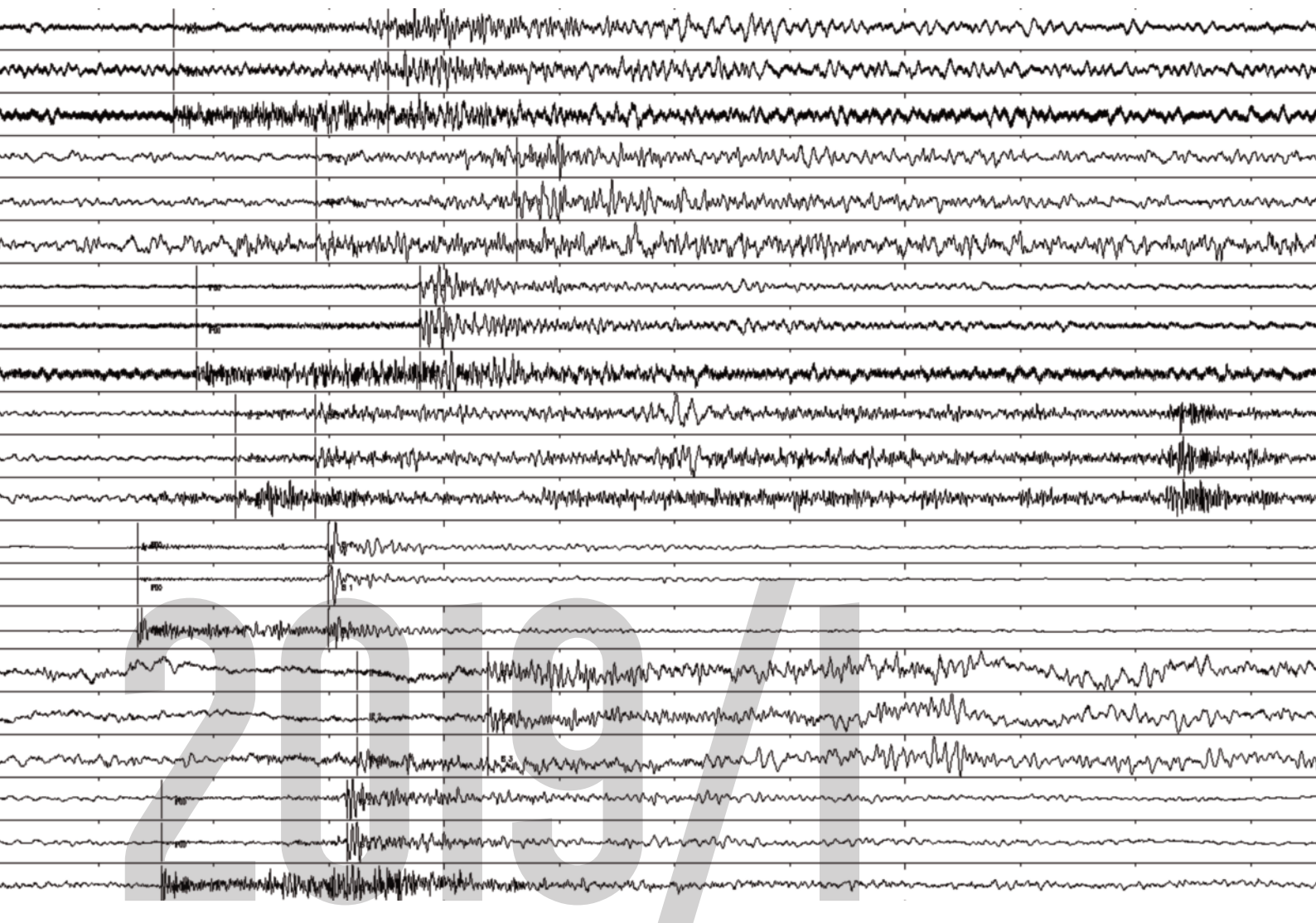


MiSE DGS UNMIG/Società Padana Energia S.p.A./RER/Assomineraria
Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida
per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

RELAZIONE TRIMESTRALE 2019/I

Mario Anselmi e Lucia Zaccarelli



indice

1_Introduzione	3
2_Inquadramento geologico	3
3_Rete di monitoraggio sismico	5
4_Dati sismici del primo trimestre 2019	6
5_Monitoraggio delle pressioni di poro	8
6_Conclusioni	8
Appendice A	9
A1_Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico	9
A2_Analisi dei dati del primo trimestre	9
Glossario	14
Bibliografia	14

MiSE DGS UNMIG/Società Padana Energia S.p.A./RER/Assomineraria
Protocollo Operativo – Applicazione in via sperimentale degli Indirizzi e Linee Guida
per il monitoraggio della concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola”

Relazione trimestrale 2019/I

Gennaio-Marzo

Mario Anselmi¹ e **Lucia Zaccarelli²**

¹ INGV, Sezione ONT, Roma, Italia; ² INGV, Sezione di Bologna, Italia

Bologna, 2 luglio 2019

1_Introduzione

Illustriamo qui le analisi della sismicità registrata nella concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola” nel periodo gennaio–marzo 2019. Questa attività viene svolta dall'INGV, in qualità di Struttura Preposta al Monitoraggio (SPM), nell'ambito della sperimentazione degli Indirizzi e Linee Guida (ILG, 2014) in quest'area. Gli aspetti tecnici e le descrizioni dettagliate delle analisi dei dati del monitoraggio vengono illustrati nell'Appendice A.

La sperimentazione riguarda l'analisi dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio attivi nell'area circostante il centro olio Cavone (la centrale di raccolta e trattamento operativa all'interno della concessione idrocarburi “Mirandola”), considerando le stazioni di rilevamento messe in funzione direttamente dal Concessionario e la loro integrazione con le stazioni della rete nazionale gestita dall'INGV. Ad oggi il monitoraggio è volto unicamente a registrare e catalogare gli eventi sismici locali.

Il monitoraggio delle deformazioni del suolo avrà inizio nei prossimi mesi a seguito del passaggio dei primi dati GPS raccolti da parte del concessionario (Società Padana Energia S.p.A.) alla SPM (INGV).

Da notare che la Società Padana Energia, di concerto con il MiSE-DGS, RER e Assomineraria, ha istituito nel 2014 il Laboratorio di monitoraggio Cavone con lo scopo di analizzare i dati del monitoraggio e di divulgarne i risultati tramite sito web dedicato: labcavone.it.

In questa relazione riportiamo quindi i nostri risultati (INGV-SPM) confrontandoli con quelli di LabCavone.

2_Inquadramento geologico

L'area del giacimento di Cavone si inserisce all'interno dell'Arco Ferrarese, appartenente al sistema esterno a pieghe e sovrascorrimenti dell'Appennino settentrionale (Figura 1a).

La Catena, vergente verso nord-est, si è sviluppata durante il Neogene ed il Quaternario con la collisione tra il margine continentale europeo e la microplacca Adria (Reutter et al., 1980). 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 e 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 sintettonica, 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 1b).

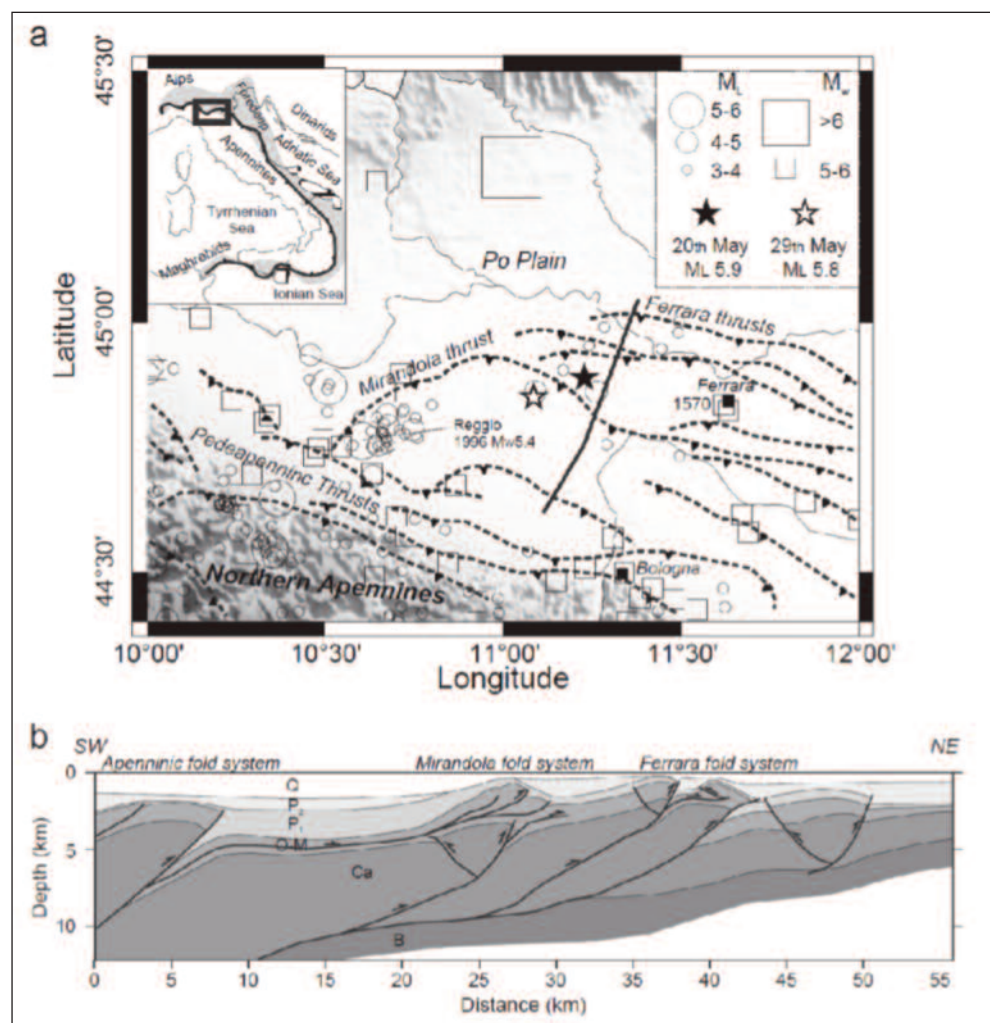
Il giacimento ad olio Cavone, scoperto nel 1972, ricade nella concessione Mirandola che è ubicata prevalentemente in Emilia-Romagna nella provincia di Modena, e in parte in Lombardia, in provincia di Mantova; ha un'estensione di 121.96 km² ed è di titolarità di Società Padana Energia.

L'area mineralizzata (ossia l'area vera e propria del giacimento) è di circa 15 km²; le rocce serbatoio sono costituite da Calcari Grigi di Noriglio, calcare Oolitico e Breccie 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.

Figura 1.

(a) Mappa strutturale semplificata della zona emiliana, raffigurante le principali linee di sovrascorrimento dell'Appennino settentrionale. **(b)** Sezione geologica tracciata lungo la linea nera della Figura 1a (modificata da Carminati et al., 2010): Q—depositi marini e continentali quaternari, P2—depositi marini terrigeni (Pliocene medio-superiore), P1—depositi terrigeni ed evaporitici (tardo Miocene-basso Pliocene), O-M—depositi calcareo-marnosi e terrigeni (Oligocene-Miocene), Ca—carbonati (Mesozoico-Eocene), B—Basamento Paleozoico.



Il fluido estratto dal giacimento è composto da olio, gas metano ed acqua di strato (ossia l'acqua fossile caratterizzata da un elevato contenuto di sali).

Nel campo sono presenti 11 pozzi, di cui 1 dedicato alla reiniezione (Cavone 14); l'acqua di strato viene infatti reiniettata all'interno del giacimento dal quale è stata estratta insieme all'olio e al gas.

3_Rete di monitoraggio sismico

La rete sismica di Cavone nella sua configurazione attuale, è stata installata nel dicembre 1992 ed è operativa. Si compone di quattro stazioni dotate di sismometro triassiale (in grado cioè di registrare i movimenti del suolo nelle direzioni verticale, nord-sud ed est-ovest). I nomi e le coordinate delle stazioni sono riportate nella Tabella 1, mentre la loro localizzazione rispetto al giacimento è visibile nella mappa di Figura 2. Tutte le stazioni sono ampiamente comprese nel cosiddetto Dominio Interno (DI, vedi Glossario).

Dal 18 dicembre 2018 gli acquisitori sono stati sostituiti con dei Dymas 24 prodotti dalla SolGeo (e sono conseguentemente stati cambiati i sistemi di alimentazione e trasmissione dati) in modo da avere una registrazione dei dati in continuo e una sincronizzazione temporale tramite GPS.

La trasmissione dei dati in tempo reale è funzionante (prima connessione eseguita dalla SPM in data 7 giugno 2019), ma per il momento continuiamo a utilizzare i dati off-line per maggiore affidabilità e completezza, mentre le procedure di analisi in tempo quasi reale sono in corso di validazione.

Prendiamo inoltre in considerazione le otto stazioni della rete sismica nazionale gestita dall'INGV che si trovano entro un raggio di 50 km dal comune di San Possidonio (il comune al centro del giacimento), a

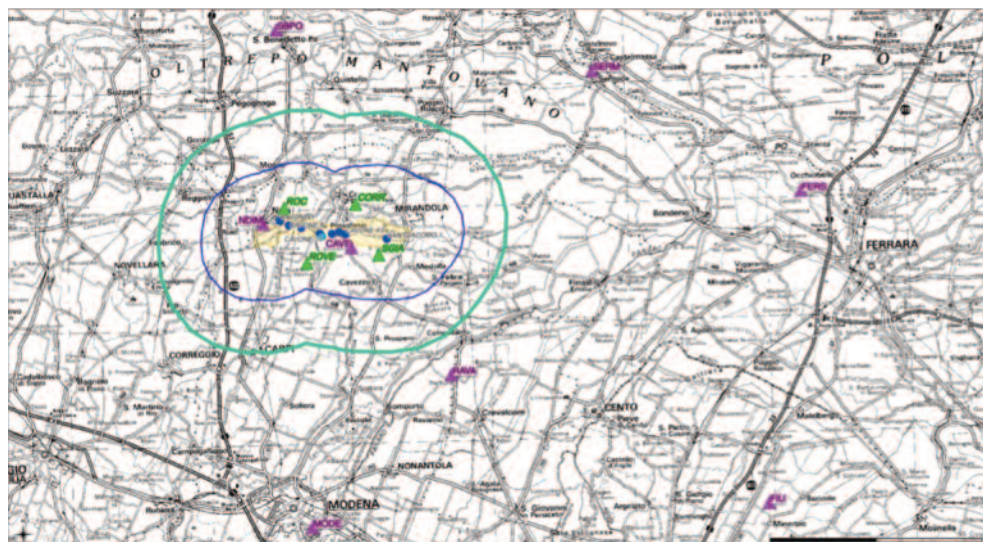
Tabella 1.

Elenco delle stazioni sismiche attive al centro olio Cavone: nomi e coordinate geografiche.

STAZIONE	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA (m)
CORR	44° 54' 07"	11° 00' 34"	12
ROCC	44° 54' 00"	10° 55' 27"	17
ROVE	44° 51' 11"	10° 56' 59"	21
SGIA	44° 51' 33"	11° 02' 09"	20

Figura 2.

Mappa dell'area interessata dalle attività del centro olio Cavone e delle stazioni sismiche presenti nell'area. I triangoli verdi rappresentano le stazioni della rete di Cavone, i triangoli viola le stazioni della rete nazionale INGV, i cerchi blu i pozzi di produzione del campo, il cerchio azzurro il pozzo di reiniezione. Il poligono giallo rappresenta l'estensione del giacimento Cavone. La linea blu delinea il limite del Dominio Interno dei 5 km (DI), mentre quella verde il Dominio Esteso di 10 km (DE).



possibile integrazione della rete sismica locale. Nel caso cioè la rete di Cavone registri un evento, controlliamo se anche qualcuna di queste otto stazioni INGV ha potuto registrare il segnale. Principalmente si tratta di terremoti locali di bassissima energia che vengono registrati solo alle stazioni più prossime all'ipocentro, dato che già a distanze di qualche chilometro il segnale scompare all'interno del cosiddetto "rumore di fondo" (le normali oscillazioni della terra che si registrano abitualmente).

Le otto stazioni INGV sono mostrate nella mappa di Figura 2: due di queste sono ubicate all'interno del DI, in corrispondenza del giacimento (CAVE e NDIM), una si situa appena fuori dal DE verso sud-est (RAVA), mentre le restanti cinque stazioni (FIU, FERS, MODE, SBPO e SERM) sono esterne anche al DE, con distanze dal giacimento di ~30/50 km.

Complessivamente, la rete sismica utilizzata per l'analisi della microsismicità consta dunque di 4 sismometri gestiti dal concessionario e 8 della rete sismica nazionale INGV. La rete così composta non risponde appieno alle indicazioni degli ILG, ma rappresenta un passo nella direzione del potenziamento progressivo e graduale della rete di monitoraggio, secondo il principio di valorizzazione della struttura osservativa esistente (secondo raccomandazioni degli ILG) e permette di condurre la sperimentazione necessaria.

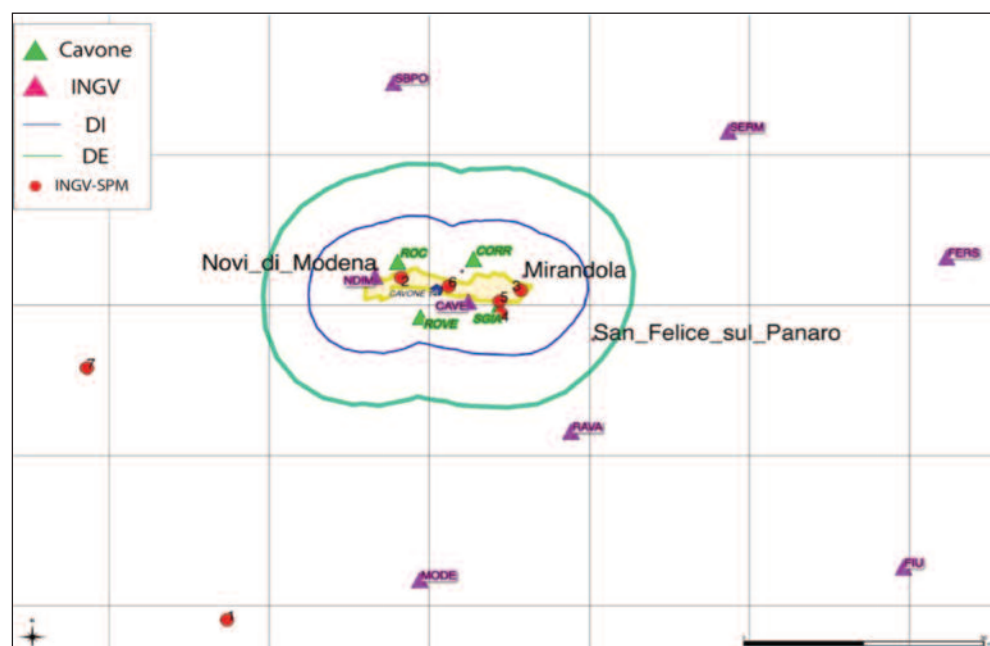
4_Dati sismici del primo trimestre 2019

Nel periodo gennaio-marzo 2019 la rete di monitoraggio sismico locale del centro olio Cavone ha registrato e localizzato 7 eventi di magnitudo M_l comprese tra 0.5 e 2. L'ultimo evento del 27 marzo (il più energetico) non risulta più nell'elenco del sito labcavone.it alla data del 28 giugno 2019. La rete sismica Nazionale invece ha rilevato in questi 3 mesi solo un evento nell'area di 30 km di raggio da San Possidonio, evento che non è presente nel catalogo locale su LabCavone. Tramite l'analisi dei segnali sismici registrati alle 4 stazioni locali e alle 3 stazioni INGV più vicine (ma principalmente CAVE e NDIM, le sole che hanno registrato chiaramente tutti i segnali, e solo in due occasioni RAVA) è stato possibile ri-localizzare con maggiore precisione tutti gli eventi come mostrato nella mappa di Figura 3.

La stima della magnitudo locale sopra riportata è quella pubblicata sul sito labcavone.it, ci riserviamo di effettuare una nostra stima autonoma della magnitudo nei prossimi mesi. La stima della magnitudo, infatti, ha bisogno di essere testata e calibrata su diversi terremoti prima di raggiungere una certa affidabilità, e nel

Figura 3.

Mappa delle localizzazioni dei sette eventi calcolate tramite questa analisi. Il poligono giallo rappresenta l'estensione del giacimento Cavone, la linea blu rappresenta il limite del Dominio Interno dei 5 km (DI) e quella verde il Dominio Esteso di 10 km (DE). I triangoli verdi rappresentano le stazioni della rete di Cavone, i triangoli viola le stazioni della rete nazionale INGV. I cerchi rossi mostrano gli epicentri degli eventi analizzati con associato il numero in ordine di occorrenza come da Tabella A2.



periodo 2017–2018 sono avvenuti solamente una trentina di eventi. Per questo motivo abbiamo richiesto di poter analizzare i dati pre-2017, che ci sono stati consegnati dal concessionario durante la riunione del tavolo operativo in data 10/10/2018 e siamo in fase di valutazione.

Analogamente ci riserviamo di effettuare ulteriori test sulle curve di risposta di questi nuovi strumenti prima di riportare il calcolo delle PGA e PGV osservate.

A parte due eventi che si localizzano esternamente al DE, cinque eventi ricadono internamente al DI (come visibile dalle Figure 3 e 4, e riportato in Tabella 2), uno solo di questi ha una magnitudo superiore alla soglia indicativa di 1.5 riportata nelle ILG (e in Figura 5 riportiamo la suddivisione nei livelli di attivazione e i valori indicativi) che determinerebbe un innalzamento del livello di attivazione secondo il sistema decisionale di tipo a semaforo dall'ordinarietà (livello 0 - verde) all'attenzione (livello 1 - giallo). L'ultimo evento (quello localizzato dalla RSN e non da LabCavone) si situa al confine del DE con M_l pari a 2.5.

Figura 4.

Le due sezioni verticali mostrano la localizzazione degli ipocentri calcolati per gli otto eventi rilevati nel primo trimestre 2019. Con il rettangolo blu è indicata la posizione del pozzo di re-iniezione Cavone 14, i cerchi rossi sono gli ipocentri degli eventi, la linea tratteggiata indica la profondità del giacimento (circa 2.9 km sotto la superficie) e con le linee azzurra e verde sono delineati i confini dei due domini rispettivamente interno ed esteso.

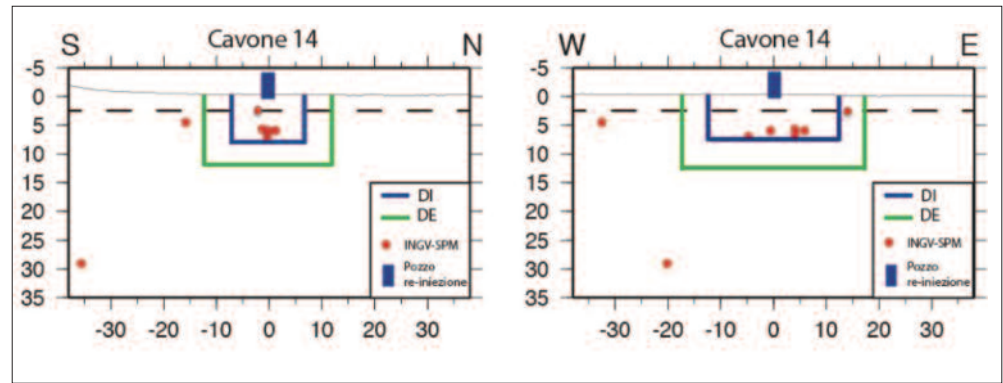


Tabella 2.

Tabella riassuntiva degli eventi analizzati e come ricadono all'interno dei due Domini definiti la concessione di Mirandola, nel primo trimestre (gennaio-marzo) del 2019.

DOMINIO	EVENTI
INTERNO (5 km dal giacimento)	5 – di cui 1 con $1.5 < M_l < 2.2$ (M_l 1.6)
ESTESO (5–10 km dal giacimento)	1 con $M_l = 2.5$

Si fa notare che le soglie definite nelle ILG sono puramente indicative e “che i valori di soglia devono essere definiti ed esplicitati nel DGOM [Documento di Gestione Operativa del Monitoraggio, ndr] caso per caso per ogni concessione, anche in funzione delle caratteristiche sismotettoniche dell'area di attività e comunque dopo il periodo di monitoraggio previsto in condizioni non perturbate [...], in cui viene rilevata la sismicità di fondo” (ILG, 2014, cap. 9.4, p. 28).

Nel caso di Cavone (in quanto sito già operativo all'inizio del monitoraggio) non essendo disponibile un'analisi della sismicità di fondo in condizioni non perturbate, ci riferiamo ai valori riportati nelle ILG durante la fase sperimentazione in atto.

Figura 5.

Definizione dei livelli di attivazione (pannello a) e dei valori indicativi per il passaggio da un livello al successivo (pannello b) come da ILG.

Livello di attivazione	Stato corrispondente	Livello di attivazione	Semaforo	M_{max}	PGA (% g)	PGV (cm/s^3)
0	Ordinarietà	0	Verde	$M_{max} \leq 1.5$	-	-
1	Attenzione	1	Giallo	$M_{verde} \leq M_{max} \leq 2.2$	0.5	0.4
2	Riduzione delle attività	2	Arancio	$M_{giallo} \leq M_{max} \leq 3.0$	2.4	1.9
3	Sospensione delle attività	3	Rosso	$M_{arancio} < M_{max}$	6.7	5.8

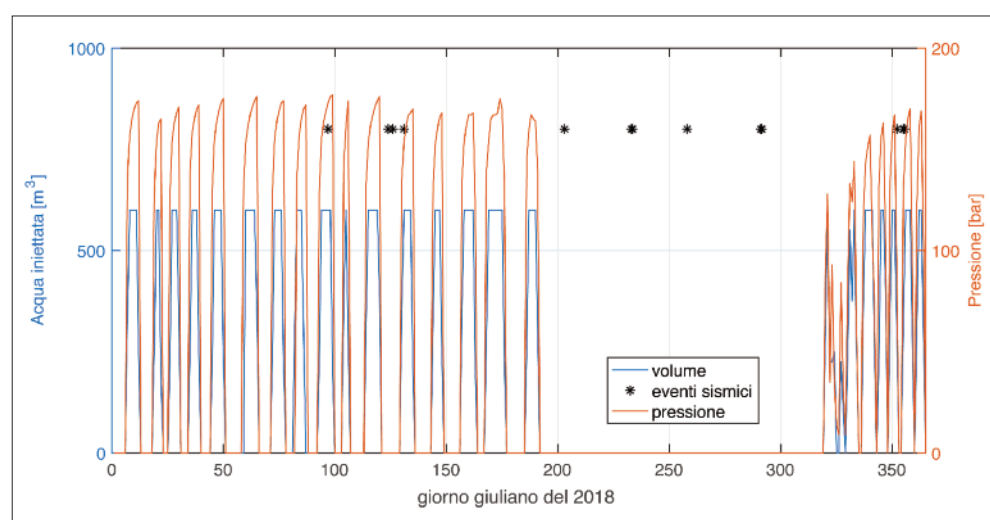
5_Monitoraggio delle pressioni di poro

Non è possibile eseguire un vero e proprio monitoraggio delle pressioni di poro dato che le pressioni di fondo pozzo vengono misurate una volta all'anno nel momento di fermo per manutenzione dell'impianto. Abbiamo però le informazioni relative al volume di acqua iniettata e alla pressione di iniezione (di testa) al pozzo Cavone 14, misurate con cadenza giornaliera da gennaio 2018 a dicembre 2018. Dall'11 luglio al 15 novembre 2018 l'impianto è rimasto inattivo per manutenzione (come mostrato in Figura 6).

Il grafico di Figura 6 mostra l'andamento di questi parametri confrontandolo con i tempi di occorrenza degli eventi rilevati alla rete sismica locale (asterischi). Purtroppo la serie temporale è corta e gli eventi sismici sono troppo scarsi per poter osservare eventuali correlazioni, ma di sicuro per quanto disponibile ad oggi non sembra si possa rilevare alcun legame tra l'accadimento degli eventi e l'attività al pozzo re-iniettore.

Figura 6.

Andamento temporale dell'attività industriale al pozzo Cavone 14 di re-iniezione delle acque di scarto (dal giorno giuliano 192 al 319 l'impianto era fermo per manutenzione). In blu i volumi giornalieri iniettati e in rosso la pressione corrispondente. Con gli asterischi vengono indicati i giorni in cui sono stati rilevati degli eventi sismici dalla rete sismica locale.



6_Conclusioni

La rete sismica usata per il monitoraggio della microsismicità nei domini definiti per la concessione di Mirandola si compone di 4 stazioni locali gestite dal concessionario e 8 stazioni INGV in un raggio (sovradimensionato) di 50 km intorno al comune di San Possidonio (sito grossomodo nel punto centrale della proiezione in superficie del giacimento). L'analisi della sismicità registrata nel primo trimestre 2019 ha rilevato 7 eventi locali di magnitudo ML comprese tra 0.5 e 2. Di questi 5 ricadono all'interno dell'area definita come Dominio Interno (DI) e uno ha una magnitudo superiore alla soglia (puramente indicativa) di 1.5 riportata negli ILG come valore utile per far passare al livello di attivazione n.1 (semaforo giallo).

La rete GPS si compone di una stazione installata dal concessionario in data 18 dicembre 2018. La trasmissione dei dati verrà organizzata nel corso dei prossimi incontri del Comitato Operativo e saranno poi analizzati dalla SPM.

Le pressioni di poro di fondo pozzo sono misurate dal concessionario annualmente in occasione del fermo per manutenzione. Quelle di testa pozzo sono state passate alla SPM in formato di dato giornaliero il cui andamento temporale viene messo a confronto dell'occorrenza temporale degli eventi sismici registrati nel grafico di figura 6. Non sembra sussistere nessuna correlazione tra i due processi.

Appendice A

Concessione di coltivazione idrocarburi “Mirandola” Monitoraggio Sismico - Anno 2019, Relazione n. I

A1_Caratteristiche tecniche della rete di monitoraggio sismico

La rete di monitoraggio sismico del centro olio Cavone si compone delle quattro stazioni CORR, ROCC, ROVE, e SGIA elencate in Tabella 1 e indicate con triangoli verdi nella mappa di Figura 2. Sono tutte equipaggiate con strumenti di tipo Dymas 24 della SolGeo (che hanno sostituito i vecchi acquisitori Mars88 della Lennartz con l'aggiornamento delle rete effettuato il 18 dicembre 2018) e sismometro Lennartz LE3D-1s triassiale della Lennartz Electronic. La frequenza di campionamento è di 200 campioni al secondo (passo di 0.005 s) che consentono una risoluzione fino alla frequenza massima di 80 Hz. Con questa conformazione l'attuale rete sismica acquisisce in continuo dati che vengono sincronizzati temporalmente tramite il segnale GPS.

Le otto stazioni della rete sismica nazionale (INGV) che esaminiamo in caso di evento sismico, ad integrazione della rete locale, sono dotate di diversa strumentazione e spaziano dallo short-period (SP), al broad-band (BB), all'accelerometro (AC), qualche stazione si compone di due strumenti collocati, e nel caso della stazione SERM il sensore è posizionato in pozzo ad una profondità di 135 m. Le specifiche tecniche sono riassunte di seguito, ma ricordiamo che tutte le informazioni relative agli strumenti si possono trovare in rete sul sito <http://cnt.rm.ingv.it/instruments/network/IV>:

- (1) CAVE: BB - Nanometrics Triullium 120s
- (2) FIU: SP - Lennartz LE3D-5s
- (3) FERS: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP
- (4) MODE: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T
- (5) NDIM: AC + BB - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP + Nanometrics Triullium 40s
- (6) RAVA: SP - Lennartz LE3D-5s
- (7) SBPO: AC - Kinematics Episensor-FBA-ES-T-CL-2G-FS-40-VPP
- (8) SERM: AC + SP - Lennartz LE3D-1s — in pozzo: -135m.

A2_Analisi dei dati del primo trimestre

Per quanto riguarda il primo trimestre del 2019 il sito LabCavone (<http://labcavone.it/>) riporta 7 terremoti locali. Da catalogo sismico INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/>), effettuando una ricerca degli eventi del primo trimestre 2019 localizzati entro un raggio di 30 km intorno a San Possidonio (parametri concordati nel corso della riunione del tavolo operativo del 10/10/2018) si ottiene una lista di 1 evento. In Tabella A1 riportiamo la lista di tutti questi

eventi (1 INGV e 7 LabCavone con la specifica della provenienza della localizzazione nell'ultima colonna) e per chiarire meglio la localizzazione di ogni evento mostriamo i risultati come riportati nei due diversi cataloghi (INGV e LabCavone) nella mappa di Figura A1.

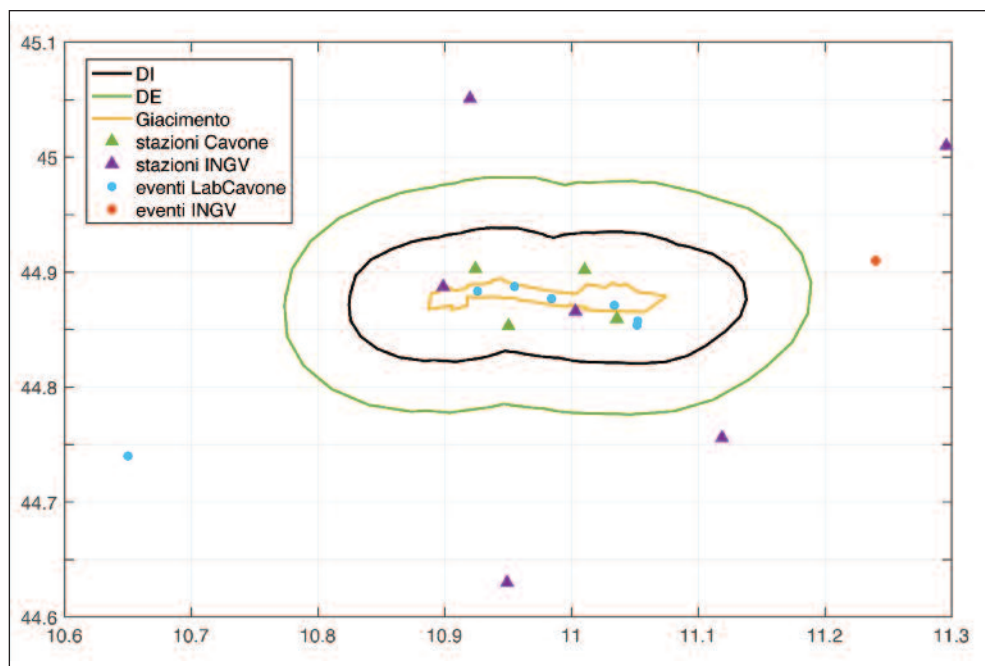
Tabella A1.

Lista degli 8 eventi registrati e localizzati nel primo trimestre 2019 da LabCavone (7) e INGV (1 in un raggio di 30 km da San Possidonio, limite utilizzato per la ricerca degli eventi dal catalogo INGV). L'ultima colonna mostra la provenienza del dato (INGV e/o LabCavone).

DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	MI	CATALOGO
2019-01-10	23:53	44.8875	10.9550	4.9	0.5	LabCavone
2019-01-17	01:03	44.8835	10.9258	6.4	0.9	LabCavone
2019-03-03	15:21	44.8540	11.0517	5.4	1.4	LabCavone
2019-03-03	16:08	44.8575	11.0522	5.4	1.6	LabCavone
2019-03-07	03:30	44.8712	11.0338	5.5	1.1	LabCavone
2019-03-13	14:22	44.91	11.24	9	2.5	INGV
2019-03-23	03:53	44.8770	10.9842	4.7	0.6	LabCavone
2019-03-27	16:36	44.7400	10.6500	22.0	2.0	LabCavone

Figura A1.

Mappa delle stazioni e di tutti i terremoti in Tabella A1 localizzati nel terzo e quarto trimestre del 2018 da LabCavone (triangoli verdi e cerchi neri) e dalla rete sismica nazionale dell'INGV (triangoli e cerchi viola). Il contorno giallo ricalca i confini del giacimento, quello blu delimita l'estensione del DI e quello in verde l'estensione del DE.



Dopo aver analizzato i dati sismici in continuo ricevuti su hard disk esterno, abbiamo verificato la presenza degli stessi 7 eventi elencati sul sito LabCavone e anche dell'unico evento sismico rilevato dalla rete nazionale INGV. Gli eventi sono stati localizzati in base alle letture dei tempi di arrivo delle fasi P ed S effettuate sulle 4 stazioni locali (CORR, ROC, ROVE, SGIA) e su 3 delle stazioni INGV più vicine (CAVE, NDIM, e RAVA, quest'ultima solo nel caso di un terremoto). Il software utilizzato per la localizzazione 1-D della sismicità è HYPOELLIPSE

(Lahr, 1999). Il modello di velocità 1-D impiegato è quello creato ad hoc per l'analisi dei dati della rete di monitoraggio del giacimento (Relazioni periodiche, 2017).

Il primo degli eventi, del 10 gennaio 2019 di ML 0.5 a 4.9 km di profondità, localizzato da LabCavone all'interno del giacimento, alla SPM risulta particolarmente difficile da localizzare vista la scarsa qualità delle forme d'onda e la possibilità di lettura dei tempi di arrivo. Nonostante l'utilizzo delle stazioni della Rete Sismica Nazionale INGV che hanno consentito la lettura dei tempi di arrivo del terremoto (2 fasi P ed una S) in aggiunta alle sole tre letture (2 fasi P ed una S) effettuate alle stazioni della rete di Cavone, la localizzazione del terremoto risulta di scarsa qualità formale e con grandi errori sia sul piano orizzontale che in profondità. Pertanto secondo il parere della SPM tale terremoto è da ritenersi rilevabile ma non localizzabile.

Gli altri 5 terremoti di LabCavone, ad eccezione di quello del 27 marzo 2019 che risulta ampiamente fuori del Dominio esterno di rilevazione sia per la localizzazione originale (LabCavone) che per quella SPM, ricadono tutti all'interno del Dominio Interno. Secondo la localizzazione fornita da LabCavone 3 eventi su 5 ricadono all'interno del giacimento, mentre per la SPM 4/5 eventi ricadono all'interno del Giacimento. Tali eventi hanno una differenza di localizzazione in profondità di alcune centinaia di metri a seconda del tipo di localizzazione. Poiché il modello di velocità 1-D di partenza è più o meno lo stesso e anche il software di localizzazione ha funzionamenti di inversione più o meno simili, la diversa localizzazione è imputabile alle incertezze sulla lettura delle fasi S, e/o al diverso numero di fasi disponibili.

L'evento del 13 marzo 2019 riportato nel catalogo INGV (<http://cnt.rm.ingv.it/event/21834391>) è stato localizzato dalla sala di monitoraggio con l'ausilio delle sole stazioni della RSN (tra cui FIU, RAVA, CAVE tra quelle che consideriamo noi). In questa relazione riportiamo la rilocalizzazione che abbiamo ottenuto aggiungendo a quelle delle stazioni RSN le forme d'onda delle stazioni della rete di Cavone. Sulla stazione NDIM il segnale del terremoto è completamente nascosto dall'alto livello di rumore. L'evento nella localizzazione INGV riporta una ML 2.5, una profondità di 9 km e mostra la sua posizione a circa 4 km ad EST del DE del giacimento. La localizzazione presentata qui come SPM invece pone l'evento a profondità molto più superficiali (2.2 km) e lo posiziona al confine del DE del Giacimento (Figure A4 e A5). Nonostante le fasi S ad alcune stazioni, ad esempio

Tabella A2.

Lista degli eventi registrato dalle stazioni locali di Cavone e della rete sismica nazionale dell'INGV, con localizzazione calcolata attraverso l'analisi della SPM.

N	DATA (aaaa-mm-gg)	ORA (UTC)	LAT	LON	DEPTH (km)	RMS	ERH (km)	ERZ (km)
1	2019-01-10	23:52	44.5955	10.7327	29.01	99.0	99.0	347
2	2019-01-17	01:03	44.8865	10.9280	6.90	0.6	0.8	125
3	2019-03-03	15:21	44.8758	11.0623	5.88	2.1	1.3	326
4	2019-03-03	16:08	44.8563	11.0400	5.61	2.3	1.1	292
5	2019-03-07	02:30	44.8663	11.0390	6.34	0.7	0.5	183
6	2019-03-13	14:22	44.8243	11.1633	2.19	0.08	0.9	0.2
7	2019-03-23	03:53	44.8788	10.9812	5.81	1.2	1.0	256
8	2019-03-27	16:36	44.8095	10.5755	4.43	99.0	99.0	350

SGIA e FIU, siano poco visibili (e non vengono utilizzate nella localizzazione), la qualità formale della localizzazione appare buona, con errori ampiamente entro il km sia in orizzontale che in verticale.

In Tabella A2 sono riportati i risultati delle nostre localizzazioni per i sette eventi disponibili per questo periodo con gli errori corrispondenti. Le localizzazioni degli epicentri sono mostrate in mappa in Figura A2 e nelle sezioni di Figura A3, a confronto con le localizzazioni riportate da LabCavone.

Si nota come in genere gli ipocentri corrispondenti allo stesso evento cadano vicini con differenze dettate probabilmente dal diverso software utilizzato e/o dalle inevitabili differenze nelle letture delle fasi P e S. La localizzazione effettuata dall'INGV-SPM e mostrata in questa relazione è probabilmente più accurata grazie all'aggiunta di dati provenienti dalle stazioni della rete nazionale che aiutano a migliorare la soluzione, soprattutto nella determinazione della profondità.

Cinque di questi otto eventi ricadono, secondo le nostre localizzazioni, all'interno del DI, uno resta comunque confinato al limite del DE, mentre gli ultimi due sono decisamente esterni al DE (Figure A2, A3, A4 e A5).

Figura A2.

Mappa delle stazioni e degli eventi localizzati nel primo trimestre del 2019 da LabCavone e dalla SPM con questa analisi. I triangoli verdi/viola identificano le stazioni sismiche della rete locale di Cavone e dell'INGV rispettivamente. I cerchi rossi mostrano gli epicentri come calcolati dall'INGV-SPM (Tabella A2), mentre i cerchi azzurri rappresentano gli epicentri degli stessi eventi più i due ultimi di dicembre 2018 come calcolati da LabCavone (Tabella A1). Il contorno blu delimita l'estensione del DI, mentre quello in verde l'estensione del DE.

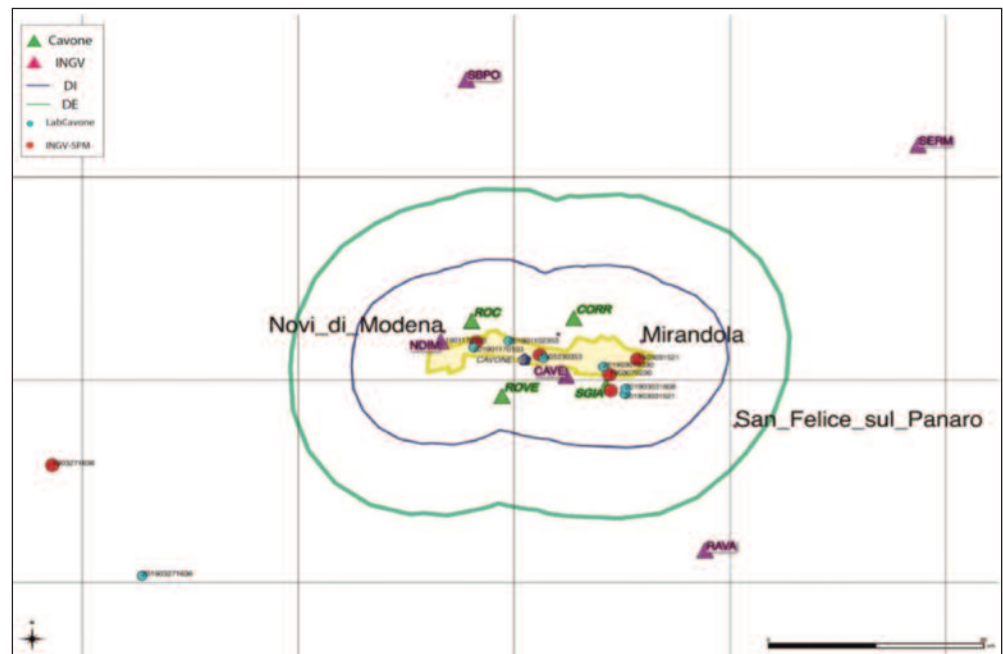


Figura A3.

Sezioni verticali della sismicità localizzata. Il cerchio rosso gli ipocentri calcolati dall'INGV-SPM. I cerchi azzurri rappresentano gli ipocentri degli stessi eventi come riportati in LabCavone (Tabella A1). La linea continua orizzontale delinea la superficie del terreno, quella tratteggiata in marrone la profondità del giacimento. La linea blu schematizza il contorno del DI (5 km in profondità a partire dalla profondità del giacimento), mentre la linea verde schematizza il DE (10 km a partire dalla profondità del giacimento).

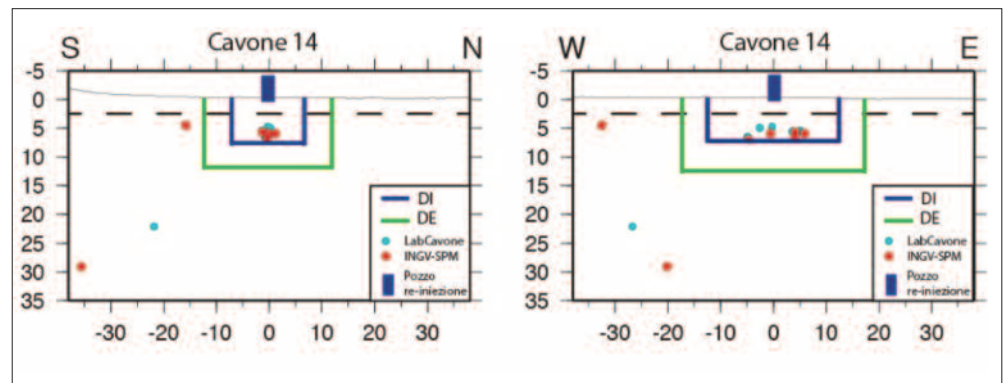


Figura A4.

Mappa delle stazioni e dell'evento INGV ri-localizzato dalla SPM con questa analisi. I triangoli verdi/viola identificano le stazioni sismiche della rete locale di Cavone e dell'INGV rispettivamente. I cerchi rossi mostrano gli epicentri come calcolati dall'INGV-SPM (Tabella A2). Il contorno blu delimita l'estensione del DI, mentre quello in verde l'estensione del DE.

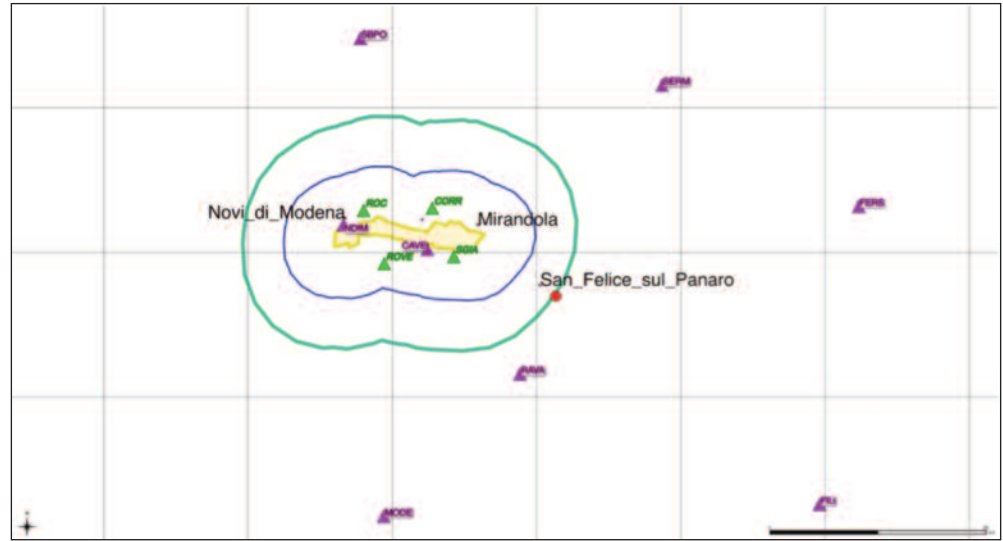
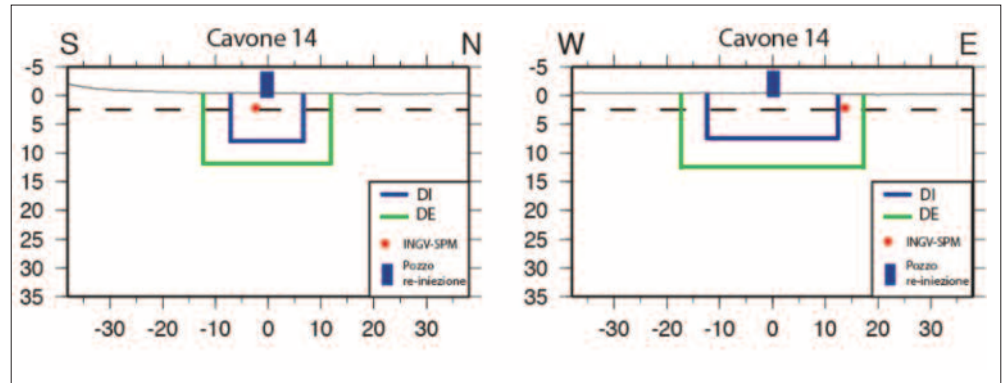


Figura A5.

Sezioni verticali dell'evento INGV ri-localizzato. Il cerchio rosso indica la posizione dell'ipocentro calcolata dall'INGV-SPM. La linea continua orizzontale delinea la superficie del terreno, quella tratteggiata in marrone la profondità del giacimento. La linea blu schematizza il contorno del DI (5 km in profondità a partire dalla profondità del giacimento), mentre la linea verde schematizza il DE (10 km a partire dalla profondità del giacimento).



Glossario

MiSE:	Ministero dello Sviluppo Economico.
DGS:	Direzione Generale per la Sicurezza anche ambientale delle attività minerarie ed energetiche.
UNMIG:	Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse.
RER:	Regione Emilia-Romagna.
INGV:	Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.
ILG:	Indirizzi e Linee Guida per il monitoraggio.
SPM:	Struttura Preposta al Monitoraggio (nel caso di Cavone l'INGV, come da protocollo operativo firmato il 15/11/2016).
DI:	Dominio Interno di rilevazione definito nelle ILG come il volume che si estende fino in superficie incluso la zona mineralizzata (giacimento) e un'ulteriore fascia che si estende ai lati e sotto fino ad una distanza di 5 km del giacimento stesso (nel caso di Cavone in cui è prevista reiniezione all'interno del giacimento).
DE:	Dominio Esteso di rilevazione definito nelle ILG come il volume incluso tra 5 e 10 km dal bordo del DI.

Bibliografia

Carminati, E., D. Scrocca and C. Doglioni (2010). Compaction-induced stress variations with depth in an active anticline: Northern Apennines, Italy. *Journal of Geophysical Research*, 115 (B02401); <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006395>.

[org/10.1029/2009JB006395](http://dx.doi.org/10.1029/2009JB006395).

Fantoni, R., and R. Franciosi (2010). Tectono-sedimentary setting of the Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali*, 21 (Suppl. 1), 197–209; <https://doi.org/10.1007/s12210-010-0102-4>.

ILG (2014). Indirizzi e linee guida per il monitoraggio della sismicità, delle deformazioni del suolo e delle pressioni di poro nell'ambito delle attività antropiche; <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/dettaglionotizia.asp?id=238>.

[agenda/dettaglionotizia.asp?id=238](http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/dettaglionotizia.asp?id=238).

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/>.

Relazioni periodiche (2017). Relazioni periodiche sui risultati del monitoraggio - Concessione di coltivazione "Mirandola" (Campo di Cavone) - Anno 2017.

Reutter, K.J., P. Giese and H. Closs (1980). Lithospheric split in the descending plate: observations from the Northern Apennines. *Tectonophysics*, 64 (1–2), T1–T9; [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(80\)90254-1](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(80)90254-1).

