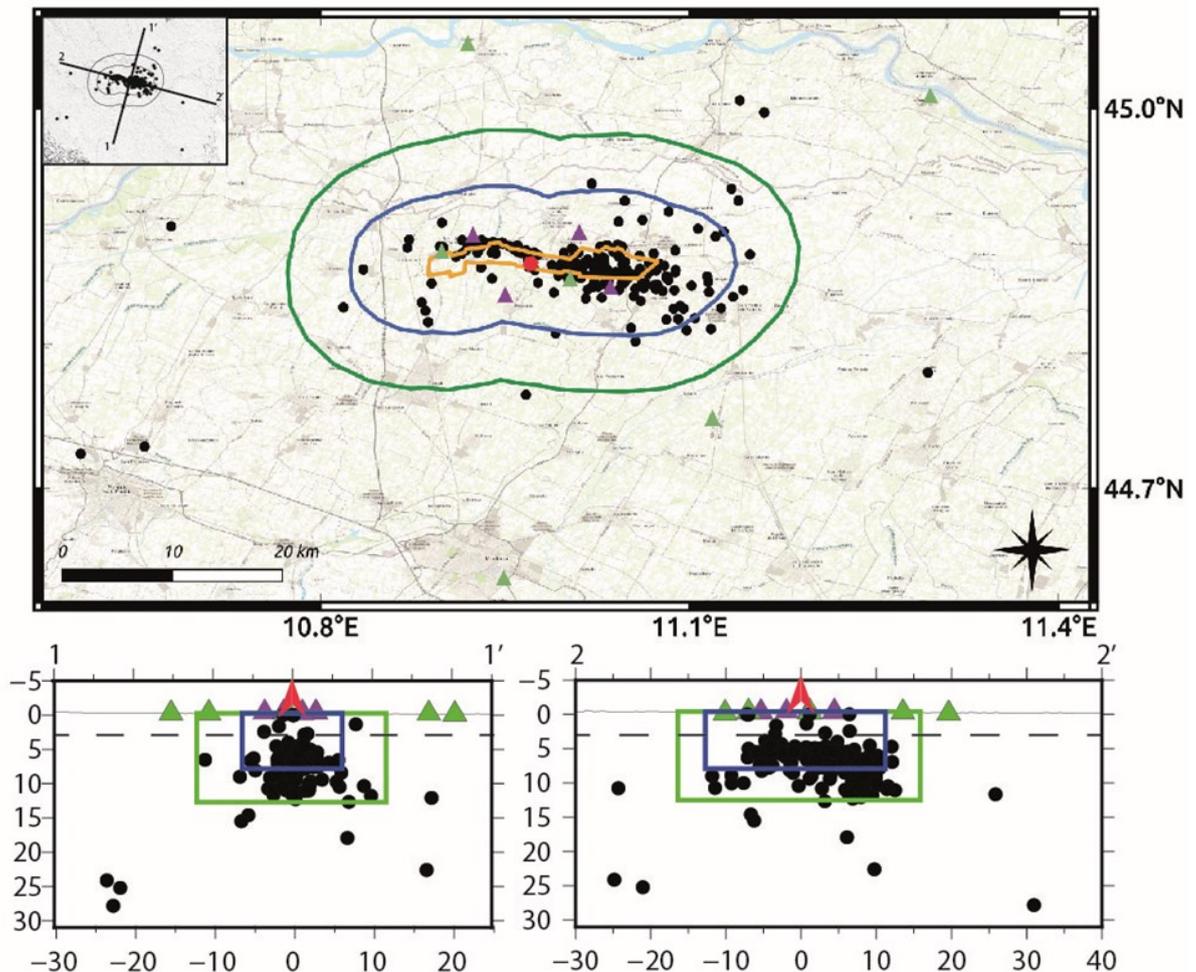


Figura 3.13. Mappa dei 213 eventi analizzati tra il 2011 e il 2018 e sezioni corrispondenti attraverso il campo di Cavone. La proiezione in superficie del giacimento di Cavone è riportata in giallo nella mappa in alto. I pallini neri rappresentano la sismicità, mentre i triangoli rappresentano rispettivamente le stazioni delle reti VO (viola) e IV (verde). Nelle sezioni la linea continua indica la topografia, quella tratteggiata la profondità del giacimento. In rosso (cerchio in mappa o freccia con segmento nelle sezioni) viene mostrato il pozzo di re-iniezione *Cavone14*.

3.3.1 Magnitudo momento M_W

Per ogni evento è stato calcolato, in maniera accurata, un valore di magnitudo momento (M_W) attraverso l'applicazione della tecnica descritta in Munafò et al. (2016) ed utilizzando i parametri di attenuazione crostale regionale ($Q(f) = 110^{0.55}$, $g(f) = r^{0.9}$) calcolati per la zona della pianura Padana (Malagnini and Munafò, 2017). Sulla base di queste stime abbiamo potuto valutare la magnitudo di completezza M_C che risulta variabile per la M_L a seconda del metodo utilizzato per stimarla ($M_C=1.4$; 1.8; 1.5 rispettivamente seguendo Marzocchi et al, 2016; Wiemer and Wyss, 2000; Woessner and Wiemer, 2005; Figura 3.14a), mentre per la M_W si ottiene un valore robusto di $M_C=2.0$ (indipendente dal metodo utilizzato dei tre sopra menzionati). Il valore corrispondente del parametro b (coefficiente della relazione lineare tra logaritmo in base 10 del numero di eventi e magnitudo, o equivalentemente esponente della legge di potenza tra frequenza ed energia degli eventi, Gutenberg and Richter, 1954; Aki, 1965) risulta di 1.16 mostrato anche in Figura 3.14b.

Abbiamo infine calcolato la relazione tra M_L stimate da Eni e presenti in LabCavone e M_W calcolate dalla SPM (Figura 3.15), tramite una regressione lineare:

$$M_W = (0.74 \pm 0.03)M_L + (1.02 \pm 0.05) \quad [\text{Eq. 1}]$$

Maggiori dettagli sulle analisi eseguite sui dati pre-2019 saranno presentati in un articolo scientifico (in preparazione) a completamento dell'accordo operativo 2018-2019 per la collaborazione scientifica tra INGV e MISE-DGS-UNMIG.

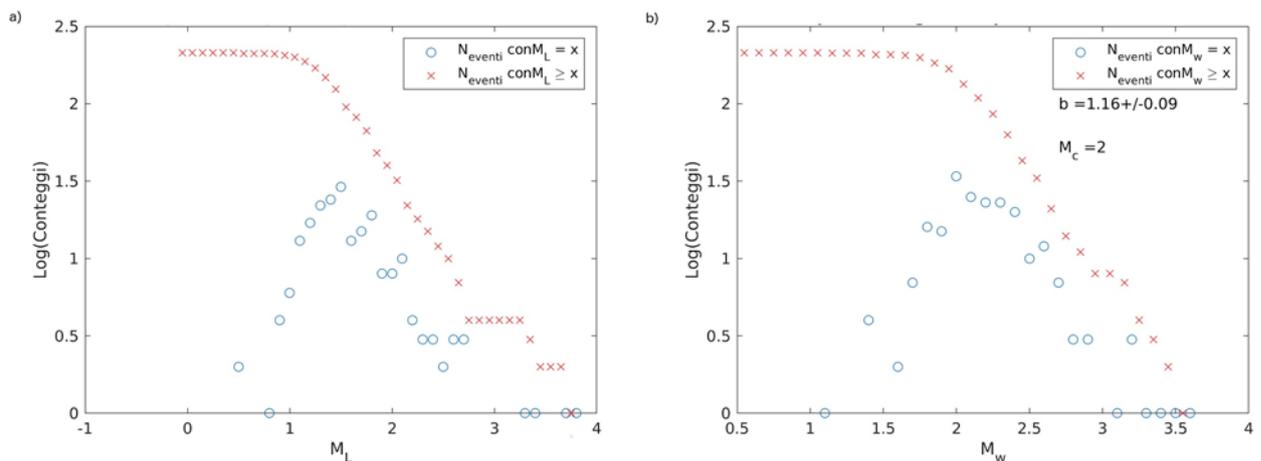


Figura 3.14. Distribuzione frequenza-magnitudo per il catalogo di 213 terremoti tra il 2011 e il 2018 relativamente a M_L fornita da Eni e M_W calcolata dalla SPM. Il valore M_C indica la magnitudo di completezza nel caso di valore stabile (si veda il testo per maggiori dettagli).

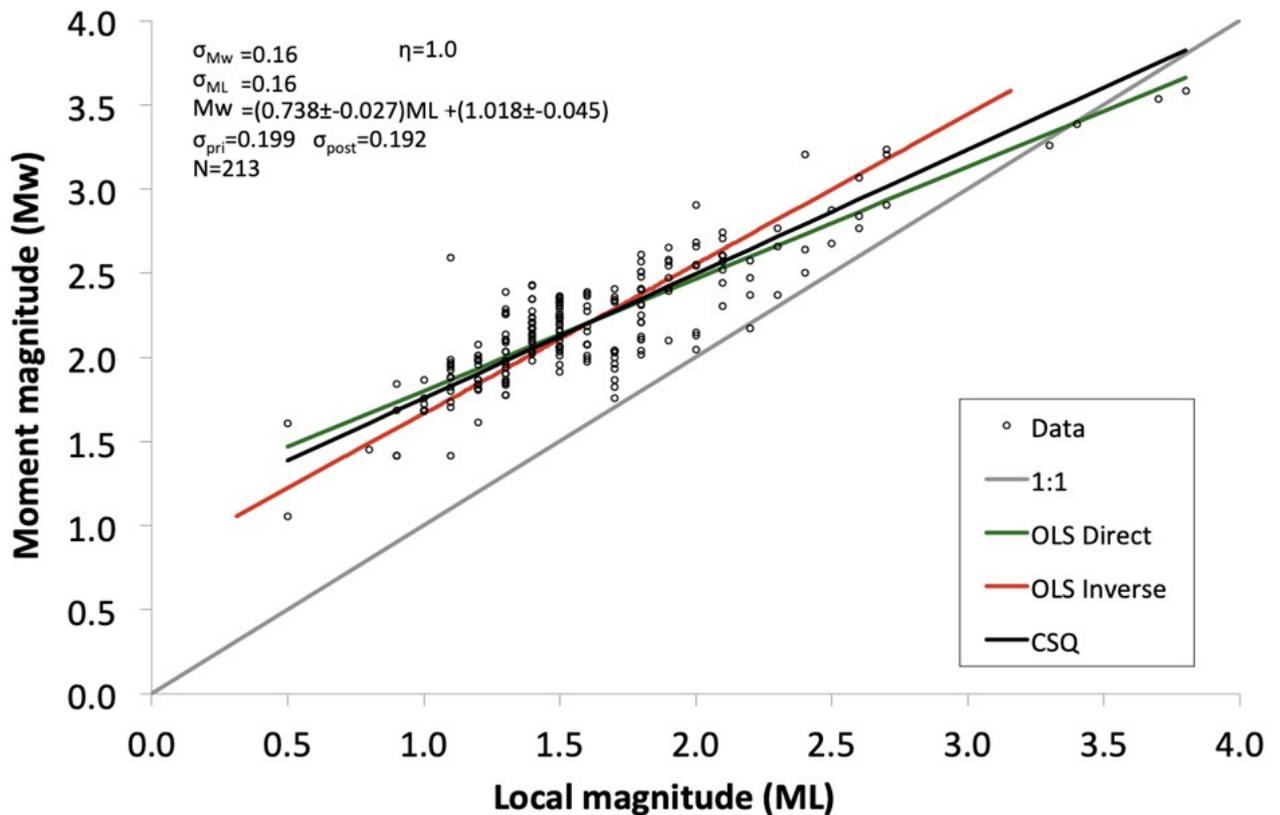


Figura 3.15. Regressione lineare M_w - M_L per i 213 eventi in catalogo. Le linee continue verde, rossa e nera indicano la regressione ottenuta con metodi diversi (rispettivamente diretto, inverso e ortogonale), mentre la retta grigia delinea l'andamento corrispondente a un andamento 1:1 tra le due quantità (che non si adatta al nostro caso).

3.3.2 PGA, PGV e scuotimento del suolo

Abbiamo quindi calcolato i valori di PGV e PGA (*Peak Ground Acceleration* e *Peak Ground Velocity*, ovvero i valori di picco in accelerazione e velocità) osservati per ogni terremoto ad ogni stazione della rete sismica integrata (1714 valori in totale, relativi ai 213 eventi presenti in catalogo). Poiché le stazioni prese in considerazione sono tutte dei velocimetri, abbiamo potuto calcolare la PGV direttamente come la media geometrica del massimo in valore assoluto registrato alle due componenti orizzontali. Per il calcolo della PGA, invece, abbiamo usato il massimo in valore assoluto della derivata della registrazione in velocità alle 2 componenti orizzontali e poi ne abbiamo calcolato la media geometrica. Osserviamo in Figura 3.16 come i valori ottenuti decrescono con l'aumentare della distanza tra l'evento e la stazione a cui vengono registrati, a parità di magnitudo associata all'evento sismico.

La legge predittiva del moto del suolo che lega PGA-magnitudo-distanza utilizzata a livello nazionale, denominata Ita10 (Bindi et al, 2011), e usata nell'ultima mappa di *hazard* (Meletti et al., 2017) e in *ShakeMap* (mappe di scuotimento del suolo in tempo

reale, Michellini et al., 2020) è calibrata per terremoti con magnitudo maggiori di 4 e distanze epicentrali maggiori di 10 km.

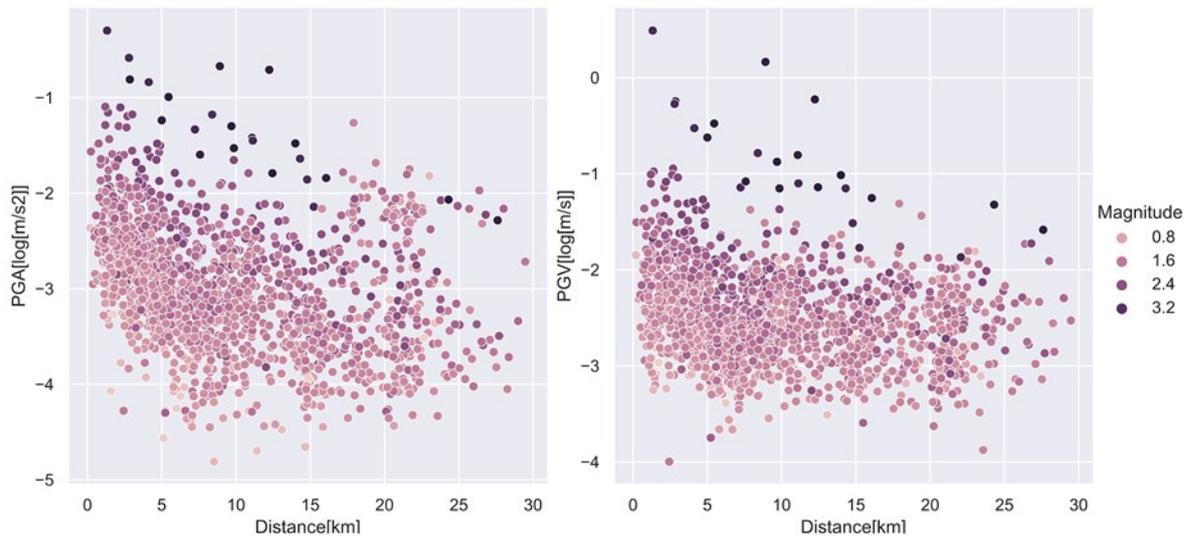


Figura 3.16. Valori di PGA (pannello di sinistra) e PGV (pannello di destra) calcolati per ogni stazione in funzione della distanza epicentrale.

Abbiamo quindi deciso di costruire una nuova legge predittiva del moto del suolo adatta alle condizioni in cui operiamo, ovvero calibrata per eventi di piccola magnitudo e distanze epicentrali ridotte, seguendo l'approccio di Atkinson (2015) e calcolando i parametri che meglio si adattano nel nostro caso alla relazione:

$$\log_{10} PGA = a + b * M + c * M^2 + d * \log_{10} R \quad [\text{Eq. 2}]$$

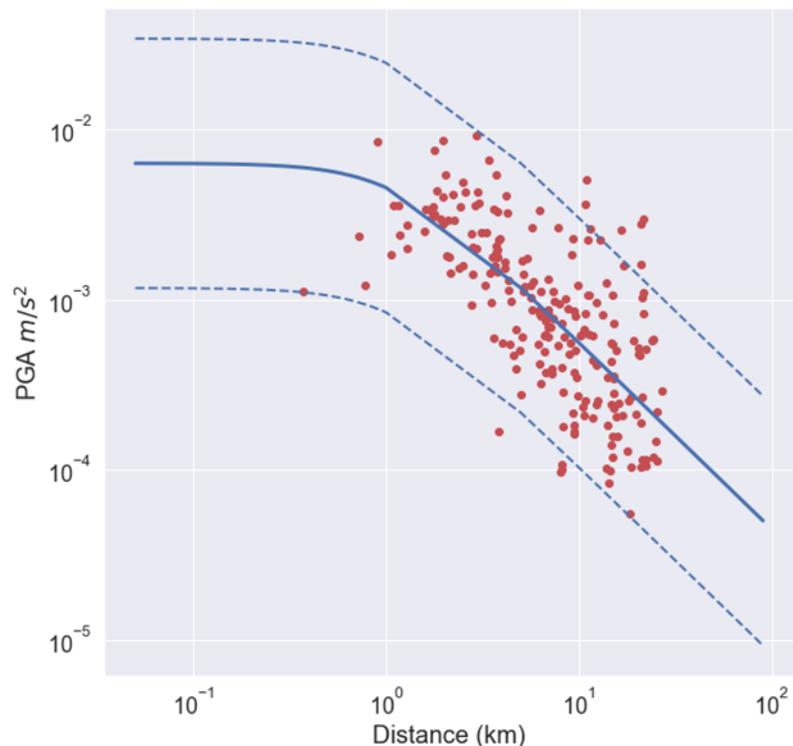
dove con **PGA** si intende la media geometrica tra le componenti orizzontali del picco in accelerazione, **M** è la magnitudo associata all'evento e **R** è la distanza epicentrale. L'attenzione per gli eventi di piccole dimensioni consente lo sviluppo di un semplice modello di previsione di moto del suolo in funzione della distanza epicentrale che tiene conto correttamente dell'approssimazione a un punto per la sorgente del terremoto vicino. Inoltre, non è stato tenuto conto delle diverse tipologie di suolo poiché le stazioni sono tutte molto vicine e localizzate sullo stesso tipo di suolo. Infatti dal *database* ESM (Engineering Strong-Motion, Luzi et al., 2016) abbiamo verificato che le stazioni che abbiamo usato sono nella categoria di suolo C, come definito in *Eurocode 8* (2004). Per la stima dei parametri **a**, **b**, **c** e **d** abbiamo utilizzato il modulo "*Ground Motion Prediction Equations*" disponibile sulla piattaforma IS-EPOS (2016). Riportiamo i valori ottenuti in Tabella 3.4:

Tabella 3.4. Valori stimati per i parametri della relazione PGA-Magnitudo-distanza nel caso dei 213 eventi sismici del periodo 2011-2018.

a	b	c	d
-3.19 +/- 0.069	0.614 +/- 0.072	0.052 +/- 0.019	-1.098 +/- 0.028

Tutti e quattro i parametri risultano statisticamente significativi. La Figura 3.17 mostra a titolo di esempio (per un evento di $M_L=1.5$) come si distribuisce la regressione trovata rispetto ai dati.

Figura 3.17. Esempio di come la legge di predizione del moto del suolo (linea blu continua) si distribuisca rispetto ai dati (punti rossi) per una magnitudo di $M_L=1.5$, le linee tratteggiate indicano i margini di incertezza sulle stime di PGA.



Si sottolinea come questa rappresenti una prima stima di relazione per la quantificazione dello scuotimento del suolo da terremoti, basata sui dati disponibili al momento, molto rappresentativi della sismicità di *background* ma poco di tutto lo spettro della sismicità registrabile nell'area.

3.4 Analisi della sismicità registrata nel periodo di sperimentazione: 2018-2019

Durante il periodo di sperimentazione degli ILG nella concessione di coltivazione idrocarburi di "Mirandola", l'attività svolta dall'INGV in qualità di SPM ha portato all'analisi e alla localizzazione di 49 eventi sismici tra il gennaio 2018 e il dicembre 2019. La maggior parte dell'analisi della sismicità è stata effettuata in modalità *offline*, dopo aver analizzato i dati e i bollettini sismici forniti dal concessionario e dopo averli confrontati con i bollettini emessi dall'INGV per la Rete Sismica Nazionale. Come anticipato (Sezione 3.1), nel dicembre 2018, Eni, su richiesta di Società Padania Energia, ha provveduto ad un parziale rinnovo della strumentazione e del sistema di acquisizione delle 4 stazioni della rete locale, in modo da permettere una registrazione del dato sismico in continuo e migliorare la sincronizzazione dei tempi di registrazione via GPS. A partire dal luglio 2019 i dati della rete sismica di Cavone, con le 4 stazioni CORR, ROCC, ROVE e SGIA sono acquisiti in tempo reale

dalla SPM, come anche quelli delle stazioni della rete sismica nazionale prese ad integrazione della rete VO.

La sismicità analizzata è stata localizzata, come descritto nelle precedenti sezioni utilizzando il *software* di localizzazione HYPOELLIPSE (Lahr, 1999) e il modello di velocità 1-D Eni, la lista degli eventi viene riportata in forma di bollettino insieme a tutti i parametri calcolati in Tabella 3.5. Riportiamo anche la M_L presente su LabCavone (in nero) o come stimata secondo la relazione M_L - M_W presentata nella Sezione 3.3.1 [Eq.1] e basata sui dati passati, quando l'evento non compare nel bollettino del concessionario (in rosso).

N	DATA ORA	LON	LAT	Z (km)	M_W	PGA (%g)	PGV (cm/s)	M_L
1	2018 03 03 20:12	11.1507	44.8317	7.82	2.208	0.020	0.006	1.4
2	2018 03 04 14:37	11.0108	44.8870	5.68	2.253	0.020	0.01	1.3
3	2018 03 07 15:10	11.1457	44.8448	6.86	2.305	0.102	0.02	1.6
4	2018 05 27 03:31	10.9633	44.8867	5.11	1.992	0.010	0.003	1.2
5	2018 08 03 21:14	10.9485	44.8915	5.44	1.9774	0.082	0.007	1.3
6	2018 08 05 04:07	10.9523	44.8928	4.11	1.9774	0.010	0.002	1.3
7	2018 08 27 04:08	10.9972	44.8845	5.93	1.953	0.031	0.006	1.1
8	2018 09 12 13:29	10.9740	44.8902	4.7	2.569	0.153	0.04	1.8
9	2018 09 15 20:00	10.9847	44.8918	5.54	2.065	0.102	0.01	1.5
10	2018 10 23 14:11	11.0147	44.8825	4.46	2.0512	0.306	0.1	1.4
11	2018 11 24 02:04	10.9242	44.8932	5.47	1.963	0.091	0.01	1.7
12	2018 11 25 23:32	11.0232	44.8327	10.35	2.236	0.051	0.05	1.5
13	2018 12 11 19:24	11.0733	44.8943	6.98	2.307	0.041	0.04	1.5
14	2019 01 10 23:53	10.9607	44.8927	0.27	1.33	0.008	0.0008	0.5
15	2019 01 17 01:03	10.9275	44.8865	6.89	1.67	0.008	0.0013	0.9
16	2019 01 19 10:16	11.0187	44.9605	1.79	1.34	0.005	0.001	0.8
17	2019 03 03 15:21	11.0512	44.8780	5.39	1.95	0.076	0.0127	1.4
18	2019 03 03 16:08	11.0398	44.8560	5.3	2.09	0.010	0.0012	1.6
19	2019 03 07 02:30	11.0327	44.8617	5.94	1.79	0.036	0.0046	1.1
20	2019 03 13 14:22	11.2145	44.8447	18.21	2.79	0.086	0.0202	2.8
21	2019 03 23 03:53	10.9770	44.8807	5.88	1.4	0.006	0.001	0.6

22	2019 03 27 16:36	10.5940	44.8362	20.25	2.34	0.011	0.0029	2.0
23	2019 05 04 23:01	11.2380	44.8582	17.1	2.41	0.011	0.0032	2.2
24	2019 05 12 15:24	11.1037	44.8957	10.75	1.89	0.014	0.0016	1.3
25	2019 05 28 20:07	11.0153	44.8805	5.73	1.78	0.046	0.0058	1.2
26	2019 06 16 10:49	10.9988	44.8593	7.11	1.78	0.019	0.0027	1.1
27	2019 06 18 00:57	11.0137	44.8582	7.65	1.79	0.016	0.0018	1.2
28	2019 06 18 22:26	11.0202	44.8763	5.68	1.73	0.046	0.0052	1.1
29	2019 06 30 17:49	11.0242	44.8768	5.42	2.25	0.235	0.0492	1.9
30	2019 06 30 22:59	11.0233	44.8752	5.26	2.05	0.133	0.0243	1.6
31	2019 07 13 04:18	10.9245	44.8928	5.41	1.79	0.210	0.0165	1.2
32	2019 07 15 05:48	10.8757	44.8688	9.12	2.32	0.051	0.0102	2.0
33	2019 07 18 00:13	10.6917	44.8217	11.11	2.34	0.007	0.0011	2.2
34	2019 07 20 21:08	10.9245	44.8898	5.43	1.87	0.042	0.0041	1.3
35	2019 07 27 11:11	10.9398	44.8895	6.31	2.22	0.092	0.0145	1.8
36	2019 07 27 11:12	10.9437	44.8950	6.45	2.21	0.109	0.017	1.8
37	2019 07 31 22:49	11.0233	44.8197	8.63	1.98	0.014	0.0023	1.5
38	2019 08 18 20:23	10.9723	44.8917	5.58	1.61	0.014	0.0023	0.9
39	2019 08 26 04:01	10.8762	44.8667	8.98	1.87	0.032	0.0049	1.3
40	2019 09 03 00:48	11.0017	44.8730	5.81	1.63	0.012	0.0013	0.9
41	2019 09 03 02:49	11.0177	44.8710	6.13	1.97	0.016	0.002	1.4
42	2019 09 18 19:59	10.9062	44.8888	8.77	1.82	0.013	0.0024	1.2
43	2019 09 18 20:00	10.9042	44.8892	8.91	1.59	0.014	0.001	0.9
44	2019 10 01 21:29	11.0300	44.8767	5.39	1.69	0.018	0.0028	1.0
45	2019 10 04 13:23	11.3345	44.8995	11.21	2.83	0.017	0.005	2.8
46	2019 10 31 08:22	11.0410	44.9650	13.89	2.97	0.03	0.0121	3.0
47	2019 11 25 00:03	10.9127	44.8883	5.6	1.47	0.019	0.0022	1.0
48	2019 12 03 08:42	10.9218	44.9023	6.91	1.59	0.03	0.0031	1.1
49	2019 12 18 18:07	11.2583	44.8502	11.36	2.48	0.020	0.0052	2.3

Tabella 3.5. Tabella degli eventi sismici localizzati dalla SPM nel periodo 2018-2019. Oltre al numero ordinale e al tempo di accadimento dell'evento, vengono riportate latitudine, longitudine, profondità (in km), magnitudo M_w e massimo dei valori di picco in accelerazione e velocità (PGA e PGV rispettivamente). Le caselle evidenziate in azzurro (verde) sottolineano eventi localizzati all'interno del DI (DE). L'ultima colonna riporta la M_L presa da LabCavone (in nero) o stimata in base alla relazione M_L - M_w (in rosso).

Nonostante alcune stazioni IV si siano dimostrate troppo lontane per questo tipo di sismicità di bassa energia in terreno alluvionale (FERS, MNTV e OPPE non hanno registrato nessuno degli eventi, e FIU soltanto uno), l'analisi dei dati sismici provenienti dalla rete integrata (VO+IV) ha permesso una localizzazione più accurata degli eventi rispetto all'utilizzo della sola rete locale. Dei 49 eventi analizzati, la maggior parte (32 eventi, corrispondenti al 65% del totale, evidenziati con caselle azzurre in Tabella 3.5) si localizza entro l'area del Dominio Interno (linea blu in Figura 3.18), quasi un terzo di questi (9 su 32) mostra una $M_L \geq 1.5$ (ma < 2.2): soglia definita a puro titolo indicativo negli ILG per il passaggio al livello di attivazione 1, di Attenzione (semaforo giallo). Al contrario, per nessuno degli eventi localizzati internamente al DI (e tantomeno esternamente) vengono superate le soglie di PGA e PGV (cfr. ILG). Dei restanti eventi sismici, 10 sono compresi nel Dominio Esteso (caselle verdi in Tabella 3.5 e linea verde in Figura 3.18), e 7 sono invece esterni ai domini di rilevazione definiti dagli ILG (tutti con $M_L \geq 2.2$).

Ci preme sottolineare come la lista degli eventi del 2018-2019 riportata in Tabella 3.5, non costituisca un catalogo omogeneo a causa dell'aggiornamento della rete sismica locale a dicembre 2018. Questo ha comportato che per il primo anno di sperimentazione abbiamo potuto analizzare solamente i dati dei *trigger*, ovvero quelli dei terremoti vicini alle stazioni VO, mentre per il 2019 abbiamo potuto ricercare nel segnale in continuo anche gli eventi esterni ai domini di rilevazione definiti per Cavone (e infatti eventi esterni ai due domini di rilevazione sono presenti solo nel 2019).

Gli eventi n.16 e n.48 non sono presenti in nessun bollettino (né LabCavone, né INGV) in quanto la loro localizzazione è stata possibile, in un secondo tempo, solo grazie alla rete integrata (VO+IV), tanto che non sono presenti nemmeno nelle relazioni trimestrali perché rilevati in fase di riesame della sismicità.

Per il calcolo della magnitudo momento M_W abbiamo potuto approfittare delle conoscenze acquisite grazie all'analisi della sismicità registrata dal 2010 al 2018 (Sezione 3.3), infatti la tecnica applicata (Munafò et al., 2016) non si sarebbe potuta utilizzare senza un *dataset* corposo di eventi.

PGA e PGV sono state stimate come il massimo valore ottenuto fra tutte le stazioni e le tre componenti dalle registrazioni sismiche per ogni evento (si veda Sezione 3.3.2). Dato che tutte le stazioni prese in considerazione sono dei velocimetri abbiamo potuto fare il calcolo diretto della PGV dal segnale, previa correzione strumentale, mentre per la PGA abbiamo dovuto derivare la serie temporale in velocità per ottenere l'andamento corrispondente in accelerazione.

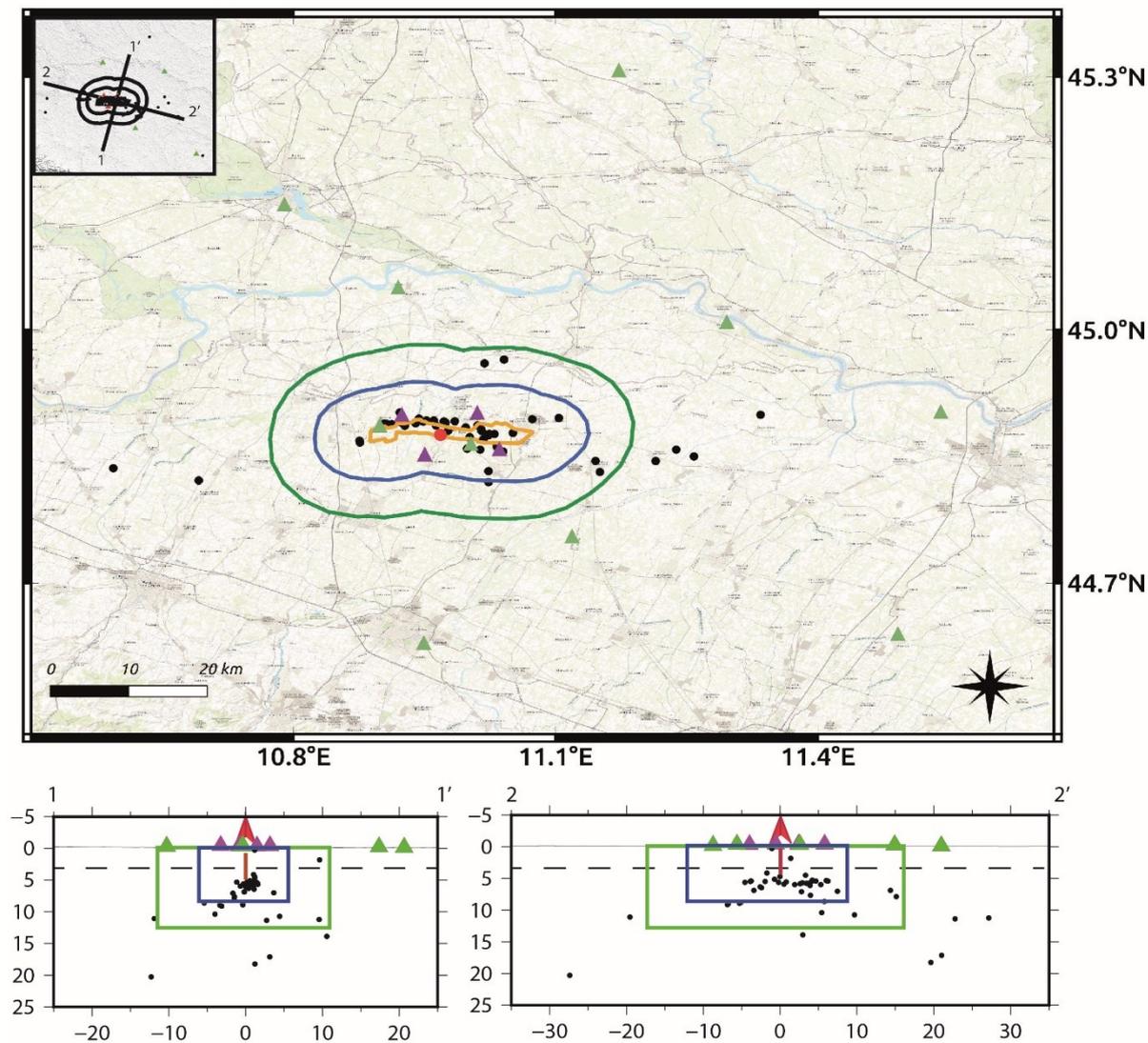


Figura 3.18. Mappa della sismicità e sezioni verticali dei 49 eventi sismici localizzati dalla SPM nel periodo 2018-2019. I triangoli verdi rappresentano le stazioni della rete IV. I triangoli viola rappresentano le stazioni della rete VO. La freccia rossa in sezione (cerchio rosso in mappa) rappresenta il pozzo *Cavone14*, con il segmento rosso che indica la profondità di iniezione (~3 Km). I contorni giallo, blu e verde rappresentano rispettivamente la proiezione del giacimento in superficie (linea tratteggiata in profondità), l'estensione di DI e DE.

3.4.1 Prestazioni effettive della rete

La mappa di Figura 3.18 mostra le localizzazioni degli eventi individuati in questi due anni di sperimentazione. Sebbene la loro distribuzione spaziale non permetta una chiara interpretazione di carattere sismotettonico, la posizione degli ipocentri dei terremoti ricalca quella degli eventi passati legati alla presenza delle strutture a pieghe e sovrascorrimenti presenti in direzione O-NO/E-SE, ma soprattutto alla densità delle stazioni sismiche presenti. La maggior parte degli eventi è localizzata, infatti, internamente alla proiezione superficiale del giacimento, dove la densità di stazioni è certamente maggiore.

L'analisi della magnitudo di completezza su questo breve catalogo di 49 eventi registrati tra il 2018 e il 2019 non approda a nessun valore stabile per M_L (Figura 3.19a), in quanto a seconda dell'algoritmo usato (Marzocchi et al, 2015; Wiemer and Wyss, 2000; Woessner and Wiemer, 2005) la M_C varia da $M_L=0.9$ a $M_L=1.2$ a $M_L=2$. Dovendo testare la rispondenza ai requisiti elencati negli ILG calcoliamo una magnitudo di completezza M_C come la media dei 3 valori ottenuti e quindi pari a $M_L=1.4$, valore superiore a 1 contrariamente a quanto specificato al punto 1 dei requisiti della rete di monitoraggio (ILG, 2014). Per la magnitudo momento, in modo analogo, non si trova convergenza ad un valore di magnitudo di completezza. Abbiamo provato a ridurre la precisione con cui abbiamo stimato la M_W al primo decimale (così da diminuire la variabilità del dato di input), in questo modo tutti e tre gli algoritmi sopra citati sono concordi nell'assegnare valore di M_C per $M_W=2$ (Figura 3.19b), in accordo con le stime teoriche basate sul livello di rumore registrato alle stazioni della rete (Sezione 3.2.2) e con il valore ottenuto per i dati passati (Sezione 3.3.1).

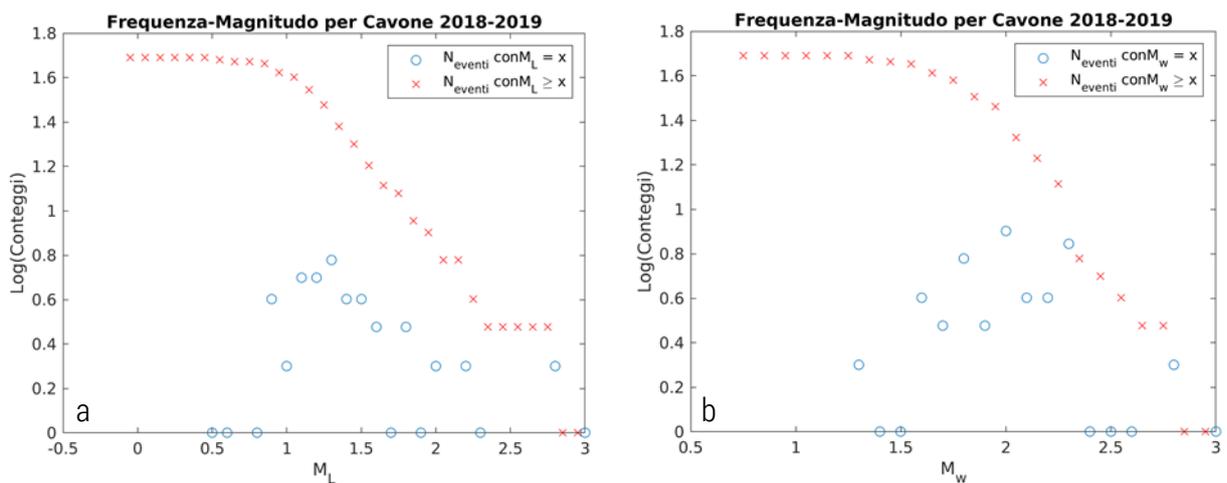


Figura 3.19. a) Grafico frequenza-magnitudo M_L per i dati del 2018-2019. b) Grafico frequenza-magnitudo M_W per i dati del 2018-2019. I valori di magnitudo di completezza M_C così come quelli del parametro b non vengono indicati perché variabili a seconda del metodo utilizzato per stimarli e quindi poco affidabili.

Preferiamo non calcolare il valore del parametro b su questi eventi a causa del loro numero esiguo, che non consente di ottenere risultati stabili in termini di soglia di completezza (parametro importante nella stima di b).

4. Monitoraggio delle deformazioni del suolo da stazioni GPS in continuo

Una stazione di misura GPS continua, o più in generale una stazione *Global Navigation Satellite System* (GNSS) quando questa è in grado di registrare i segnali trasmessi da molteplici costellazioni di satelliti di posizionamento (es., GPS, Glonass, Galileo, ecc.), permette di ottenere una misura dell'evoluzione nel tempo della posizione di un punto sulla superficie terrestre con precisione millimetrica. Lo studio delle serie temporali di spostamento di stazioni GNSS è di fondamentale importanza in diverse applicazioni, che vanno dallo studio dei processi tettonici e vulcanici, allo studio di frane, subsidenze e deformazioni indotte da processi antropogenici. Una serie temporale di spostamento ottenuta da una stazione GNSS contiene segnali di diversa natura, derivanti da processi che agiscono su diverse scale spaziali e temporali. Il più importante di questi segnali, per applicazioni nel campo della geodinamica e della tettonica attiva, è la componente lineare (o velocità di spostamento), che descrive il tasso con cui la stazione si sposta nelle componenti planari (Est e Ovest) e nella componente verticale, in un determinato sistema di riferimento. L'accuratezza e la precisione di questa misura dipendono dalla qualità del dato registrato dalla stazione, dalla lunghezza della serie temporale analizzata e dalla presenza e ampiezza di altri segnali stagionali e non stagionali.

Questa sezione descrive i risultati ottenuti dall'analisi dei dati registrati dalla stazione di Cavone (CAVO), installata nella concessione di coltivazione idrocarburi "Mirandola", effettuata utilizzando elevati standard di elaborazione e post-processamento con lo scopo di inquadrare lo spostamento del suolo registrato da questa stazione nello stesso sistema di riferimento delle altre stazioni GNSS/GPS attive nell'area italiana, e più in generale dell'area euro-mediterranea, analizzate all'INGV (es., Devoti et al., 2017). I dati di CAVO nell'intervallo temporale 19 dicembre 2018 - 31 dicembre 2019 sono stati processati utilizzando un *software* scientifico che garantisce le più elevate precisioni, e fornisce la serie temporale di spostamento, definita in un sistema di riferimento globale internazionale, al fine di stimare diversi parametri.

4.1 La stazione GPS di Cavone

La stazione GNSS di Cavone è stata installata il 19 dicembre 2018 dalla società TRE ALTAMIRA S.r.l.. In Figura 4.1 viene mostrata un'immagine del sito di installazione per CAVO e la posizione delle stazioni GNSS attive, per le quali è riportata la sigla in figura, e non attive, entro un raggio di 50 km da Cavone. La stazione attiva più vicina

è CONC (Concordia sul Secchia) della rete NetGeo, gestita da Topcon Positioning Italy S.r.l., posta a circa 6 km di distanza. La seconda stazione più vicina è SBPO (San Benedetto Po) che fa parte della rete RING dell'INGV, posta a circa 20 km da Cavone. In Figura 4.2 viene mostrata la posizione della stazione CAVO rispetto alle altre stazioni GPS/GNSS in Italia settentrionale, gestite da enti di ricerca pubblici (es., INGV, OGS), enti locali (regioni) e privati (es, Leica-Geosystem S.p.A. e Topcon Positioning Italy). La stazione CAVO è dotata di un ricevitore "TRIMBLE NETR9", per il quale sono forniti solo le osservabili GPS e di una antenna, di tipo *choke-ring*, "TRM59900.00 Ti", non dotata di duomo. Per questa coppia antenna-duomo esiste una calibrazione assoluta del centro di fase (<ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>), utilizzata per l'elaborazione dei dati. L'antenna è stata monumentata su un palo in acciaio (Figura 4.3), sotto il quale è stato realizzato un *corner-reflector* per correlare gli spostamenti registrati dalla stazione GNSS con quelli misurati dai dati SAR, ancorati su una platea in cemento, come da "Relazione di Aggiornamento sulla Sperimentazione degli ILG nella Concessione Mirandola" del febbraio 2019 (presentata dal concessionario al comitato operativo in data 20/02/2019).



Figura 4.1. Posizione della stazione GNSS di Cavone, in giallo (a) e distanza dalle stazioni GNSS attive (di cui sono indicati i nomi) più vicine, dove in blu è riportata l'estensione del giacimento (b).

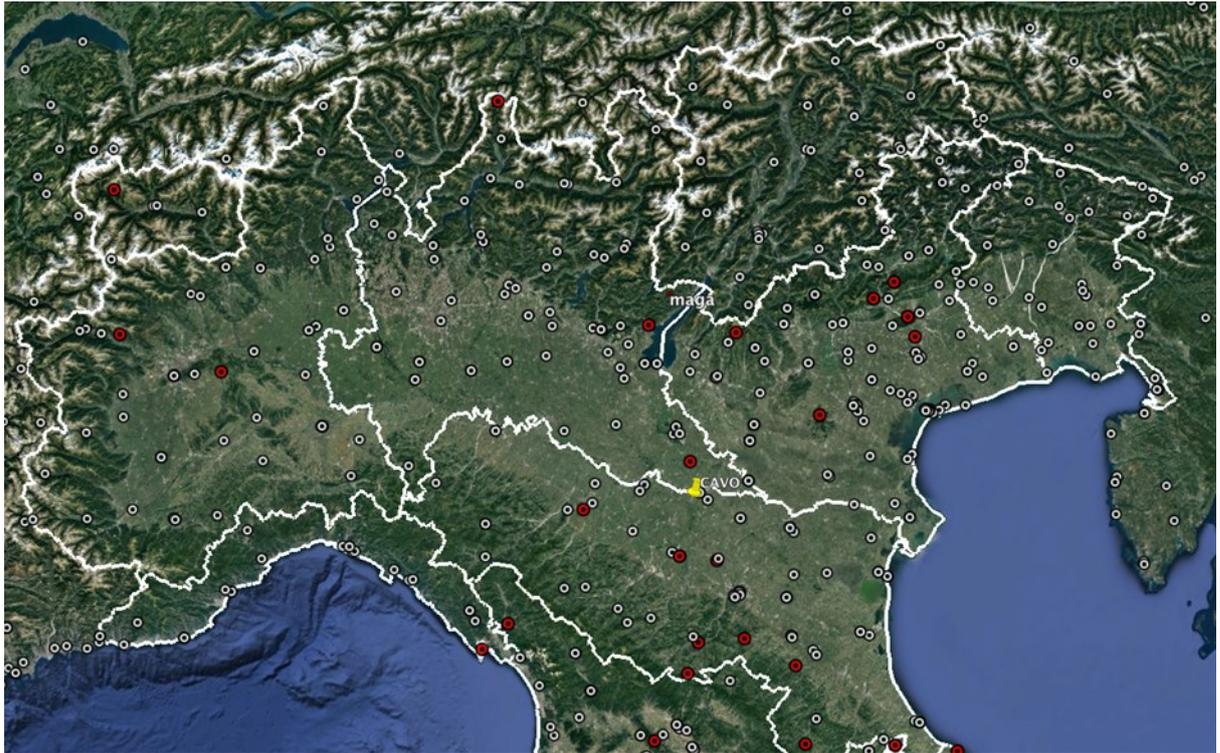


Figura 4.2. Posizione della stazione di Cavone (in giallo) rispetto ad altre stazioni GNSS attive in Italia settentrionale ed afferenti a diverse reti (In rosso le stazioni della RING dell'INGV).

Figura 4.3. Foto della stazione GNSS di Cavone, presa dalla "Relazione di Aggiornamento sulla Sperimentazione degli ILG nella Concessione Mirandola", del febbraio 2019.



4.1.1 Analisi della qualità dei dati

I dati RINEX giornalieri della stazione CAVO sono stati analizzati con il *software* TEQC (<http://facility.unavco.org/software/teqc>), che rappresenta uno standard internazionale per il trattamento in fase di pre-processamento di dati GPS e per la valutazione della loro qualità. A questo scopo, gli indici principalmente utilizzati sono i seguenti (in parentesi sono indicati i valori riscontrati su stazioni di buona qualità):

- MP1: *root mean square* (RMS) dato dai *multipath* sulla fase L1, ossia dovuto a riflessioni del segnale radio inviato dai satelliti che influiscono sul corretto calcolo della distanza satellite-ricevitore (0.1-0.5 m);
- MP2: RMS dato dai *multipath* sulla fase L2 (0.1-0.5 m).

Ricordiamo che prendendo come riferimento la rete IGS dell'International GNSS Service (<http://igsceb.jpl.nasa.gov>), il 50% delle stazioni IGS ha valori di RMS per MP1 inferiori a 0.4 m e valori di MP2 inferiori a 0.6 m, mentre 2/3 delle stazioni ha valori di MP1 inferiori a 0.5 m e di MP2 inferiori a 0.75 m. In Figura 4.4 è mostrato l'andamento nel tempo dei valori di MP1 e MP2 della stazione CAVO nell'intervallo di tempo considerato in questa analisi: 19 dicembre 2018 - 31 dicembre 2019. In generale, i valori di MP1 e MP2 dei dati analizzati indicano una stazione di buona qualità, risultando inferiori a 0.4 m e rimanendo costanti nel tempo. Inoltre, la stazione mostra una ottima continuità del dato.

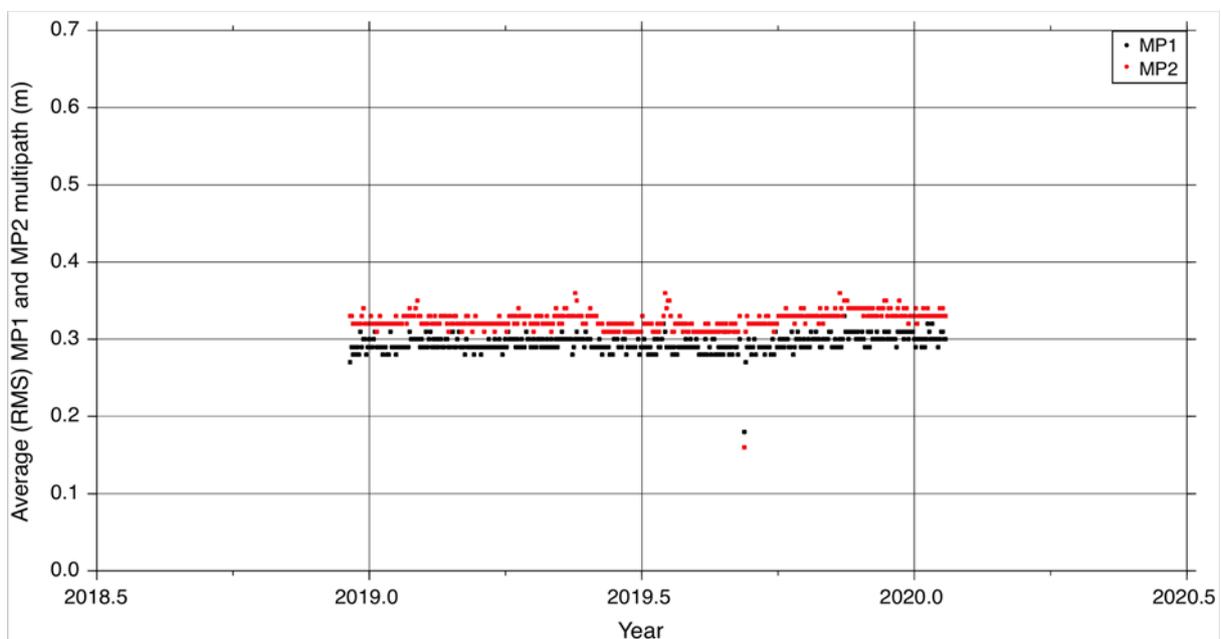


Figura 4.4. Andamento dei valori di MP1 (in nero) e MP2 (in rosso) ottenuti dall'analisi dei dati RINEX della stazione CAVO con il *software* TEQC.

4.1.2 Elaborazione dei dati

I dati giornalieri in formato RINEX sono stati analizzati seguendo una procedura basata su tre diversi passaggi, come descritto in Serpelloni et al. (2006, 2013, 2018), che consiste in: 1) analisi delle fasi, ossia delle osservazioni registrate dalle stazioni GPS di una sotto-rete che include CAVO più altre stazioni GPS permanenti della rete EUREF e IGS (usate poi per combinare le soluzioni di questa sotto-rete con quelle delle altre sotto-reti elaborate all'INGV) e realizzazione di una soluzione di rete debolmente vincolata (posizioni, orbite, ecc...), 2) combinazione delle soluzioni giornaliere della sotto-rete in questione con le soluzioni di altre sottoreti processate all'INGV e allineamento delle soluzioni al sistema di riferimento IGS14 e 3) analisi delle serie temporali per la stima delle velocità di spostamento e delle incertezze. In dettaglio:

- 1) In questa fase è stato utilizzato il pacchetto GAMIT del *software* per analisi dati GPS scientifico denominato GAMIT/GLOBK (<http://geoweb.mit.edu/gg>), versione 10.70, adottando gli standard definiti nel contesto della campagna di riprocessamento IGS, "Repro2 campaign" (<http://acc.igs.org/reprocess2.html>). Questo *software* è una collezione di programmi sviluppati per analizzare i dati registrati da stazioni GPS (e più in generale GNSS) e stimare le posizioni tridimensionali dei punti a terra e delle orbite dei satelliti, i ritardi troposferici e i parametri di orientazione terrestre (EOPs). GAMIT utilizza diverse combinazioni lineari delle due fasi registrate (L1 e L2) per generare una soluzione ai minimi quadrati pesati per ogni sessione giornaliera. Il prodotto principale del *software* GAMIT è quindi una soluzione debolmente vincolata (cioè non ben definita in un sistema di riferimento) per ogni rete (o sotto-rete) analizzata, contenente un *set* giornaliero di stime di posizioni per ogni sito, i parametri di orientazione terrestre e la matrice di covarianza degli errori associata, oltre ai parametri orbitali e di ritardo troposferico.
- 2) In questa fase è stato utilizzato il *software* GLOBK che permette di combinare diverse soluzioni debolmente vincolate (ottenute dall'analisi con il *software* GAMIT), attraverso un algoritmo basato su un filtro di Kalman, per poi realizzare un'unica soluzione combinata giornaliera definita in un sistema di riferimento comune. Nello specifico, il sistema di riferimento è stato realizzato minimizzando le coordinate e le velocità delle stazioni IGS di riferimento (le cosiddette "*IGS core stations*") incluse nell'analisi stimando i parametri di una trasformazione di Helmert a 7 parametri (3 traslazioni, 3 rotazioni e scala) rispetto alla realizzazione GPS del sistema di riferimento ITRF2014 (Altamimi et al., 2016), noto come IGS14 (<ftp://igs-rf.ign.fr/pub/IGS14>). Il risultato di questo passaggio

sono le posizioni tridimensionali e le incertezze per ogni epoca analizzata, per tutte le stazioni analizzate all'INGV.

- 3) In questa fase le serie temporali delle posizioni delle stazioni, realizzate nel sistema di riferimento IGS14, sono state analizzate al fine di stimare le velocità medie di spostamento nelle tre componenti, Est, Nord e verticale. La variazione della posizione di una stazione GPS nel tempo, $x(t)$, è stata rappresentata con il seguente modello funzionale:

$$f(t_i) = a + bt_i + c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_o} g_j H(t - t_j) + \sum_{j=1}^{n_e} A_j \left[1 - \exp\left(-\frac{t_e}{\tau}\right) \right] + \varepsilon_i \quad [\text{Eq. 3}]$$

dove $[a + bt_i]$ rappresenta il *trend* lineare, a è il *bias* iniziale, b indica la pendenza della serie, cioè la velocità di spostamento, $[c \sin(2\pi t_i) + d \cos(2\pi t_i) + e \sin(4\pi t_i) + f \cos(4\pi t_i)]$ rappresenta la componente stagionale (annuale e semi-annuale, con t_i espresso in anni), la sommatoria in $j \sum g_j H(t - t_j)$ rappresenta invece la correzione per un certo numero di *offset* n_o di ampiezza g_j al tempo t_j descritti tramite una funzione gradino di Heaviside. Anche eventuali salti provocati da eventi co-sismici sono modellati con una funzione di questo tipo. La componente $\sum_{j=1}^{n_e} A_j [1 - \exp(-\frac{t_e}{\tau})]$ rappresenta infine la descrizione del transiente post-sismico, dovuto ad un numero n_e di eventi co-sismici, modellato attraverso un andamento esponenziale di ampiezza A_j e un tempo caratteristico di decadimento τ . Infine ε_i rappresenta la componente di errore casuale.

Vista la lunghezza limitata, non sono state stimate le componenti stagionali, annuale e semi-annuale. Nel caso della stazione di Cavone non sono stati modellati *offset* di natura strumentale, non essendo stati riscontrati cambi di strumentazione nell'intervallo considerato, dall'analisi delle informazioni contenute nelle *header* dei file RINEX. Non sono stati inoltre considerati segnali di natura tettonica (*offset* co-sismici e deformazioni post-sismiche) non essendo avvenuti eventi sismici significativi nell'intervallo di tempo considerato.

Dal momento in cui il *site ID* CAVO (con cui sono stati forniti i file RINEX) è già utilizzato per una stazione della rete NetGeo di Topcon Positioning Italy, elaborata all'INGV, la stazione di Cavone è stata analizzata usando come *site ID* il codice CVNE.

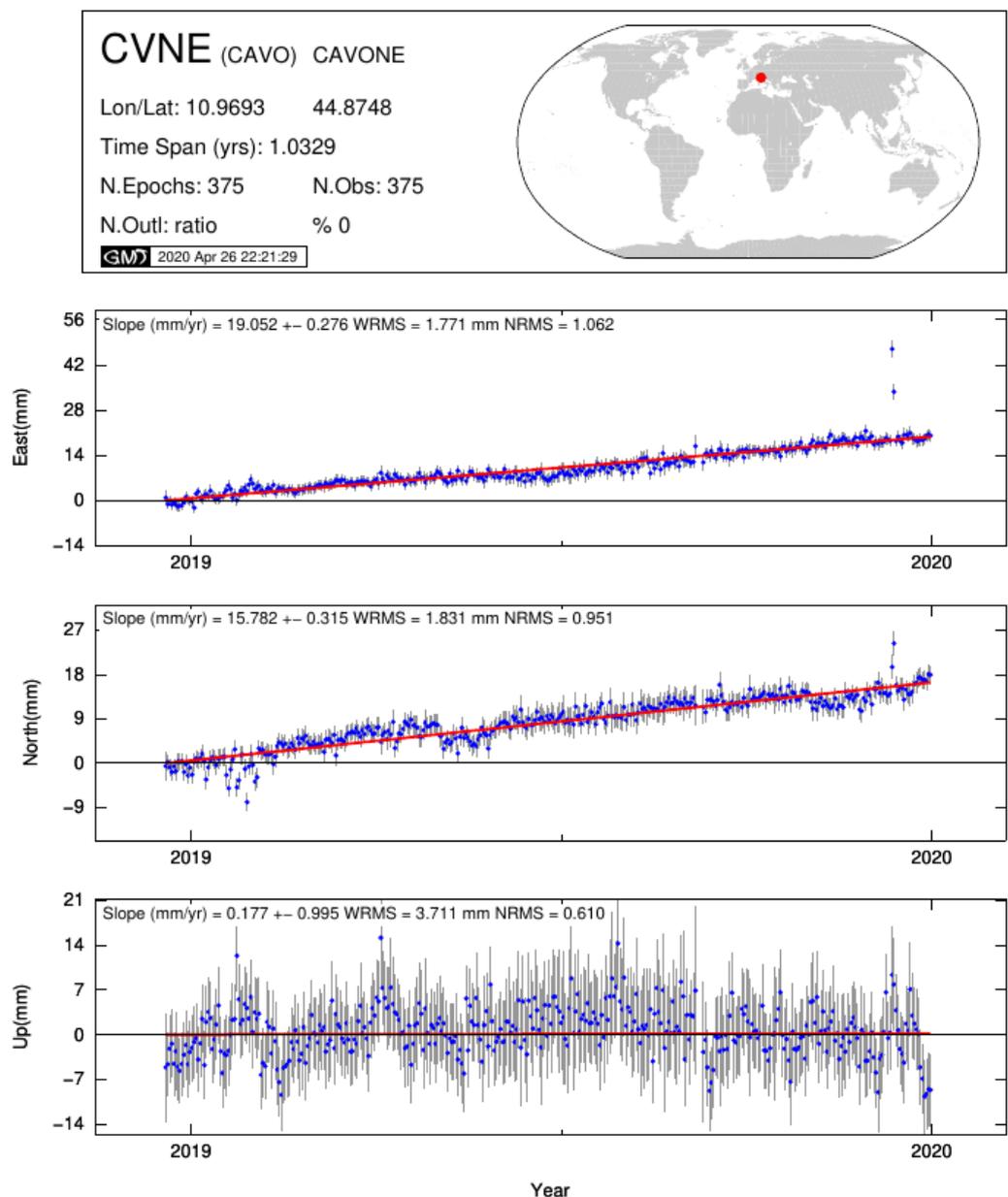
E' importante considerare che la letteratura scientifica concorda nel definire in 2.5 anni la lunghezza minima di una serie temporale GPS per una stima della velocità media non influenzata dai segnali stagionali (Blewitt and Lavallée, 2002), ma questo può non essere vero in caso di evento sismico, se non vengono propriamente modellati i segnali transienti legati al terremoto, oltre al caso in cui siano presenti

altri segnali transienti, anche di natura non-tettonica (es., Serpelloni et al., 2018). Altri lavori più recenti (es., Masson et al., 2019) indicano un intervallo minimo di 4.5 anni per ottenere misure con precisione inferiore al mm/anno nelle componenti orizzontali.

4.2 Risultati: Serie temporali di spostamento

La Figura 4.5 mostra lo spostamento nel tempo (rispetto alle coordinate calcolate al 18 dicembre 2018) della stazione di Cavone nelle componenti Est, Nord e verticale, nel sistema di riferimento IGS14. L'intervallo considerato (~1 anno) non permette una valutazione delle componenti stagionali e una stima accurata della velocità di spostamento nelle tre direzioni.

Figura 4.5. Serie temporale di spostamento della stazione di Cavone (*site ID* nuovo CVNE e *site ID* originale CAVO) nel sistema di riferimento globale IGS 2014. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ). La linea rossa rappresenta il *trend* lineare, come definito in [Eq.3].



4.3 Discussione

In questo rapporto vengono descritte sinteticamente (rimandando alla recente bibliografia scientifica per i dettagli più specialistici e tecnici) le procedure adottate per l'analisi dei dati raccolti dalla stazione GPS di Cavone, CAVO (rinominata CVNE nella fase di processamento), adottando i più elevati standard scientifici internazionali.

La stazione GNSS di Cavone presenta una ottima continuità del dato, oltre a valori dei parametri MP1 e MP2, rappresentativi di disturbi da *multipath*, in linea con le migliori stazioni GPS permanenti analizzate all'INGV. L'analisi dei dati RINEX giornalieri, e la combinazione con soluzioni a scala continentale, ha permesso di calcolare le coordinate e gli spostamenti tridimensionali della stazione nel sistema di riferimento IGS 2014. La lunghezza della serie temporale analizzata, di circa un anno, non consente di valutare le componenti stagionali. E' apprezzabile, tuttavia, la presenza di una oscillazione di periodo semi-annuale nelle componenti orizzontali. Le velocità stimate da un *fit* lineare delle tre componenti di spostamento, i cui valori sono riportati in Figura 4.5, non possono considerarsi accurate.

Tenendo conto della posizione della stazione rispetto il giacimento e rispetto alle altre stazioni GNSS attualmente attive in zona (Figura 4.1), sarebbe opportuno prevedere un ampliamento della rete GNSS. Infatti secondo le raccomandazioni degli ILG per il monitoraggio geodetico, deve essere installata una *"rete locale GPS di stazioni permanenti di precisione, distribuite opportunamente in funzione dell'estensione e delle caratteristiche dell'area da monitorare [...] si richiede che le stazioni abbiano inter-distanze inferiori a 10-15 km"*. al momento non è presente una vera e propria rete locale, ma soltanto un unico sito, più una stazione gestita da Topcon Italia collocata a ~6 km di distanza in direzione NNE da quella locale di Cavone. Data l'estensione del giacimento (di circa 15 km) in prevalenza lungo la direzione Est-Ovest, sarebbe necessaria l'installazione di almeno tre siti di monitoraggio aggiuntivi. In particolare la rete dovrebbe prevedere una stazione verso l'estremità Est del *reservoir*, un'altra posta all'estremità Ovest e una terza a Sud del giacimento. Questa geometria permetterebbe di avere misure accurate dei segnali di deformazione locale sia lungo la direzione Nord-Sud sia lungo la direzione di estensione del giacimento.

5. Analisi InSAR

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo da interferometria SAR (InSAR) nella concessione di coltivazione idrocarburi "Mirandola", con particolare riferimento all'area del giacimento di Cavone, è stato commissionato dalla Società Padana Energia alla TRE ALTAMIRA ed effettuato mediante l'utilizzo della tecnica multi-passaggio SqueeSAR™ (Ferretti et al., 2011) applicata ad immagini in banda C acquisite dalle missioni Radarsat-1/2 dell'Agenzia Spaziale Canadese (CSA) e Sentinel-1 dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA).

I dati utilizzati coprono l'intervallo temporale 2008-2018, conformemente a quanto riportato negli ILG, che raccomandano *"l'utilizzo di misure InSAR effettuate su dati di archivio acquisiti possibilmente negli ultimi 15-20 anni, e comunque relativi almeno agli ultimi 10 anni,"*.

La principale differenza tra i dati Radarsat e Sentinel-1 consiste nell'accessibilità al dato stesso. Diversamente dai dati Radarsat, le immagini acquisite dalle missioni Sentinel-1 dell'ESA sono gratuite e facilmente accessibili online e costituiscono quindi un importante strumento sia ai fini di ricerca scientifica che di fornitura di servizi basati su dati satellitari.

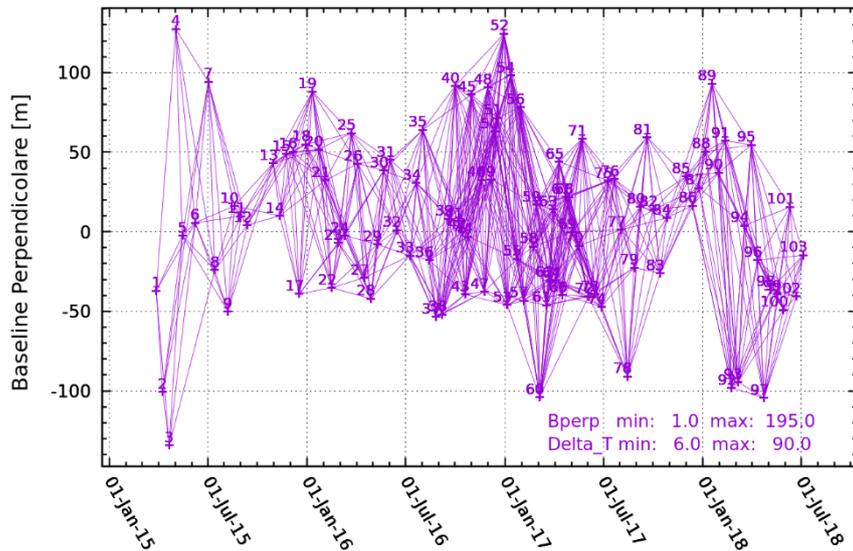
Per questo motivo l'INGV, in qualità di SPM, si è avvalso dell'utilizzo dei prodotti forniti dalle missioni Sentinel-1 per la validazione dei risultati mostrati dal concessionario. Mostriamo nel seguito i risultati del processamento mediante la tecnica interferometrica multi-passaggio nota come *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA, Werner et al., 2003).

5.1 Dataset

Il *dataset* Sentinel-1 elaborato consiste di 103 immagini acquisite in orbita discendente con un angolo di incidenza di circa 39° ed un angolo di azimuth di circa 14°. L'intervallo temporale coperto va da marzo 2015 a luglio 2018, coerentemente con quello del *dataset* Sentinel-1 fornito dal concessionario. I dati sono stati mediati spazialmente a circa 90 m per ridurre lo *speckle noise* applicando fattori di *multilook* di 24 per la direzione *range* e 6 per la direzione azimuth. La componente topografica è stata rimossa mediante il DEM a 90 m fornito dalla missione SRTM (<https://cgiarcsi.community/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>).

La selezione delle coppie interferometriche è stata effettuata imponendo soglie massime per la *baseline* perpendicolari e temporali pari a 200 m e 90 giorni. Tale scelta ha restituito una fitta rete di 757 interferogrammi mostrata in Figura 5.1.

Figura 5.1. Rete di interferogrammi ottenuta.



Gli interferogrammi calcolati sono stati quindi campionati in corrispondenza di *point target* selezionati con criterio a soglia di coerenza ed è stata utilizzata la *Singular Value Decomposition* per stimare *trend* di deformazione e serie temporali di spostamento.

5.2 Risultati

In Figura 5.2 è mostrata la velocità media di spostamento del terreno lungo la linea di vista del sensore. Come emerso dalla “Relazione di Aggiornamento sulla Sperimentazione degli ILG nella Concessione Mirandola”, non sono presenti evidenti *pattern* deformativi nella zona della concessione di “Mirandola”, rappresentata indicativamente dal poligono rosso. Alcuni fenomeni di subsidenza sono osservati nella zona a Sud-Ovest della concessione con valori che si attestano intorno a 2.5 mm/anno, ma in ogni caso non correlabili alle attività nell’area del giacimento di Cavone.

Figura 5.2. Velocità di spostamento del suolo stimata con dati InSAR Sentinel-1. L’area della concessione di Mirandola è circonscritta dal poligono rosso.

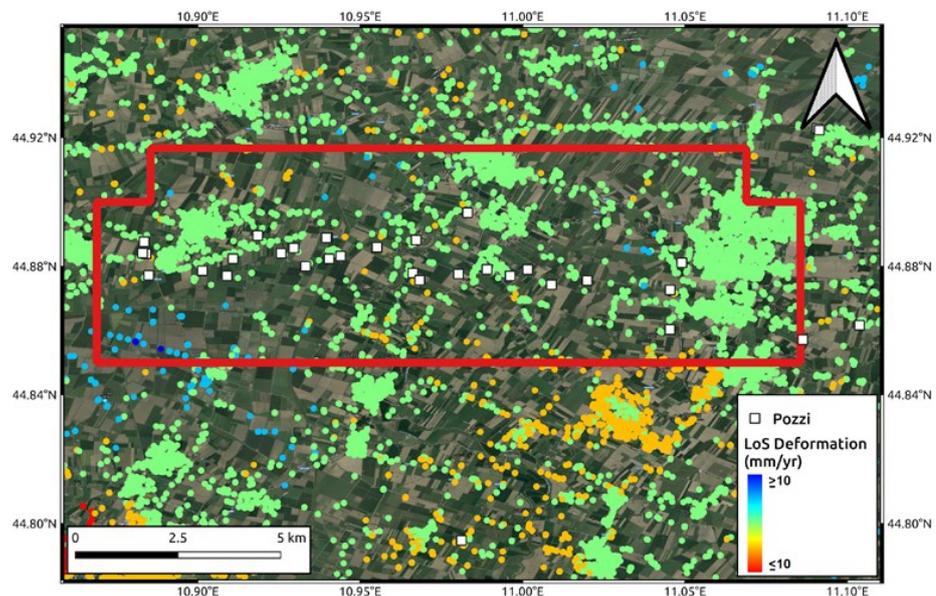
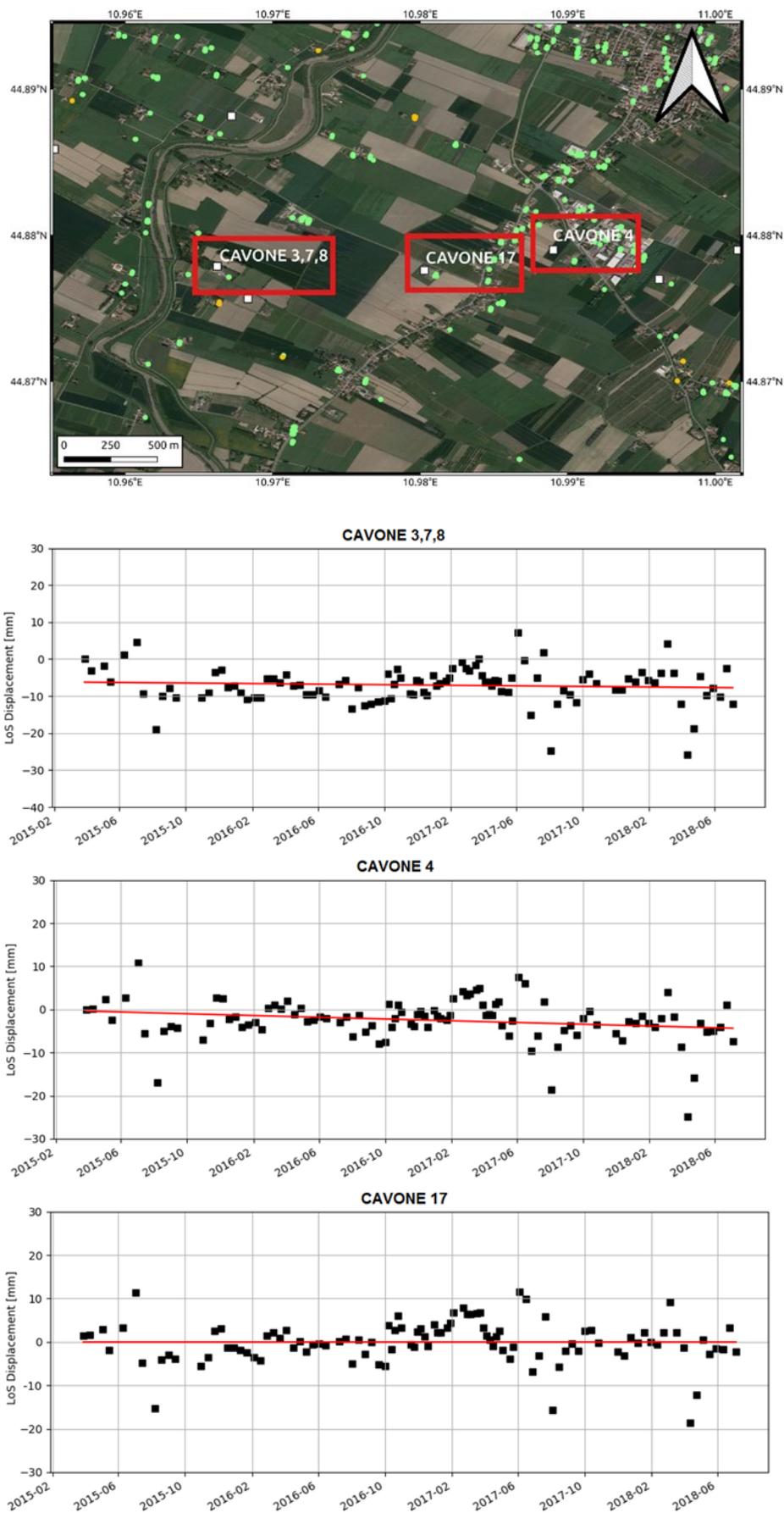
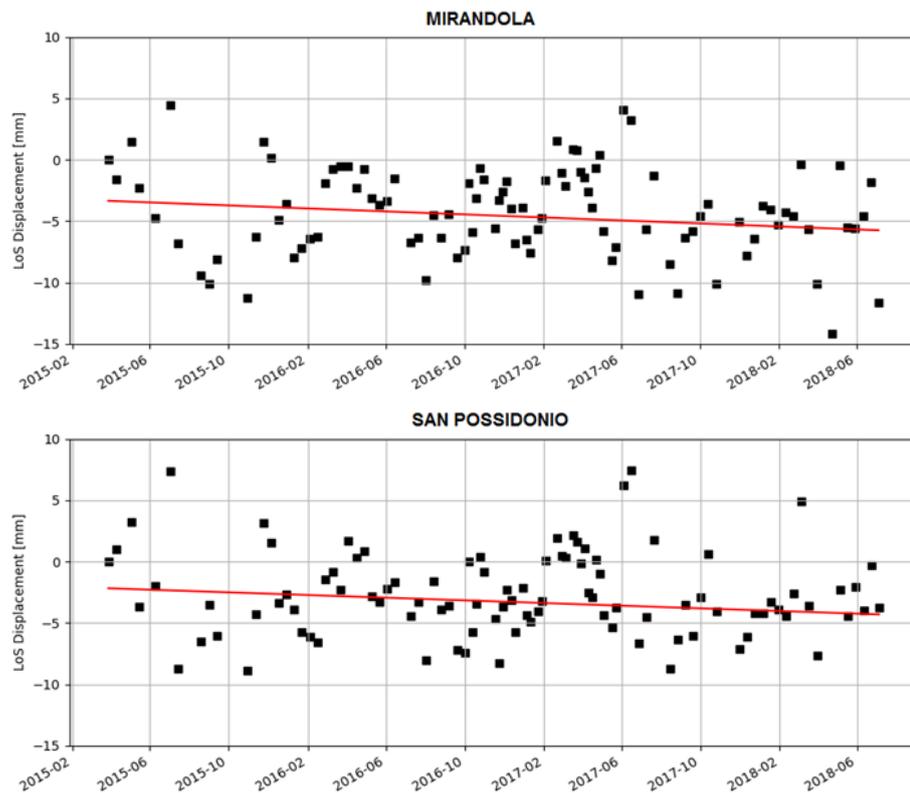


Figura 5.3. Serie Temporali di tre punti all'interno del giacimento, segnalati dai rettangoli rossi nella mappa del pannello superiore.



L'analisi delle serie temporali di alcuni punti in corrispondenza dei pozzi nell'area del giacimento conferma la sostanziale assenza di deformazioni del suolo evidenziata nel *report* (Figura 5.3). I medesimi *trend* di leggera subsidenza con valori inferiori ai 2 mm/anno sono osservati nelle zone di San Possidonio e Mirandola (Figura 5.4), molto probabilmente dovuti a fenomeni locali, come evidenziato anche nei risultati prodotti dalla TRE ALTAMIRA.

Figura 5.4. Serie temporali di due punti nelle aree di Mirandola e San Possidonio che evidenziano un leggero *trend* in subsidenza.



5.3 Confronto con le elaborazioni fornite dal concessionario

Nonostante l'utilizzo di tecniche differenti i risultati hanno mostrato consistenza tra loro in termini di *trend* e serie storiche di deformazione del terreno.

L'elaborazione realizzata dalla SPM-INGV e qui presentata, è stata agganciata ad una stazione GPS situata a Bologna in una zona in cui non si rilevano deformazioni significative in modo tale da avere un riferimento stabile per il calcolo delle deformazioni.

Tale analisi ha confermato la sostanziale mancanza di deformazioni del suolo potenzialmente indotte dalle attività di estrazione e re-iniezione in atto nel giacimento di Cavone, in accordo con quanto documentato nella "Relazione di Aggiornamento sulla Sperimentazione degli ILG nella Concessione Mirandola" presentata dal concessionario il 20/02/2019.

È importante rimarcare come l'analisi InSAR effettuata dall'INGV sia del tutto indipendente da quella della TRE ALTAMIRA e differente nella modalità di trattamento del dato. L'utilizzo di algoritmi e parametri di data processing differenti restituiscono tuttavia risultati e valori misurati coerenti tra loro validandone e rafforzandone l'affidabilità.

Un unico punto di discussione potrebbe riguardare la scelta del riferimento. Nel *report* della TRE ALTAMIRA il punto di riferimento è posto all'interno della stessa concessione oggetto di studio con il rischio potenziale di mascherare o sotto/sovrastimare eventuali deformazioni in atto all'interno dell'area. La consistenza tra le due elaborazioni ha di fatto confermato la bontà di entrambi i riferimenti scelti, tuttavia maggiori dettagli sui criteri adottati nella scelta del riferimento potrebbero aiutare a comprendere al meglio la fenomenologia studiata.

6. Analisi pressioni di poro/dati di produzioni

Le attività produttive del centro olio sono condotte a un ritmo piuttosto costante, in particolare per il periodo di sperimentazione 2018-2019, a parte un fermo di tutto l'impianto causa intervento di manutenzione dal 16 luglio al 16 novembre 2018, i grafici dei volumi di olio e acqua estratti, così come quelli dei volumi di acqua di strato e delle pressioni alla quale questa viene iniettata al pozzo *Cavone14*, mostrano andamenti abbastanza regolari nel tempo (Figura 6.1). Si nota come i valori massimi di pressione di re-iniezione si mantengano inferiori ai massimi valori analizzati da Astiz et al., (2014) e Juanes et al., (2016) per la modellazione fluidodinamica e geomeccanica.

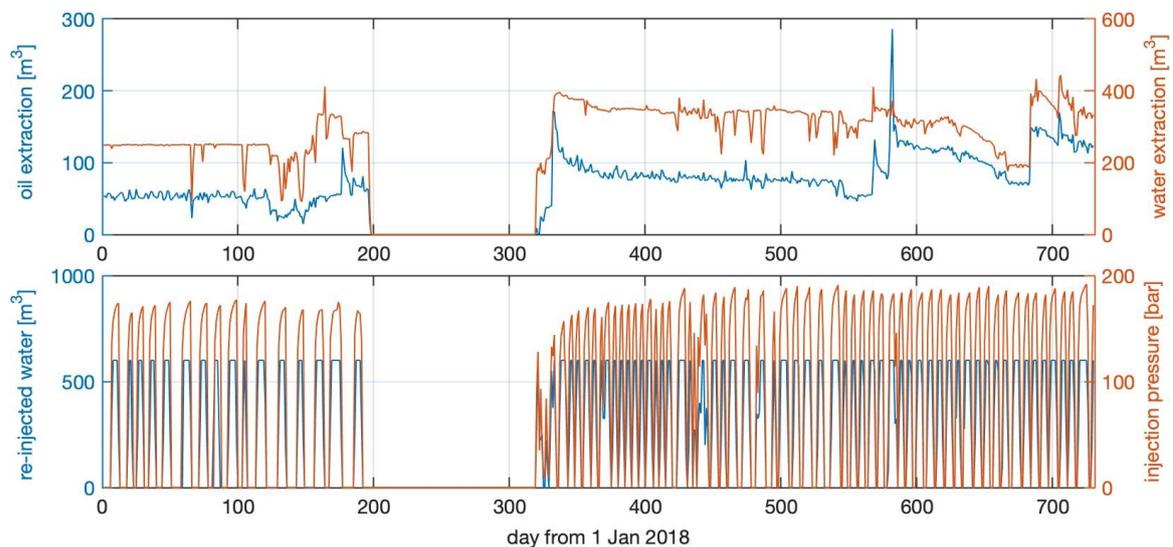


Figura 6.1. Andamento temporale dei volumi di olio e acqua estratti (in m^3 , pannello superiore) e del volume (in m^3) e pressione (in bar) di re-iniezione dell'acqua di strato (pannello inferiore).

L'occorrenza temporale degli eventi sismici localizzati all'interno del DI viene mostrata nel grafico di Figura 6.2 sia rispetto ai valori di Magnitudo (M_L e M_W , pannello superiore) che dei valori di picco (PGA e PGV, pannello inferiore). Gli eventi con magnitudo superiore alla soglia di completezza ($M_C=2$) in M_W (unica scala di magnitudo da cui si ottiene un valore stabile) sono evidenziati da un cerchio nero. Il catalogo completo degli eventi interni al DI (rispetto alla distribuzione delle magnitudo) è composto da soli 10 terremoti: un numero particolarmente esiguo per qualsiasi valutazione statistica. Volendo comunque verificare se il tasso di occorrenza della sismicità mostri variazioni significative in concomitanza con le variazioni dell'attività industriale, scegliamo di applicare un test statistico binomiale (es., Wonnacott and Wonnacott, 1977) seguendo l'approccio descritto in

Leptokaropoulos et al. (2018). Si tratta di un test non parametrico applicabile anche a campioni ridotti, utile per valutare la significatività statistica di eventuali variazioni nei tassi di sismicità correlati alle variazioni nei parametri di produzione.

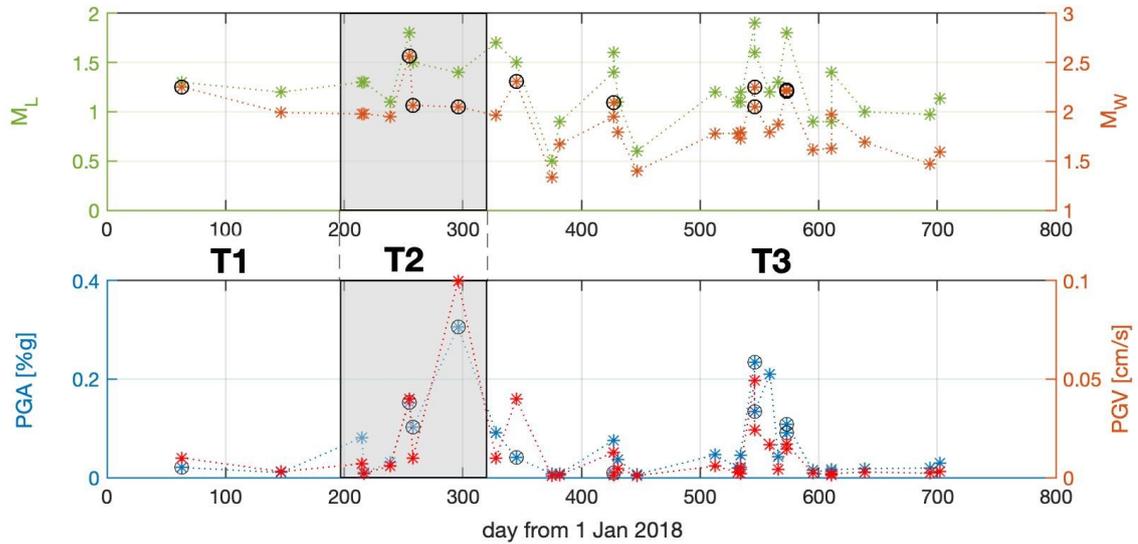


Figura 6.2. Andamento temporale della sismicità localizzata nel DI: valori di magnitudo (M_L e M_W , in alto) e valori massimi di PGA e PGV (in basso) per ognuno dei 32 eventi. Con i cerchi neri vengono evidenziati gli eventi con M_W superiore al valore di completezza. L'area ombreggiata marca il periodo di fermo dell'impianto.

Il test assume che se il tasso di sismicità varia coerentemente con le variazioni dei parametri di produzione al tempo t_0 , ci si aspetta una suddivisione della sismicità totale (N eventi) per l'intero intervallo di tempo $[t_0 - t_1, t_0 + t_2]$ in due parti (n_1 e n_2 , con $n_1 + n_2 = N$) per i due intervalli di tempo t_1 e t_2 con distribuzione del numero di eventi significativamente diversa da quella casuale. Con questa premessa, il test si implementa tramite la formulazione dell'ipotesi nulla (H_0) seguente:

H_0 : (n_2 potrebbe essere ottenuta in modo casuale da N con probabilità π)

dove π è stimata in funzione della ripartizione temporale dei dati, i.e., $\pi = \frac{t_2}{t_1 + t_2}$. Per provare la validità di questa ipotesi usiamo quindi il test binomiale, che ci permette di determinare la probabilità p che, se N eventi accadono in maniera casuale nell'intervallo di tempo $[t_0 - t_1, t_0 + t_2]$, il numero degli eventi nell'intervallo $[t_0, t_0 + t_2]$ sia (a) minore o uguale al valore osservato n_2 , oppure (b) che il numero di eventi sia maggiore o uguale al valore osservato n_2 .

Valori piccoli di p (es., $p < 0.05$) indicano che il tasso di sismicità nell'intervallo di tempo $[t_0, t_0 + t_2]$ è significativamente minore o maggiore del tasso di sismicità nell'intervallo di tempo $[t_0 - t_1, t_0]$, e quindi, statisticamente parlando, esiste una variazione nel tasso di sismicità tra i due intervalli di tempo.

Distinguiamo all'interno del periodo di sperimentazione tre intervalli temporali T1, T2 e T3 corrispondenti al periodo precedente (T1), durante (T2) e seguente (T3) l'interruzione dell'attività industriale. Se il tasso di sismicità fosse correlato con le variazioni di estrazione o iniezione negli intervalli di tempo considerati, allora il numero di eventi sismici avvenuti nei due intervalli temporali precedente (seguente) e durante l'interruzione dovrebbe essere significativamente diverso dal numero che si otterrebbe da una distribuzione casuale degli eventi nell'intervallo di tempo completo. Riportiamo in Tabella 6.1 la definizione dei 3 intervalli temporali con giorni di inizio e fine, durata e numero di eventi avvenuti.

Tabella 6.1. Suddivisione in intervalli temporali del periodo di sperimentazione, a seconda dell'attività industriale. T2 identifica il periodo di fermo degli impianti.

Intervallo	Inizio (giorno)	Fine (giorno)	Durata (giorni)	# eventi
T1	1	196	196	1
T2	197	320	124	3
T3	321	730	410	6

Tabella 6.2. *p-values* risultanti dai test binomiali effettuati confrontando i periodi T1 e T2, e T3 e T2.

TEST	<i>p</i> (tasso minore)	<i>p</i> (tasso maggiore)
T1 - T2	0.97745	0.16510
T3 - T2	0.32744	0.87898

Il test è stato implementato in modo tale da valutare la possibilità che il tasso di sismicità immediatamente dopo la variazione nelle attività industriali (il fermo della produzione tra T1 e T2, e la ripresa delle attività tra T3 e T2) sia significativamente minore o maggiore rispetto all'intervallo di tempo immediatamente precedente. I risultati dei quattro test effettuati sono riportati in Tabella 6.2. In nessun caso i valori di *p* sono abbastanza piccoli da escludere l'ipotesi nulla H_0 , non osservando alcuna variazione significativa del tasso di sismicità tra i due intervalli temporali di volta in volta presi in considerazione. Non si evidenzia perciò nessuna variazione correlata tra l'attività industriale ed i ratei di sismicità analizzati che possa dare luogo a sospetti di relazione tra tale attività industriale e sismicità.

7. Infrastruttura informatica per il monitoraggio

Per assicurare il monitoraggio sismologico e geodetico della concessione "Mirandola", l'INGV, in qualità di SPM, ha istituito un Centro di Monitoraggio delle attività del Sottosuolo (CMS) interno all'ente allo scopo di assicurare una continua ricezione dei dati e una conseguente analisi in tempo quasi reale. L'infrastruttura informatica dedicata all'acquisizione e analisi dati è quindi alla base del funzionamento del CMS. Requisiti principali di questa infrastruttura sono l'affidabilità nella ricezione dei dati in continuo, la conservazione dei dati, e la loro confidenzialità.

Sulla base di queste necessità, è stato scelto di utilizzare due *server* fisici gemelli, che ospitano due macchine virtuali ciascuno, anch'esse identiche, che ricevono lo stesso dato contemporaneamente. Una macchina virtuale è dedicata all'acquisizione vera e propria, mentre l'altra si occupa dei compiti di analisi. La struttura modulare è stata scelta a scopi di *fault tolerance*: se un *server* fisico si rompe, l'altro continua ad acquisire e processare, come se non fosse successo nulla. Se una delle due macchine virtuali dovesse bloccarsi, la corrispondente macchina virtuale nell'altro *server* fisico continuerebbe a funzionare, senza intaccare minimamente il monitoraggio. Questa configurazione ha lo scopo di permettere una manutenzione scalata e di apportare modifiche al sistema, assicurandosi che non ci sia interruzione del servizio.

Andando nel dettaglio delle apparecchiature impiegate, i due *server* fisici sono computer con *cpu xeon* a 40 *core* in *hyperthreading* e 4 TB di *ram* ciascuno. Le 4 macchine virtuali sono equipaggiate con 8 *core*, 20 GB di *ram* e ospitano il sistema operativo *Centos 8* e acquisiscono e processano i dati mediante *software* Seiscomp4 (SC4, fornito tramite licenza dalla ditta GEMPA, ©gempa GmbH) con acquisizione del dato tramite protocollo Caps. Seiscomp4 e Caps permettono di gestire non solo il dato sismologico ma anche quello geodetico (o altri tipi di dati), anche se attualmente il dato geodetico è acquisito dal CMS non in tempo reale, ma al momento dell'analisi.

Il dato sismologico viene immagazzinato in uno *storage array* Dell scv-3000 comprendente una garanzia di 5 anni *on site* con tempo di intervento del costruttore in caso di guasto entro le 24 ore. I dati vengono quindi conservati con schema di *raid* 10 e *raid* 5-6 secondo un algoritmo proprietario del costruttore che si basa sulla frequenza dell'uso del dato stesso. Questo *storage array* è stato configurato per ospitare 2 volumi da 22 TB in cui il dato sismologico viene immagazzinato. Considerata l'elevata *bitrate* del segnale ricevuto, questo dimensionamento coincide

perfettamente col periodo di garanzia dello *storage array*, in accordo con l'orizzonte di vita previsto dal CMS per il suo uso.

Entrambi i volumi sono acceduti dalle macchine virtuali gemelle che ospitano il programma di analisi sismologica. Tutte le macchine del CMS sono accessibili, ai soli membri del centro, mediante connessione con VPN e controllo degli accessi, assicurando quindi la totale confidenzialità dei dati.

Di seguito viene elencato nel dettaglio la componentistica sia *hardware* che *software*

1) *Hardware: server* collegato ad un sistema di archiviazione dati (*mass storage*):

- Sistema modulare ed espandibile.
- n. 2 *Server multiblade*:
- Continuità Operativa (*Disaster Recovery*, Assistenza 5dx8h)
- Ridondanza.
- *Green Computing* (sostenibilità ambientale, efficienza energetica, costo di smaltimento e riciclaggio).
- Compatibilità *Free/Libre* e *Open Source Software*, Componenti Intel.
- *Storage Array SCv3000*:
- #n. 2 *controller*.
- #n. 2 *power supplies*.
- #n. 2 10GBASE-T con *RJ45 connectivity* per *controller*.

2) *Software: SeisComP4*:

- Sistema operativo *Centos 8*
- Licenze binarie per *SeisComP4* + moduli aggiuntivi.
- Supporto da remoto.
- Installazione, configurazione, test.
- *Training courses* per analisti (*beginners & advanced*)
- acquisizione *datastream* dei segnali sismici in tempo reale.
- analisi automatica di dati (parametri ipocentrali, Magnitudo) in tempo quasi reale.
- rielaborazione manuale (revisione parametri, calcolo meccanismo focale, PGV, PGA).
- Reportistica.
- *WEB*.

8. Sito *web* dedicato

Abbiamo realizzato un sito *web* del CMS, allo scopo di raccogliere e divulgare tutte le informazioni relative alle attività di SPM svolte dall'INGV, optando per una grafica sobria, funzionale e inserendolo all'interno del sito istituzionale dell'INGV.

8.1 Descrizione tecnica

Il sito *web* del CMS è fisicamente contenuto nel *web server* Apache© della sezione bolognese dell'INGV. Si regge su un *database* MySql© anch'esso contenuto nei *server* della sezione bolognese. Il sito è gestito mediante il *content management system* Joomla©. La scelta si è dimostrata obbligata dato che tutto il *web* INGV si regge su questo tipo di soluzioni. Il *template* su cui si appoggia la veste grafica è il Gantry 5 – Helium©. Le linee stilistiche principali sono state fornite dal reparto *web* dell'INGV. La customizzazione e la postproduzione sono avvenute in loco ad opera del sistemista del CMS. I loghi utilizzati sono stati creati dall'ufficio grafico dell'INGV. Lo *slider* è ottenuto mediante il componente smartSlider3©. Le foto incorporate sono state scattate da personale del CMS nell'ambito di attività lavorative interne e sono da intendersi proprietà del CMS. Inoltre non presentano né loghi diversi da quelli propri dell'istituto né volti di persone, pertanto non vi è necessità alcuna di autorizzazioni all'uso.

8.2 Scelte di organizzazione delle pagine

Nel rispetto della linea stilistica dell'istituto, si è scelto uno *slider* con 5 fotografie, che ruotano ogni 6 secondi. Ogni foto è corredata di una frase della dimensione normata di 18 pixel. Lo *slider* appare nella *home* e in alcune pagine del sito.

Il sito si struttura in un menù di 5 voci che guidano il visitatore attraverso la struttura scientifico-normativa in cui si svolge l'attività del CMS.

La *home page* (<http://cms.ingv.it/>, Figura 8.1) illustra brevemente la genesi istituzionale, fornendo una sintetica spiegazione di cosa sia il CMS.

Una sezione è dedicata all'inquadramento generale (Figura 8.2) in cui si svolge il lavoro di monitoraggio del Centro, con particolare attenzione agli enti coinvolti (nella sezione "Direttive e Ordinamenti"). Le pagine interne a questa sezione spiegano i motivi delle attività svolte e ne descrivono i metodi di applicazione.

Figura 8.1. Home page del sito del CMS.

INGV **CMS**
CENTRO DI MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO

Home | Direttive e Ordinamenti | Sperimentazioni | Risorse e Contenuti | FAQ

Ambiente

CENTRO PER IL MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO

Il Centro per il Monitoraggio delle attività di Sottosuolo (CMS) è la struttura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia dedicata alla raccolta, analisi, interpretazione e modellazione dei dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di georisorse (quali estrazione di idrocarburi, reiniezione di acque di scarto, stoccaggio di gas naturale, geotermia, sequestrazione di anidride carbonica, estrazioni minerarie, invasi artificiali) o legate ad altri rischi antropogenici.

DIRETTIVE E ORDINAMENTI

Inquadramento generale

Inquadramento Generale

Il CMS è la struttura dedicata alla raccolta, analisi, interpretazione e modellazione dei dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di georisorse (quali idrocarburi, reiniezione di acque di scarto, stoccaggio di gas naturale, geotermia, sequestrazione di anidride carbonica, estrazioni minerarie, invasi artificiali) o legate ad altri rischi antropogenici.

[Leggi tutto](#)

Indirizzi e linee guida

Indirizzi e linee guida ILG 2014

Gli ILG definiscono gli standard di osservazione degli effetti delle attività antropiche a seguito di operazioni di estrazione/stoccaggio di idrocarburi e re-iniezione di fluidi incomprimibili nel sottosuolo. Stabiliscono le procedure di monitoraggio, includendo tra questi le modalità di analisi dell'evoluzione spazio-temporale di alcuni parametri descrittivi della sismicità, della deformazione del suolo e della pressione di poro.

[Leggi tutto](#)

Linee Guida Geotermia

Linee Guida Geotermia 2016

La possibilità di utilizzo dell'energia geotermica assume in questi tempi l'interesse particolare di una risorsa naturale "rinnovabile" che permette di ricavare calore per riscaldamento e per molti altri usi diretti come produrre energia elettrica. E' questo il vantaggioso caso della produzione geotermoelettrica associata all'uso diretto del calore in cascata (produzione combinata di energia elettrica e termica).

[Leggi tutto](#)

SPERIMENTAZIONI

[Minerbio](#) | [Mirandola](#) | [Val d'agri](#)

[Risorse e Contenuti](#) | [FAQ](#)

INGV **CMS**
CENTRO DI MONITORAGGIO DELLE ATTIVITÀ DI SOTTOSUOLO

Sezione di Bologna
Via Franceschini, 31
40128 Bologna

RECAPITI TELEFONICI
Telefono +39 051 415 1411

CONTATTI
cms-monitoraggio@ingv.it
ufficiostampa@ingv.it

CODICE FISCALE
PIVA 06938821004
cms.ingv.it All Rights Reserved.

[Note Legali](#) | [Privacy](#) | [Credits](#)

Figura 8.2. Inquadramento istituzionale.

Inquadramento Generale



INGV ha costituito il Centro per il Monitoraggio delle attività di sottosuolo (CMS)
[Delibera del CdA 359/2017 e 428/2017]

Il CMS è la struttura dedicata alla raccolta, analisi, interpretazione e modellazione dei dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di georisorse (quali idrocarburi, reiniezione di acque di scarto, stoccaggio di gas naturale, geotermia, sequestrazione di anidride carbonica, estrazioni minerarie, invasi artificiali) o legate ad altri rischi antropogenici.

L'Autorità Competente (Ministero dello Sviluppo Economico MISE) ha nominato INGV **Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM)** su alcune aree di concessione.

La SPM, come definita dagli Indirizzi e Linee Guida (ILG), è il soggetto tecnico-scientifico (costituito da una o più Università o Enti di ricerca, di comprovate competenze in materia) a cui vengono conferiti dall'Amministrazione competente (MISE) compiti di raccolta e di analisi dei dati di monitoraggio e di supporto all'Amministrazione nelle valutazioni conseguenti.

INGV svolge o ha svolto il ruolo di SPM per le seguenti aree di concessione in via sperimentale:

- Minerbio
- Mirandola-Cavone
- Val d'Agri
- Toscana

Un'altra voce del menu ("Sperimentazioni") raccoglie le sperimentazioni attive e passate. Ad ogni monitoraggio specifico viene dedicata una pagina generale a scopo introduttivo (Figura 8.3 per "Mirandola"), contenente sezioni più specifiche: atti costitutivi, descrizione delle reti di monitoraggio (Figura 8.4 per la concessione di "Mirandola"), relazioni prodotte dalla SPM e un "Archivio" contenente altri documenti. Nelle pagine descrittive delle reti sono mostrati in mappa i dettagli della rete sismica e geodetica corredate da informazioni sulle caratteristiche tecniche e sulla loro localizzazione. Ogni mappa è ingrandibile mediante un semplice *click*.

Figura 8.3. La pagina del sito dedicata alla sperimentazione degli ILG nella concessione di Mirandola.

Mirandola

Documenti

- ▶ Atti
- ▶ Descrizione reti
- ▶ Relazioni
- ▶ Archivio

Il protocollo operativo per l'applicazione sperimentale degli ILG nella concessione di coltivazione idrocarburi MIRANDOLA è stato firmato in data 15 novembre 2016 da Regione Emilia-Romagna, DGS-UNMIG, Assomineraria, Società Padana Energia avente come scopo:

- l'applicazione in via sperimentale degli ILG nella concessione di coltivazione idrocarburi "Mirandola", quale caso pilota, regolando l'adeguamento e l'eventuale potenziamento della rete di monitoraggio esistente e disciplinando la conduzione dei monitoraggi;
- l'elaborazione degli elementi necessari per un eventuale aggiornamento degli ILG in base all'esperienza acquisita, così come previsto dagli ILG stessi.

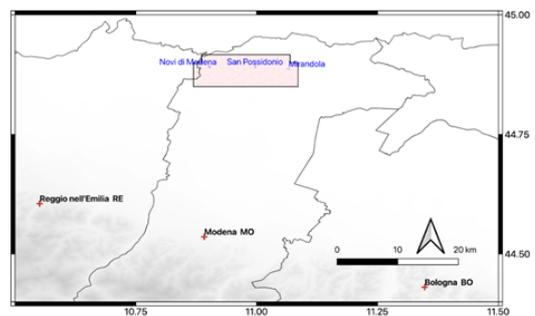
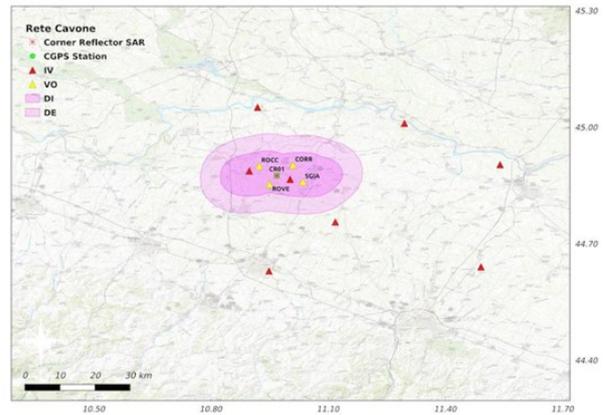


Figura 8.4. Pagina dedicata al dettaglio delle reti di monitoraggio.

Configurazione reti di monitoraggio - Mirandola

- Configurazione reti di monitoraggio
- Monitoraggio sismico
- Monitoraggio geodetico

La rete di monitoraggio è installata presso la concessione di Mirandola, in provincia di Modena, allo scopo di monitoraggio geofisico (sismico e geodetico) nei domini di rilevazione definiti per questa concessione in accordo con il documento "Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche" (Dialuce, et al., 2014). Il monitoraggio sismico di questa concessione è fatto attraverso una rete virtuale di stazioni sismiche che risulta dall'integrazione di 4 stazioni della rete locale (VO, installata dall'operatore), con 8 stazioni della Rete Sismica Nazionale (RSN IV), mentre il monitoraggio geodetico è eseguito tramite una stazione cGPS ed un corner reflector SAR.



Il menù "Risorse e contenuti" (Figura 8.5) raccoglie una lista di *link* utili e di pubblicazioni scientifiche e/o tecniche sull'argomento realizzati parzialmente o in toto da membri del CMS.

Figura 8.5. Pagina "Risorse e contenuti".

Risorse e Contenuti

- Link utili
 - Ministero dello sviluppo economico - Geomonitoraggi
 - Laboratorio di monitoraggio Cavone
 - Collalto seismic network
 - Sito web del progetto Tempa Rossa

• Chi siamo

Il **Centro per il Monitoraggio delle attività di Sottosuolo (CMS)** è la struttura dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia dedicata alla raccolta, analisi, interpretazione e modellazione dei dati relativi alle aree del territorio nazionale interessate da attività antropiche di sfruttamento di georisorse (quali estrazione di idrocarburi, reiniezione di acque di scarto, stoccaggio di gas naturale, geotermia, sequestrazione di anidride carbonica, estrazioni minerarie, invasi artificiali) o legate ad altri rischi antropogenici.

Il CMS svolge le sue attività nell'ambito della sperimentazione, in casi pilota, degli Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio integrato della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nelle aree interessate da attività antropiche, messi a punto dal Gruppo di lavoro della **Commissione per gli Idrocarburi e le Risorse Minerarie (CIRM)** incaricata dal **Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE)** in qualità di autorità competente al rilascio delle concessioni e alla vigilanza dell'esercizio (undefined).

L'INGV, istituzionalmente coinvolto nella fase di sperimentazione in alcuni casi pilota, ha costituito il Centro per il Monitoraggio delle attività di Sottosuolo, che opera principalmente nell'ambito di convenzioni stipulate con Enti pubblici per specifici progetti di monitoraggio e studio di aree interessate da rischi antropogenici, occupandosi anche di sviluppi metodologici e mantenendo relazioni nazionali e internazionali con altri centri e strutture scientifiche con analoghi interessi.

• Pubblicazioni

- Braun T., Danesi S., Morelli A. (2020). Application of monitoring guidelines to induced seismicity in Italy. *Journal of Seismology* volume 24, pages1015–1028(2020). Doi: 10.1007/s10950-019-09901-7
- Garcia-Aristizabal A., Danesi S., Braun T., Anselmi M., Zaccarelli L., Famiani D., Morelli A.(2020). Epistemic uncertainties in local earthquake locations and implications for managing induced seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*, ISSN: 1943-3573 doi: 10.1785/0120200100

L'ultima voce del menù principale, "FAQ" (Figura 8.6), raggruppa domande e risposte per orientarsi nello specifico contesto in cui opera il CMS.

Figura 8.6. Pagina delle
FAQ.

FAQ

Dal 2017 a oggi, INGV è stato nominato Struttura Preposta al Monitoraggio per 4 sperimentazioni degli Indirizzi e Linee Guida.

COS'È LA COMMISSIONE ICHESE?

La Commissione ICHESE (International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region) è un gruppo di lavoro incaricato di valutare le possibili relazioni tra attività di esplorazione per idrocarburi e aumento dell'attività sismica nell'area colpita dal terremoto dell'Emilia-Romagna del mese di maggio 2012. La Commissione è stata istituita l'11 dicembre 2012 con decreto del Dott. Franco Gabrielli, Capo del Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri su richiesta del Presidente della Regione Emilia-Romagna Vasco Errani in qualità di Commissario Delegato.

La Commissione ICHESE ha evidenziato l'opportunità che le attività di coltivazione di idrocarburi e di produzione dell'energia geotermica siano costantemente monitorate per seguire l'evoluzione dell'eventuale attività micro-sismica, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro.

COSA SONO GLI INDIRIZZI E LINEE GUIDA ILG ?

A seguito delle analisi e delle conclusioni riportate dalla Commissione ICHESE, il Ministero dello Sviluppo Economico -vigilante in materia di sicurezza nello sfruttamento delle risorse minerarie- ha costituito un gruppo di esperti per definire le disposizioni generali volte al monitoraggio delle attività di coltivazione, re-iniezione e stoccaggio di idrocarburi sul territorio nazionale.

Gli ILG prescrivono un monitoraggio continuo multi-parametrico della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nei domini circostanti i volumi di sfruttamento delle risorse del sottosuolo italiano.

9. Conclusioni

In questi due anni di sperimentazione degli ILG siamo riusciti a gettare le basi per il monitoraggio della concessione idrocarburi di "Mirandola" oltre che per l'applicazione degli ILG in generale. Il primo anno è servito principalmente alla formalizzazione degli accordi con definizione degli aspetti pratici come il passaggio dei dati, o la stesura formale della convenzione con il comune di San Possidonio. Il secondo anno (l'unico realmente incluso nella convenzione) abbiamo cominciato più propriamente il monitoraggio grazie anche all'aggiornamento della rete sismica dalla modalità di funzionamento a *trigger* alla modalità di acquisizione in continuo, oltre che all'installazione della stazione GPS. La realizzazione della sala di monitoraggio con acquisizione e analisi del dato sismico in tempo quasi reale ha richiesto più di un anno, ma da febbraio 2020 siamo operativi in tal senso e pronti a continuare il monitoraggio nel modo più adeguato.

Per quanto riguarda il monitoraggio sismico, non avendo informazioni relative al periodo precedente l'inizio dell'attività industriale non possiamo propriamente giudicare l'impatto che questa ha avuto sulla sismicità dell'area, ma la disponibilità dei dati passati, dal 1982 al 2017 (escluso 2012-2013) ci ha permesso di costruire un quadro abbastanza completo della sismicità della zona. I 49 eventi rilevati ed analizzati nel 2018-2019, sebbene non costituiscano un numero sufficiente per un'analisi statistica stabile, mostrano come la sismicità in quest'area non si discosti da quella registrata in passato, indipendentemente dall'adeguamento della rete sismica realizzato a fine 2018. La limitata copertura spaziale della rete sismica locale, unitamente alle magnitudo di completezza stimate ($M_C=2$) sia prima che durante la sperimentazione, testimoniano la non rispondenza della rete sismica locale ai requisiti elencati negli ILG (nemmeno se integrata con la rete sismica nazionale). Il superamento per 9 eventi interni al DI della soglia (puramente indicativa) di $M_L=1.5$ per la definizione del livello di Attenzione, così come il non superamento dei valori corrispondenti in PGA e PGV, ci mostrano quanto sia importante avere disponibilità di un catalogo omogeneo e comprensivo di un elevato numero di eventi per un'adeguata definizione dei parametri statistici (magnitudo di completezza, b) e conseguentemente dei valori di soglia per il semaforo.

Dal punto di vista deformativo, sebbene un anno di dati sia sicuramente insufficiente a trarre conclusioni certe, possiamo comunque valutare come al momento non sembra ci siano deformazioni del suolo anomale da poter mettere in relazione con l'attività industriale. Segnaliamo come sia auspicabile l'installazione di una vera e propria rete di stazioni GPS per un'adeguata analisi delle deformazioni dell'intero giacimento.

Infine dal confronto tra l'andamento temporale delle attività industriali e l'occorrenza degli eventi sismici localizzati internamente al DI e con magnitudo superiore alla soglia di completezza, non si evidenzia nessuna relazione reciproca: il tasso di sismicità non varia significativamente durante i due anni nonostante il fermo di tutte le attività industriali durato quattro mesi nel 2018.

Appendice

Simulazione di rete sismica volta a migliorare la soglia di deteazione

Abbiamo eseguito dei test sintetici per verificare quale fattore fosse più incisivo nel migliorare la soglia di deteazione tra un aumento del numero di stazioni o l'installazione in pozzo dei sensori. Seguendo lo stesso schema descritto nel capitolo 3.2.2 "Stima delle soglie di deteazione" abbiamo eseguito il calcolo della magnitudo minima (M_w) rilevabile in due configurazioni di rete sismica completamente diverse:

- 1) rete sismica con 13 stazioni nel DI (7 in più rispetto al reale stato della rete attuale);
- 2) stesse 6 stazioni della rete attuale posizionate invece che sulla superficie a 120 m di profondità (ovvero al di sotto dello strato di sedimenti come da Minarelli et al., 2016; Garofalo et al., 2016).

Questa seconda configurazione è stata simulata diminuendo i livelli di rumore di 25 dB, in base a quanto riscontrato dal confronto delle registrazioni tra stazione in pozzo e in superficie al sito di Casaglia (Margheriti et al., 2000; Cocco et al., 2001; Pesaresi et al., 2014), non lontano e non diverso per caratteristiche geologiche dall'area di Cavone.

La figura mostra il confronto tra i diversi risultati ottenuti per le magnitudo minime rilevabili nel caso di rete sismica reale (pannelli a e b), simulazione 1) di rete con 13 stazioni (pannelli c e d) e simulazione 2) di rete a 6 stazioni installate in pozzo (pannelli e e f).

Si osserva molto chiaramente come un aumento del numero di stazioni non aiuti a diminuire la soglia di deteazione in modo significativo, ma consente un ampliamento dell'area in cui è possibile rilevare e localizzare eventi piccoli. Il fattore che invece permette un miglioramento netto della magnitudo minima rilevabile è proprio l'installazione in pozzo dei sensori. Questo significa che in queste zone, l'amplificazione del rumore sismico di fondo dovuta allo strato di sedimenti della pianura Padana è da considerare la principale causa di disturbo capace di peggiorare le capacità di rilevamento di piccoli eventi di una rete sismica.

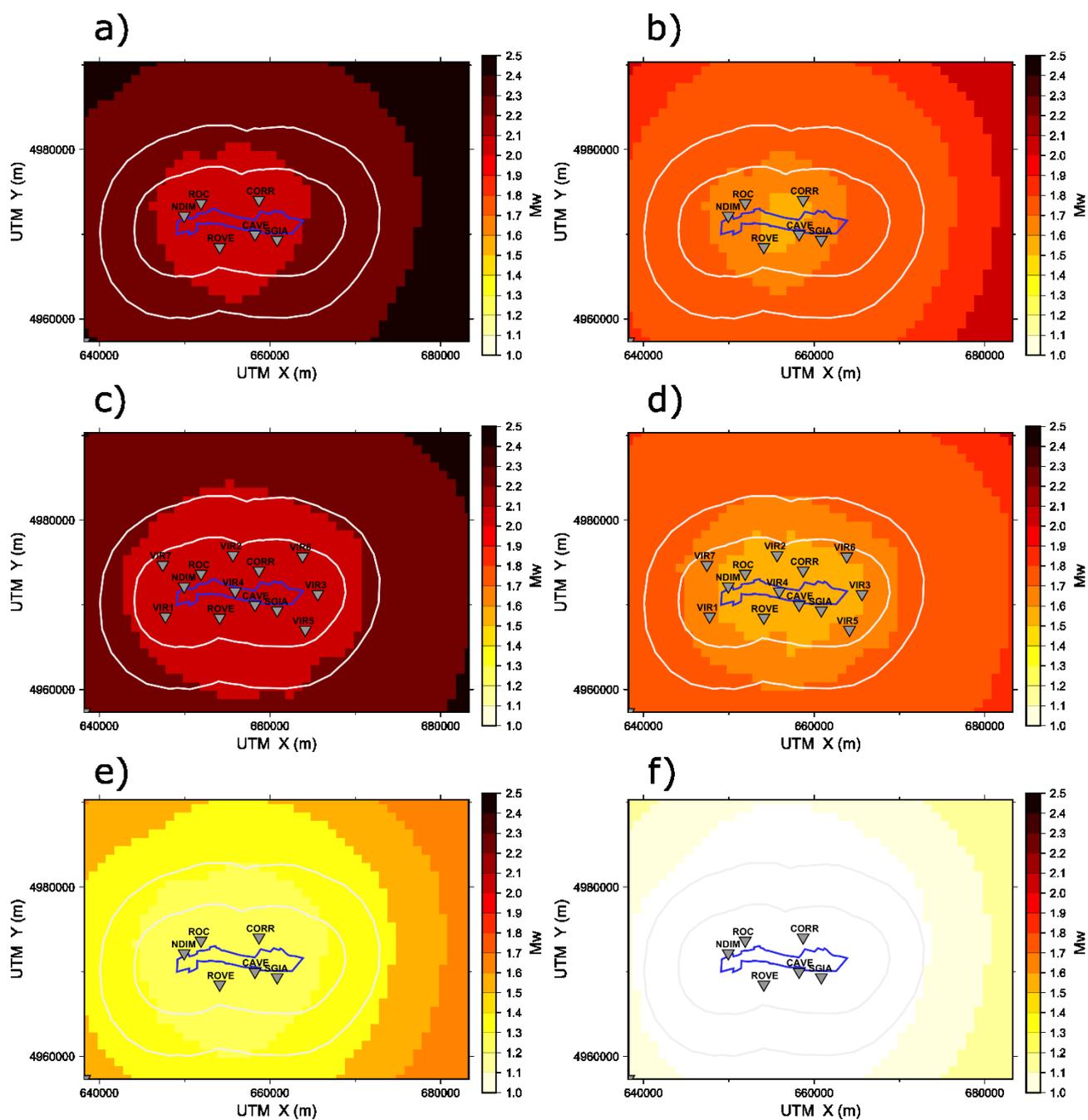


Figura A 1. Mappe di soglie di detezione per la rete attuale (pannelli a e b per onde P e S rispettivamente), per la rete a 13 stazioni (pannelli c e d per onde P e S) e per la rete a 6 stazioni in pozzo (pannelli e e f per onde P e S rispettivamente).

Bibliografia

- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X., (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. - Solid Earth* 121, 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.
- Aki K., (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log(N)=a-bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 43, 237-239.
- Atkinson G., (2015). Ground-Motion Prediction Equation for Small-to-Moderate Events at Short Hypocentral Distances, with Application to Induced-Seismicity Hazards. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 105(2A): 981, <http://dx.doi.org/10.1785/0120140142>.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G., Paolucci R., (2011). Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database. *Bull. Earthq. Eng.*, 9, 6, 1899–1920, doi: 10.1007/s10518-011-9313-z.
- Blewitt G. and D. Lavallée, (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.
- Boccaletti M. and Martelli L., (2004). (Coords): Carta sismo-tettonica della Regione Emilia-Romagna scala 1:250.000 e note illustrative. Selca, Firenze.
- Brune J. N., (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 75, 4997-5009.
- Brune J. N., (1971). (Correction) Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *J. Geophys. Res.* 76, 5002.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., (2003). An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. *Annals of Geophysics*, 46 (5), pp. 865-882.
- Carminati E. and Vadacca L., (2010). Two-and three-dimensional numerical simulations of the stress field at the thrust front of the Northern Apennines. Italy, *J. Geophys. Res.*, 115, B12425, doi:10.1029/2010JB007870.
- Cocco, M., Ardizzoni, F., Azzara, R. M., Dall'Olio, L., Delladio, A., Di Bona, M., et al. (2001). Broadband waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy). *Annals of Geophysics* 44, 137–154.
- Devoti R., et al., (2017). A Combined Velocity Field of the Mediterranean Region. *Ann. Geophys.*, 60(2), doi:10.4401/ag-7059.
- Dialuce G., et al., (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche. (https://unimig.mise.gov.it/images/docs/15_238.pdf).
- Dogliani C., Gueguen E., Harabaglia P., Mongelli F., (1999). On the origin of west-directed subduction zones and applications to the western Mediterranean. 10.1144/GSL.SP.1999.156.01.24, Geological Society, London, Special Publications, pg. 541-561, Vol. 156, N°1.
- Eurocode 8, (2004). Design of structures for earthquake resistance, part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, available at <http://www.cen.eu/cenorm/homepage.htm> (last accessed December 2013).

- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., (2011). A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470.
- Fantoni R., Franciosi R., (2010). Tectono-sedimentary setting of the Po Plain and Adriatic foreland. *Rend. Fis. Acc. Lincei* 21, 197–209. <https://doi.org/10.1007/s12210-010-0102-4>.
- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P. Y., Cornou, C., Cox, B. R., et al. (2016). InterPACIFIC project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. Part II: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 82, 241–254. doi:10.1016/j.soildyn.2015.12.009.
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F. P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Agostinetti N. P., Di Giovambattista R., La Torre D., Anselmi M., Ciaccio M., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., (2014). The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): Imaging the thrust fault system by accurate aftershock location. *Tectonophysics*, 622, 44–55, doi:10.1016/j.tecto.2014.02.013.
- Gutenberg B. and Richter C., (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 2nd edition, pp. 310.
- Herring T., King R. W., McClusky S., (2010). *GAMIT Reference Manual, Release 10.4*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- ICHESE, (2014). Report on the hydrocarbon exploration and seismicity in Emilia Region. Paper presented at International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region. ([http://mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE Report.pdf](http://mappegis.regione.emilia-romagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE%20Report.pdf)).
- INGV Seismological Data Centre, (2006, January 1). Rete Sismica Nazionale (RSN). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Italy. <https://doi.org/10.13127/SD/X0FXNH7QFY> (<http://cnt.rm.ingv.it/instruments/network/IV#>).
- IS-EPOS, (2016). Completeness Magnitude Estimation [Web application/Source code]. Retrieved from <https://tcs.ah-epos.eu/>.
- Juanes, R., Jha, B., Hager, B. H., Shaw, J. H., Plesch, A., Astiz, L., et al. (2016). Were the may 2012 emilia-romagna earthquakes induced? a coupled flow-geomechanics modeling assessment. *Geophysical Research Letters* 43.
- Kissling E., Ellsworth W.L., Eberhart-Phillips D., Kradolfer U., (1994). Initial reference models in seismic tomography. *J. Geophys. Res.*, 99 (B10), 19635–19646.
- Lahr J.C., 1999, revised 2012, HYPOELLIPSE: A computer program for determining local earthquake hypocentral parameters, magnitude and first motion pattern. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-23, version 1.1, 119 p. and software, available at <https://pubs.usgs.gov/of/1999/ofr-99-0023/>.
- Leptokaropoulos K., Staszek M., Lasocki S., Martínez-Garzón P., Kwiatak G., (2018). Evolution of Seismicity in Relation to Fluid Injection in the North-Western Part of The Geysers Geothermal Field. *Geophys. J. Int.*, 212, 1157–1166.
- Luzi L., et al., (2016). The engineering strong-motion database: A platform to access pan- European accelerometric data. *Seismol. Res. Lett.*, 87, 4, 987–997, doi: 10.1785/0220150278.

- Malagnini L., Herrmann R. B., Munafò I., Buttinelli M., Anselmi M., Akinci A., Boschi E., (2012). The 2012 Ferrara seismic sequence: Regional crustal structure, earthquake sources, and seismic hazard. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19302, doi:10.1029/2012GL053214.
- Malagnini L. and Munafò I., (2017). M_{ws} of seismic sources under thick sediments. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 107(3); doi:10.1785/0120160243.
- Malinverno A. and Ryan W. B. F., (1986). Extension in the Tyrrhenian Sea and shortening in the Apennines as result of arc migration driven by sinking of the lithosphere. *Tectonics*, 5(2), 227– 245, doi:10.1029/TC005i002p00227.
- Margheriti, L., Azzara, R. M., Cocco, M., Delladio, A., and Nardi, A. (2000). Analysis of Borehole Broadband Recordings: Test Site in the Po Basin. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, 1454–1463. doi:10.1785/01199900616.
- Marzocchi W., Sandri L., Heuret A., Funicello F., (2016). Where giant earthquakes may come. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121; doi:10.1002/2016JB013054.
- Masson C., Mazzotti S., Vernant P., (2019). Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series. *Sol. Ea.*, 10, 329–342. doi:10.5194/se-10-329-2019.
- McNamara D. E. and Buland R. P., (2004). Ambient Noise Levels in the Continental United States. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 94 (4), 1517-1527.
- Meletti C., Marzocchi W., Albarello D., D'Amico V., Luzi L., Martinelli F., Pace B., Pignone M., Rovida A., Visini F., and the MPS16 Working Group, (2017). The 2016 Italian seismic hazard model, 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 201, Santiago Chile, 9–13 January.
- Michellini A., Faenza L., Lanzano G., Luciani V., Jozinović D., Puglia R., Luzi L., (2020). The new ShakeMap in Italy: Progress and Advances in the Last 10 Yr. *Seismol. I. Res. Lett.*, 91 (1), 317-333, <http://doi.org/10.1785/0220190130>.
- Minarelli, L., Amoroso, S., Tarabusi, G., Stefani, M., and Pulelli, G. (2016). Down-hole geophysical characterization of middle-upper Quaternary sequences in the Apennine Foredeep, Mirabello, Italy. *Annals of Geophysics* 59, S0543. doi:10.4401/ag-7114.
- Munafò I., Malagnini L., Chiaraluca L., (2016). On the relationship between MW and ML for small earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(5):2402 <http://dx.doi.org/10.1785/0120160130>.
- Pesaresi, D., Romanelli, M., Barnaba, C., Bargato, P. L., and Durì, G. (2014). OGS improvements in 2012 in running the North-eastern Italy Seismic Network: the Ferrara VBB borehole seismic station. *Advances in Geosciences* 36, 61–67. doi:10.5194/adgeo-36-61-2014.
- Pezzo G., Merryman Boncori J. P., Tolomei C., Salvi S., Atzori S., Antonioli A., Trasatti E., Novali F., Serpelloni E., Candela L., Giuliani R., (2013). Coseismic Deformation and Source Modeling of the May 2012 Emilia (Northern Italy). *Earthquakes, Seismological Research Letters*, 84 (4): 645–655. <https://doi.org/10.1785/0220120171>.
- Pezzo G., De Gori P., Lucente F. P., Chiarabba C., (2018). Pore pressure pulse drove the 2012 Emilia (Italy) series of earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 45, 682– 690. <https://doi.org/10.1002/2017GL076110>.
- Relazione preliminare alla sperimentazione degli ILG - Concessione di coltivazione "Mirandola" (Campo di Cavone) - ANNO 2017.

- Royden L. H. and Burchfiel B. C., (1987). Thin-skinned N-S extension within the convergent Himalayan region: gravitational collapse of a Miocene topographic front. 10.1144/GSL.SP.1987.028.01.40 Geological Society, London, Special Publications, Pg 611-619, Vol. 28, N°1.
- Scrocca D., Carminati E., Doglioni C., Marcantoni D., (2007). Thrust Belts and Foreland Basins. *Frontiers in Earth Sciences*, Pg 471-487, Springer Berlin Heidelberg.
- Serpelloni E., Faccenna C., Spada G., Dong D., Williams S. D. P., (2013). Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. *J. Geophys. Res.*, 118(11), 6003–6024, doi:10.1002/2013JB010102.
- Serpelloni E., Pintori F., Gualandi A., Scoccimarro E., Cavaliere A., Anderlini L., Belardinelli M. E., Todesco M., (2018). Hydrologically induced karst deformation: Insights from GPS measurements in the Adria-Eurasia plate boundary zone. *J. Geophys. Res.*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JB015252>.
- Serpelloni E., Casula G., Galvani A., Anzidei M., Baldi P., (2006). Data analysis of permanent GPS networks in Italy and surrounding regions: application of a distributed processing approach. *Ann. Geophys.*, 49, 897–928.
- Susanni D., (2014). “sotto i nostri piedi”, Laboratorio di monitoraggio Cavone, <http://labcavone.it/it/notizie/susanni-sanpossidonio-04-12-14>, (ultima visita il 25/01/2021).
- Peterson J., (1993). Observations and modelling of background seismic noise, USGS Open-file report 93-322.
- Vassallo M., Festa G., Bobbio A., (2012). Seismic Ambient Noise Analysis in Southern Italy. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 102, 2, 574-586. DOI: 10.1785/012011001.
- Werner C., Wegmuller U., Strozzi T., Wiesmann A., (2003). Interferometric point target analysis for deformation mapping. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*; IEEE: Piscataway, NJ, USA, Volume 7, pp. 4362–4364.
- Wiemer S. and Wyss M., (2000). Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the western United States and Japan. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90(4), 859– 869.
- Wonnacott T.H. and Wonnacott R.J., (1977). *Introductory Statistics*. Wiley, 650 p.
- Woessner J. and Wiemer S., (2005). Assessing the Quality of Earthquake Catalogs: Estimating the Magnitude of Completeness and Its Uncertainty. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95, 684-698.

Elenco delle figure

- Figura 2.1. (a) Mappa strutturale semplificata della zona emiliana, raffigurante le principali linee di sovrascorrimento dell'Appennino settentrionale (da Pezzo et al., 2013). Le stelle indicano gli epicentri degli eventi più energetici della sequenza del 2012, mentre i terremoti storici vengono segnati coi quadrati. (b) Sezioni geo-logiche tracciate lungo le linee nere A e B della Figura 2.1a (tratta da Boccaletti et al., 2010). 8
- Figura 2.2. Schema (non in scala) del completamento dei pozzi del giacimento di Cavone, con le profondità di ciascun pozzo e le formazioni geologiche interessate (dalla documentazione tecnica nel sito di LabCavone). 9
- Figura 3.1. Mappa della proiezione in superficie del giacimento (contorno giallo) con le stazioni sismiche operanti dal giugno 1982 al giugno 1986 (triangoli viola). I contorni blu e verde indicano l'estensione dei domini di rilevazione come definiti negli ILG. Il simbolo del pozzo mostra la posizione di *Cavone14*. 11
- Figura 3.2. Mappa della proiezione in superficie del giacimento di Cavone (contorno giallo) con le stazioni sismiche operanti dal 1986 al 1990 (triangoli viola). I contorni blu e verde indicano l'estensione dei domini di rilevazione come definiti negli ILG. Il simbolo del pozzo mostra la posizione di *Cavone14*. 12
- Figura 3.3. Mappa delle stazioni sismiche della rete VO (in viola) e della rete IV (in verde) con la proiezione in superficie del giacimento (contorno giallo) e i domini di rilevazione (contorni blu e verde). I cerchi gialli rappresentano la posizione dei pozzi del campo, mentre il simbolo del pozzo evidenzia il punto di re-iniezione *Cavone 14*. 13
- Figura 3.4. Spettrogrammi relativi alle diverse componenti (HHZ, HHN, HHE) ottenuti per le stazioni CAVE e NDIM a partire dai dati registrati tra l'1 e il 15 settembre 2018. Gli spettri sono PSD espressi in dB rispetto a $1 \text{ (m/s)}^2/\text{Hz}$. 16
- Figura 3.5. Variabilità temporale del rumore (PSD in dB) calcolato in tre diverse bande di frequenza ($7.2 \div 14\text{s}$, $0.7 \div 1.4\text{s}$, $6.8 \div 14 \text{ Hz}$) per le componenti HHZ, HHN, HHE delle stazioni CAVE e NDIM a partire dai dati registrati tra il 2018/09/01 e il 2018/09/15. 17
- Figura 3.6. PDF calcolate per le tre componenti delle stazioni CAVE e NDIM. Le PDF sono state ottenute dalle PSD relative ai dati acquisiti tra il 2018/09/01 e il 2018/09/15. Le curve grigie rappresentano le curve NHNM e NLNM, utilizzate come valori standard di riferimento di alto e basso livello di rumorosità per stazioni sismiche. 18
- Figura 3.7. Livelli di 90° percentile di PSD calcolati per le diverse componenti delle stazioni sismiche CAVE e NDIM. Le curve grigie rappresentano i livelli di NHNM e NLNM utilizzate come valori standard di riferimento di alto e basso livello di rumorosità per stazioni sismiche. 18
- Figura 3.8. Soglie di rilevabilità a singola stazione. Ogni figura mostra le coppie magnitudodistanza registrate con un rapporto segnale/rumore maggiore di 5 (dati nell'area magenta) e con un rapporto segnale/rumore minore di 5 (area azzurra). Le soglie sono ricavate utilizzando il rumore registrato alla stazione CAVE (in alto) e NDIM (in basso). Le componenti HHZ sono state utilizzate per determinare la soglia di rilevabilità della fase P (a sinistra) mentre le componenti HHE sono state usate per le soglie delle fasi S (a destra). 20

- Figura 3.9. Soglie di detezione stimate per la rete sismica di Cavone (concessione Mirandola). I colori associati ai punti delle mappe rappresentano la M_w minima che un evento sismico (profondo 6 km) deve avere per poter essere registrato con un rapporto segnale rumore superiore a 5 ad almeno 5 stazioni. A sinistra vengono riportate le soglie di detezione per la fase P mentre a destra sono riportate quelle relative alla fase S. Nelle mappe le linee bianche delimitano le aree del Dominio Interno di rilevazione e Dominio Esteso di rilevazione, la linea blu delimita la proiezione in superficie del giacimento. 21
- Figura 3.10. A sinistra: Modello di velocità creato ad hoc per il centro olio Cavone (modello Eni) per le localizzazioni nell'area del giacimento. Al centro e a destra: Modello di velocità 1-D dal lavoro di Govoni et al. (2014). 22
- Figura 3.11. Sismicità registrata dalla rete di Cavone nel periodo 1982-2017 e localizzata con il modello Eni (punti neri). Vengono riportati in mappa i contorni della proiezione in superficie del giacimento (in giallo) e dei domini di rilevazione DI e DE (blu e verde). Nella sezione invece la profondità del giacimento viene indicata dalla linea tratteggiata, con la linea continua la topografia e con gli stessi colori della mappa i contorni dei domini. I triangoli indicano le posizioni delle stazioni sismiche, in verde quelle della rete IV, in viola quelle della rete VO. In rosso (cerchio in mappa o freccia con segmento nelle sezioni) viene mostrato il pozzo di re-iniezione *Cavone14*. 23
- Figura 3.12. Sismicità registrata dalla rete di Cavone nel periodo 1982-2017 e localizzata con il modello Govoni. I simboli sono gli stessi della Figura 3.11. 24
- Figura 3.13. Mappa dei 213 eventi analizzati tra il 2011 e il 2018 e sezioni corrispondenti attraverso il campo di Cavone. La proiezione in superficie del giacimento di Cavone è riportata in giallo nella mappa in alto. I pallini neri rappresentano la sismicità, mentre i triangoli rappresentano rispettivamente le stazioni delle reti VO (viola) e IV (verde). Nelle sezioni la linea continua indica la topografia, quella tratteggiata la profondità del giacimento. In rosso (cerchio in mappa o freccia con segmento nelle sezioni) viene mostrato il pozzo di re-iniezione *Cavone14*. 25
- Figura 3.14. Distribuzione frequenza-magnitudo per il catalogo di 213 terremoti tra il 2011 e il 2018 relativamente a M_L fornita da Eni e M_w calcolata dalla SPM. Il valore M_C indica la magnitudo di completezza nel caso di valore stabile (si veda il testo per maggiori dettagli). 26
- Figura 3.15. Regressione lineare M_w-M_L per i 213 eventi in catalogo. Le linee continue verde, rossa e nera indicano la regressione ottenuta con metodi diversi (rispettivamente diretto, inverso e ortogonale), mentre la retta grigia delinea l'andamento corrispondente a un andamento 1:1 tra le due quantità (che non si adatta al nostro caso). 27
- Figura 3.16. Valori di PGA (pannello di sinistra) e PGV (pannello di destra) calcolati per ogni stazione in funzione della distanza epicentrale. 28
- Figura 3.17. Esempio di come la legge di predizione del moto del suolo (linea blu continua) si distribuisca rispetto ai dati (punti rossi) per una magnitudo di $M_L=1.5$, le linee tratteggiate indicano i margini di incertezza sulle stime di PGA. 29
- Figura 3.18. Mappa della sismicità e sezioni verticali dei 49 eventi sismici localizzati dalla SPM nel periodo 2018-2019. I triangoli verdi rappresentano le stazioni della rete IV. I triangoli viola rappresentano le stazioni della rete VO. La freccia rossa in sezione (cerchio rosso in mappa) rappresenta il pozzo *Cavone14*, con il segmento rosso che indica la profondità di iniezione (~3 Km). I contorni giallo, blu e verde rappresentano rispettivamente la

proiezione del giacimento in superficie (linea tratteggiata in profondità), l'estensione di DI e DE.	33
Figura 3.19. a) Grafico frequenza-magnitudo M_L per i dati del 2018-2019. b) Grafico frequenza-magnitudo M_W per i dati del 2018-2019. I valori di magnitudo di completezza M_C così come quelli del parametro b non vengono indicati perché variabili a seconda del metodo utilizzato per stimarli e quindi poco affidabili.	34
Figura 4.1. Posizione della stazione GNSS di Cavone, in giallo (a) e distanza dalle stazioni GNSS attive (di cui sono indicati i nomi) più vicine, dove in blu è riportata l'estensione del giacimento (b).	36
Figura 4.2. Posizione della stazione di Cavone (in giallo) rispetto ad altre stazioni GNSS attive in Italia settentrionale ed afferenti a diverse reti (In rosso le stazioni della RING dell'INGV).	37
Figura 4.3. Foto della stazione GNSS di Cavone, presa dalla "Relazione di Aggiornamento sulla Sperimentazione degli ILG nella Concessione Mirandola", del febbraio 2019.	37
Figura 4.4. Andamento dei valori di MP1 (in nero) e MP2 (in rosso) ottenuti dall'analisi dei dati RINEX della stazione CAVO con il <i>software</i> TEQC.	38
Figura 4.5. Serie temporale di spostamento della stazione di Cavone (<i>site ID</i> nuovo CVNE e <i>site ID</i> originale CAVO) nel sistema di riferimento globale IGS 2014. Le linee grigie indicano le barre d'errore (1σ). La linea rossa rappresenta il <i>trend</i> lineare, come definito in [Eq.3].	41
Figura 5.1. Rete di interferogrammi ottenuta.	44
Figura 5.2. Velocità di spostamento del suolo stimata con dati InSAR Sentinel-1. L'area della concessione di Mirandola è circoscritta dal poligono rosso.	44
Figura 5.3. Serie Temporali di tre punti all'interno del giacimento, segnalati dai rettangoli rossi nella map-pa del pannello superiore.	45
Figura 5.4. Serie temporali di due punti nelle aree di Mirandola e San Possidonio che evidenziano un leggero <i>trend</i> in subsidenza.	46
Figura 6.1. Andamento temporale dei volumi di olio e acqua estratti (in m^3 , pannello superiore) e del volume (in m^3) e pressione (in bar) di re-iniezione dell'acqua di strato (pannello inferiore).	48
Figura 6.2. Andamento temporale della sismicità localizzata nel DI: valori di magnitudo (M_L e M_W , in alto) e valori massimi di PGA e PGV (in basso) per ognuno dei 32 eventi. Con i cerchi neri vengono evidenziati gli eventi con M_W superiore al valore di completezza. L'area ombreggiata marca il periodo di fermo dell'impianto.	49
Figura 8.1. <i>Home page</i> del sito del CMS.	54
Figura 8.2. Inquadramento istituzionale.	55
Figura 8.3. La pagina del sito dedicata alla sperimentazione degli ILG nella concessione di Mirandola.	55
Figura 8.4. Pagina dedicata al dettaglio delle reti di monitoraggio.	56
Figura 8.5. Pagina "Risorse e contenuti".	56
Figura 8.6. Pagina delle FAQ.	57

Elenco delle tabelle

Tabella 3.1. Coordinate delle 10 stazioni operanti tra il 1982 e il 1986 (CA01-CA10) e delle 2 stazioni operanti dal 1986 al 1990 (GIA e ROV).	11
Tabella 3.2. Coordinate delle stazioni dal 1990 ad oggi.	13
Tabella 3.3. Coordinate delle stazioni della rete sismica nazionale (IV) che partecipano al monitoraggio sismico integrando la rete sismica locale VO.	14
Tabella 3.4. Valori stimati per i parametri della relazione PGA-Magnitudo-distanza nel caso dei 213 eventi sismici del periodo 2011-2018.	28
Tabella 3.5. Tabella degli eventi sismici localizzati dalla SPM nel periodo 2018-2019. Oltre al numero ordinale e al tempo di accadimento dell'evento, vengono riportate latitudine, longitudine, profondità (in km), magnitudo M_w e massimo dei valori di picco in accelerazione e velocità (PGA e PGV rispettivamente). Le caselle evidenziate in azzurro (verde) sottolineano eventi localizzati all'interno del DI (DE). L'ultima colonna riporta la M_L presa da LabCavone (in nero) o stimata in base alla relazione M_L-M_w (in rosso).	31
Tabella 6.1. Suddivisione in intervalli temporali del periodo di sperimentazione, a seconda dell'attività industriale. T2 identifica il periodo di fermo degli impianti.	50
Tabella 6.2. <i>p-values</i> risultanti dai test binomiali effettuati confrontando i periodi T1 e T2, e T3 e T2.	50

Elenco delle figure Appendice

Figura A 1. Mappe di soglie di detezione per la rete attuale (pannelli a e b per onde P e S rispettivamente), per la rete a 13 stazioni (pannelli c e d per onde P e S) e per la rete a 6 stazioni in pozzo (pannelli e e f per onde P e S rispettivamente).	61
--	----