


VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE PER
REALIZZAZIONE DI POZZI GEOTERMICI E DI UNA
CENTRALE ORC PER PRODUZIONE DI ENERGIA
ELETTRICA NEL COMUNE DI JOLANDA DI SAVOIA (FE)

RELAZIONE SISMOTETTONICA

SOCIETÀ RICHIEDENTE  GEOTERMIA ZERO EMISSION ITALIA SRL Sede legale: via Maurizio Gonzaga 2, Milano PEC: Geotermia.italia@legalmail.it		TECNICI INCARICATI Dr Davide Scrocca  via S. Pellico 14-16 - 50052 Certaldo (Fi) - tel. 0571651312 email: info@idrogeosrl.it
TITOLO ELABORATO Relazione sismotettonica		
DATA DICEMBRE 2022	RIF. FILE -	SCALA -

0A	18/12/2022	PRIMA EMISSIONE	D. Scrocca	D. Scrocca	A.Murratzu
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	ESAMINATO	ACCETTATO

Il presente disegno è aziendale. La società tutela i propri diritti a termine di legge./ This file is company property. Company lawfully all rights.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 2 di 37
--	--	-------------------

Sommario

1	Premessa	3
2	Inquadramento geologico-strutturale	4
3	Caratterizzazione sismotettonica	8
3.1	SISMICITÀ STORICA	10
3.2	SISMICITÀ STRUMENTALE	13
3.3	SORGENTI SISMOGENETICHE DISS 3.2.0	14
3.4	CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI ITHACA	16
3.5	CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA	19
4	Analisi delle faglie attive e potenziale attive	22
5	Impianti geotermici e sismicità indotta/innescata	27
6	Conclusioni	30
7	Bibliografia	33

	<p style="text-align: center;"><u>Pola</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Relazione sulla Sismotettonica</u></p>	Pagina 3 di 37
--	---	-------------------

1 Premessa

Questa relazione è stata elaborata per la redazione della documentazione tecnica nell'ambito del procedimento di Valutazione di Impatto Ambientale relativo progetto geotermico "POLA".

Nel seguito, viene fornito un inquadramento dell'assetto geologico strutturale dell'area di interesse, un'analisi dei dati contenuti nelle principali banche dati di carattere sismologico e sismotettonico e, in particolare, una descrizione delle caratteristiche delle faglie attive e delle strutture sismogenetiche note nell'area del permesso e in un intorno di circa 15 km dal sito interessato dal progetto.

Infine, vengono anche discusse le possibili relazioni tra attività di coltivazione di risorse geotermiche e sismicità indotta/innescata.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 4 di 37
--	--	-------------------

2 Inquadramento geologico-strutturale

La Pianura Padana può essere considerata, in generale, come un'area di avanfossa che si è originata per la subduzione verso ovest della microplacca padano-adriatica al di sotto dell'orogene appenninico. La microplacca padano-adriatica, è delimitata dal fronte degli accavallamenti sud alpini a Nord e dinarici ad Est.

La subduzione verso Ovest, in direzione opposta al flusso del mantello, provoca l'arretramento verso Est della placca in subduzione. Questo fenomeno (*slab retreat*) è responsabile della progressiva migrazione del sistema catena-avanfossa verso l'avampaese ed in parte della subsidenza a cui è sottoposta l'intera area (e.g., Royden, 1988; Doglioni, 1991; Scrocca et al., 2007).

Nella parte meridionale della Pianura Padana, al di sotto della spessa copertura plio-pleistocenica, è ubicato il fronte dell'Appennino settentrionale, che non coincide con il fronte morfologico della catena. Tale fronte è costituito da un sistema a pieghe e sovrascorrimenti di età terziaria sviluppatosi al tetto della zona di subduzione (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Bigi et al., 1992; Boccaletti et al., 2004; Cuffaro et al., 2010; Fantoni & Franciosi, 2010; Boccaletti et al., 2011; Livani et al., 2018)).

I dati geologici attualmente disponibili sulle strutture sepolte della Pianura Padana derivano principalmente dai rilievi di sismica a riflessione, realizzati per la ricerca degli idrocarburi negli ultimi decenni (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Pieri, 1983; Fantoni & Franciosi, 2010; Ghielmi et al., 2010). Tale dati mostrano che le strutture tettoniche associate al fronte dell'Appennino settentrionale non presentano un andamento lineare, ma si organizzano in tre grandi archi:

- 1) l'arco del Monferrato è il più occidentale, collocato tra Torino ed Alessandria;
- 2) l'arco delle Pieghe Emiliane, che si estende a nord di Piacenza;
- 3) l'arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole, che si estende fino a nord di Ferrara.

In particolare, l'arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole, attivo principalmente dal Pliocene superiore al Pleistocene, rappresenta l'elemento strutturale più esterno dell'Appennino settentrionale sovrascorso sulla monoclinale pedealpina immergente verso sud-ovest. Tale risulta costituito da un complesso di strutture che può essere suddiviso in tre gruppi minori: le Pieghe Ferraresi, che sono quelle più esterne, le pieghe Romagnole, collocate

SCHEMA TETTONICO

MARE ADRIATICO

MARE LIGURE

Pieghe Ferraresi

Pieghe Romagnole

Pieghe Adriatiche

Traccia di sezione C-C' (Fig. 2.3)

GENOVA

Massa

La Spezia

Porto

Prato

Firenze

Arezzo

Modena

Reggio Emilia

Parma

Piacenza

Rovigo

Ferrara

Ravenna

Forlì

Cesena

Imperia

0 10 20 30 40 50 km

Legend:

- Alluvioni (Pleistocene-Olocene)
- Bacini intramontani (Miocene-Galieno)
- Successione post fase pliocenica inferiore
- Successione epiligurica
- Unità Liguri e Subliguri
- Unità Modeno-Ventasso; Unità Porretta
- Successione pre fase pliocenica inferiore
- Unità Falerone; Unità Corvara/Marnoso-Arenacea
- Unità toscana non metamorfica (a, pre Madigno, b, Madigno)
- Unità Toscana Metamorfiche
- Unità alpine HP/LT
- Principali sovrascorimenti fuori sequenza e strutture plio-quaternarie
- Sovrascorimenti
- Contatti tettonici sottrattivi a basso angolo
- Faglie e contatti tettonici indifferenziati plio-quaternari
- Principali strutture sepolte attive
- Principali strutture Plio-Pleistocene inf. sepolte riattivate
- Principali strutture Mio-Pleistocene inf. sepolte
- Fronte attivo nel basamento
- Fronte attivo nella successione carbonatica
- Limiti stratigrafici
- Discordanze stratigrafiche

Fig. 2

Il bacino Padano è riempito da una spessa coltre di sedimenti clastici sin-tettonici, di età prevalentemente pliocenica e pleistocenica (Fig. 2 e 3). Sebbene la fase principale di compressione sia iniziata nel Messiniano, i primi sedimenti clastici si sono depositi nell'Oligocene superiore, con una provenienza principale dalle Alpi meridionali.

I depositi sin-tettonici di margine attivo poggiano su unità carbonatiche di età mesozoica e terziaria inferiore di margine passivo (Fig. 3), costituite prevalentemente da rocce calcaree e dolomitiche il cui ambiente deposizionale varia da piana di marea-mare poco profondo fino a mare profondo. La base della successione stratigrafica è invece costituita dal

basamento ercinico e da formazioni continentali e di piattaforma del Permiano e del Triassico inferiore-medio, a cui si intercalano talora corpi vulcanici intra-sedimentari.

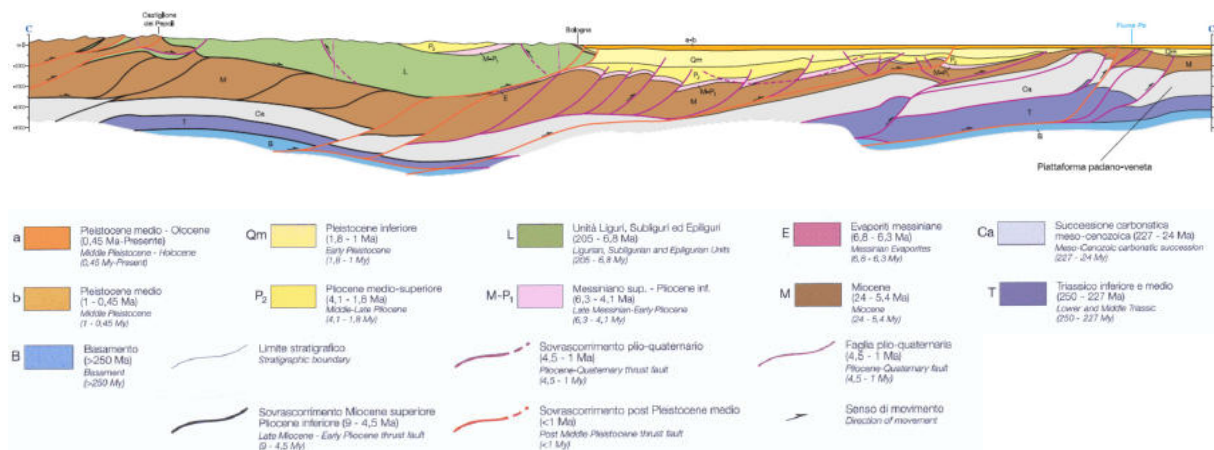


Fig. 2– Sezione geologica regionale attraverso l'arco delle Pieghe Ferraresi-Romagnole (Boccaletti et al., 2004); l'ubicazione della sezione è indicata dalla traccia C-C' nella figura 1.

Il prisma di accrezione appenninico mostra piani di scollamento ubicati a differenti livelli stratigrafici (Fig. 2 e 3): un piano di scollamento superficiale collocato entro la copertura silicoclastica terziaria alla base del Miocene ed uno più profondo ubicato alla base della successione carbonatica del Trias superiore (Bally et al., 1985; Carminati et al., 2010; Livani et al., 2018). I due livelli di scollamento sono collegati da rampe che attraversano la successione carbonatica trasferendo il rigetto dal livello più profondo verso il livello più superficiale (Fig. 2). Inoltre, alcuni ricercatori ipotizzano anche un coinvolgimento del basamento nella strutturazione della catena (e.g., Picotti & Pazzaglia, 2008; Fantoni & Franciosi, 2010; Boccaletti et al., 2011; Turrini et al., 2016; Martelli et al., 2017).

Le strutture del fronte consistono in *fault-related folds* associate a piani di sovrascoglimento i cui angoli d'inclinazione sono mediamente tra i 20° e 30°, con valori tendenzialmente crescenti da Nord verso Sud. In prossimità del margine pede-appenninico le superfici di sovrascoglimento sono infatti più inclinate, con angoli che arrivano anche a superare i 40° (Pieri, 1983; Bally et al., 1985; Castellarin et al., 1985; Carminati et al., 2010).

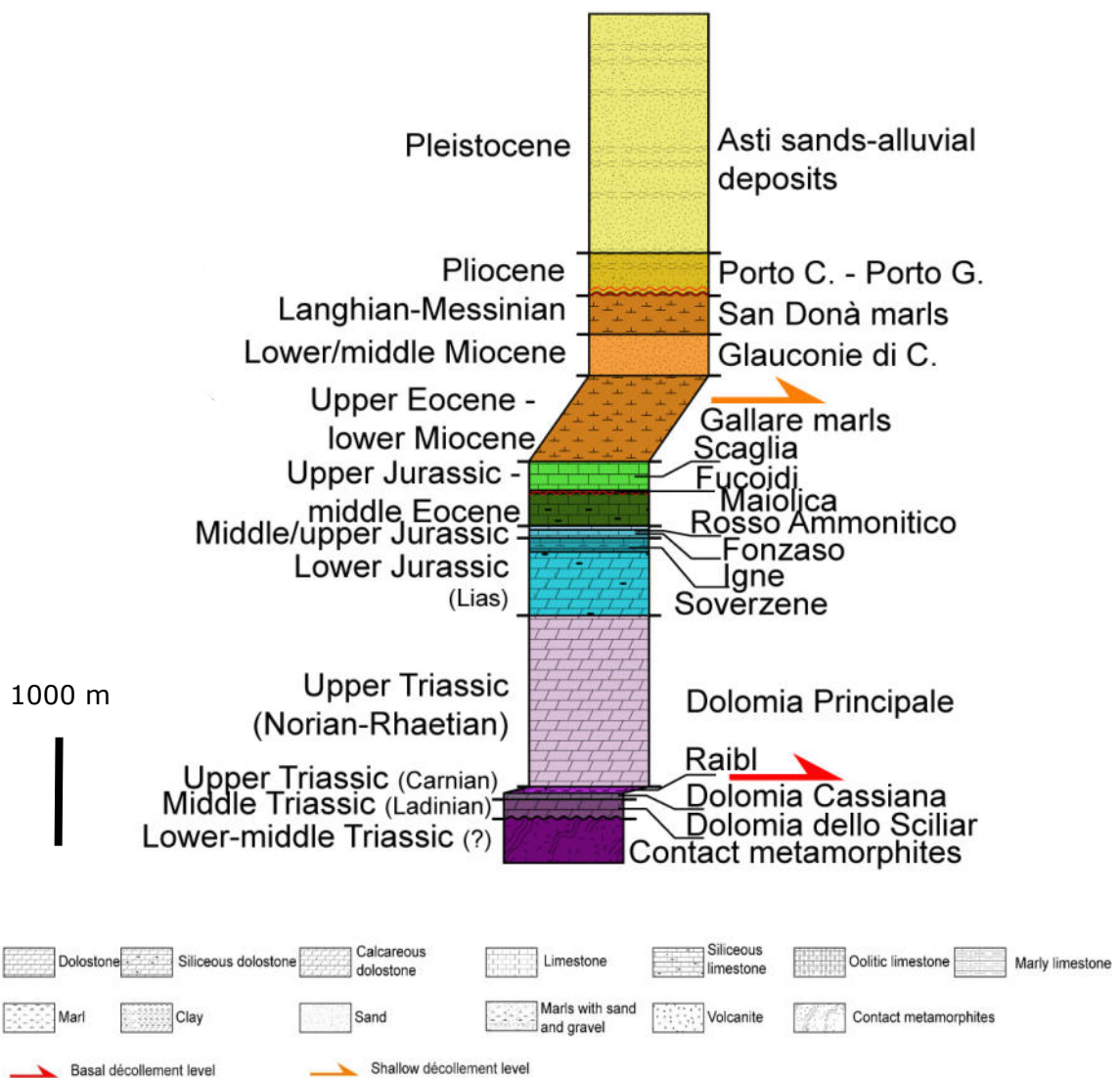


Fig. 3 - Colonna stratigrafica sintetica del settore delle Pieghe Ferraresi-Romagnole (modificato da Livani et al., 2018). Sono evidenziati i principali livelli di scollamento (rosso per lo scollamento basale e arancione per quello superficiale).

La deformazione del settore padano dell'Appennino settentrionale ha avuto inizio nel Messiniano, con una fase di particolare intensità nel corso del Pliocene, ma l'insieme delle evidenze geologiche e geofisiche disponibili documenta in modo chiaro la perdurante attività di diverse fasce di sovrascorrimenti. Tale attività recente risulta associata ad un regime tettonico compressivo con un sigma 1 orientato circa NNE-SSW, provato da *breakout* di pozzo (Montone et al., 2004, 2012), meccanismi focali (Boccaletti et al., 2004; Pondrelli et al., 2006; Calderoni et al., 2009; Vannoli et al., 2015; Martelli, 2017) e dati

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 8 di 37
--	--	-------------------

sismologici (Castello et al., 2006; ISIDE Working Group, 2007; Rovida et al., 2022; Latorre et al., 2023). Analisi del capo di deformazione derivati da geodesia spaziale (e.g., Devoti et al. 2008; Cuffaro et al., 2010) mostrano tassi di raccorciamento di qualche mm/a.

3 Caratterizzazione sismotettonica

Per la caratterizzazione sismotettonica dell'area in studio sono state utilizzate informazioni tratte da diverse banche dati tra cui, in particolare, quelle descritte di seguito.

- 1- "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPT15 v4.0" (Rovida et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>) che fornisce i dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020.
- 2- "Database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani, DBMI14 v4.0" (Locati et al., 2022; <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI>) che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020.
- 3- "Database Sismico Strumentale e Parametrico Italiano, ISIDE" (ISIDE Working Group, 2007; <http://iside.rm.ingv.it/iside/standard/index.jsp>), che fornisce i dati relativi ai terremoti che ricadono sul territorio nazionale e nelle regioni limitrofe registrati dal 1985 al 2022.
- 4- "Database delle sorgenti sismogenetiche Italiane, DISS 3.3.0" (Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2021) che rappresenta la banca dati parametrica delle potenziali sorgenti sismogenetiche di terremoti di magnitudo maggiore di 5.5, in Italia e nelle aree circostanti.
- 5- "Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna", nella sua prima versione (Boccaletti et al., 2004) e nel successivo aggiornamento (Martelli et al., 2017) con le relative Note Illustrative, descrive le principali strutture attive identificate nella Regione Emilia-Romagna.
- 6- "Catalogo delle Faglie Capaci" (Michetti et al., 2000; ITHACA Working Group, 2019) che contiene la distribuzione territoriale e la caratterizzazione delle faglie capaci, corrispondenti a faglie per le quali è stata documentata o ritenuta possibile una dislocazione superficiale cosismica.

Informazioni aggiuntive sono state riprese anche da pubblicazioni scientifiche relativamente a dati di sottosuolo (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Castellarin et al., 1985; Cassano et al., 1986; Bigi et al., 1992; Scrocca et al., 2007; Toscani et al., 2009; Carminati et al., 2010; Fantoni & Franciosi, 2009, 2010; Turrini et al., 2016; Livani et al., 2018; Turrini et al., 2018) e ad informazioni sul campo di stress (Montone et al., 2004; 2012), sui tassi di deformazione derivati da geodesia spaziale (e.g., Devoti et al. 2008; Cuffaro et al., 2010), meccanismi focali (Pondrelli et al., 2006; TDMT database: <http://cnt.rm.ingv.it/tdmt.html>) ed evidenze geomorfologiche (Burrato et al., 2003) ed analisi sismotettoniche (Boccaletti et al., 1985; Cuffaro et al., 2010; Boccaletti et al., 2011; Bonini et al., 2014; Vannoli et al., 2015). Una visione sinottica delle diverse informazioni disponibili alla scala dell'intera regione Emilia-Romagna è mostrata in figura 1 per i principali sovrascorrimenti attivi, in figura 4 per le informazioni sismologiche e in figura 5 per la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche.

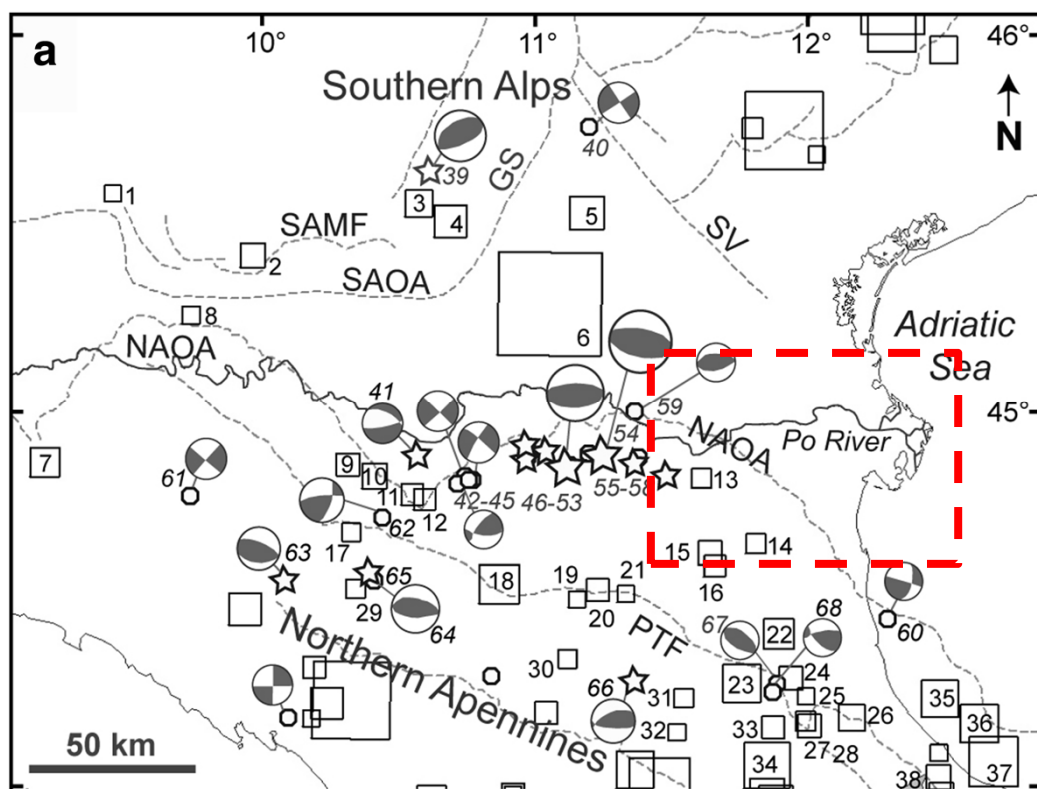


Fig. 4 – Mappa sinottica della sismicità storica e strumentale nel settore padano (Vannoli et al., 2015). I terremoti storici hanno $M \geq 5.3$ e sono identificati da quadrati, quelli strumentali hanno $M \geq 4.5$ e sono rappresentati da cerchi (M 4.5-4.9) o stelle ($M \geq 5.0$). Sono anche riportati i meccanismi focali disponibili (Pondrelli et al. 2006). Il riquadro rosso a tratteggio identifica l'area in studio in cui è collocato il permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA".

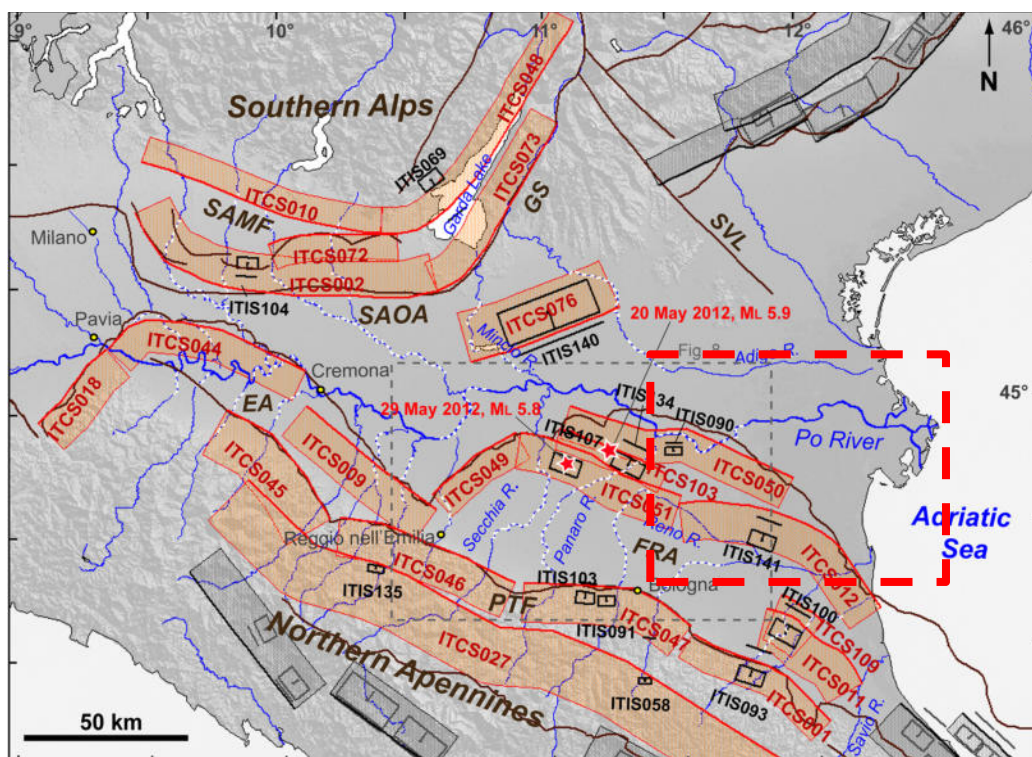


Fig. 5 – Sorgenti sismogenetiche composite (fasce rosse) ed individuali (riquadri neri) in pianura padana (Vannoli et al., 2015). Sono anche rappresentate in bianco le anomalie del reticolo idrografico (Burrato et al., 2003) e con delle stelle rosse gli epicentri dei due eventi principali del terremoto dell'Emilia del maggio 2012. Il riquadro rosso a tratteggio identifica l'area in studio in cui è collocato il permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA".

3.1 SISMICITÀ STORICA

I terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 , tratti dal catalogo CPTI15 v4.0 per il periodo 1000-2020 (Fig. 6; Rovida et al., 2022), in un intorno di oltre 30 km dall'area permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" si concentrano nella zona di Ferrara e nella fascia situata a nord del fiume Reno, in corrispondenza di sovrascorrimenti attivi di rilievo regionale (Fig. 6). In particolare, in tali zone si sono verificati i tre eventi maggiori del catalogo CPTI15 v4.0 noti nell'area in esame (Fig. 6) che corrispondono ai terremoti avvenuti rispettivamente presso Ferrara il 17 novembre 1570 (I_0 7-8; M_w 5,44) e presso Argenta il 19 marzo 1624 (I_0 7-8; M_w 5,47) ed il 22 ottobre 1796 (I_0 7; M_w 5,45). La restante sismicità mostra invece magnitudo generalmente comprese nell'intervallo 3.7-5.1.

Si rileva che nel catalogo CPTI v4.0 non sono riportati terremoti con intensità massima ≥ 5 o magnitudo ≥ 4.0 nella finestra temporale 1000-2020 all'interno del perimetro del permesso "Pola" (Fig. 6). I due terremoti storici più vicini sono quelli del 1895 (I_0 4-5; Mw 3,98) e quello del 1931 (I_0 6; Mw 4,74) ubicati rispettivamente oltre 7 km a nord del bordo settentrionale e oltre 7 km a sud-est del bordo orientale del perimetro del permesso (Fig. 6).

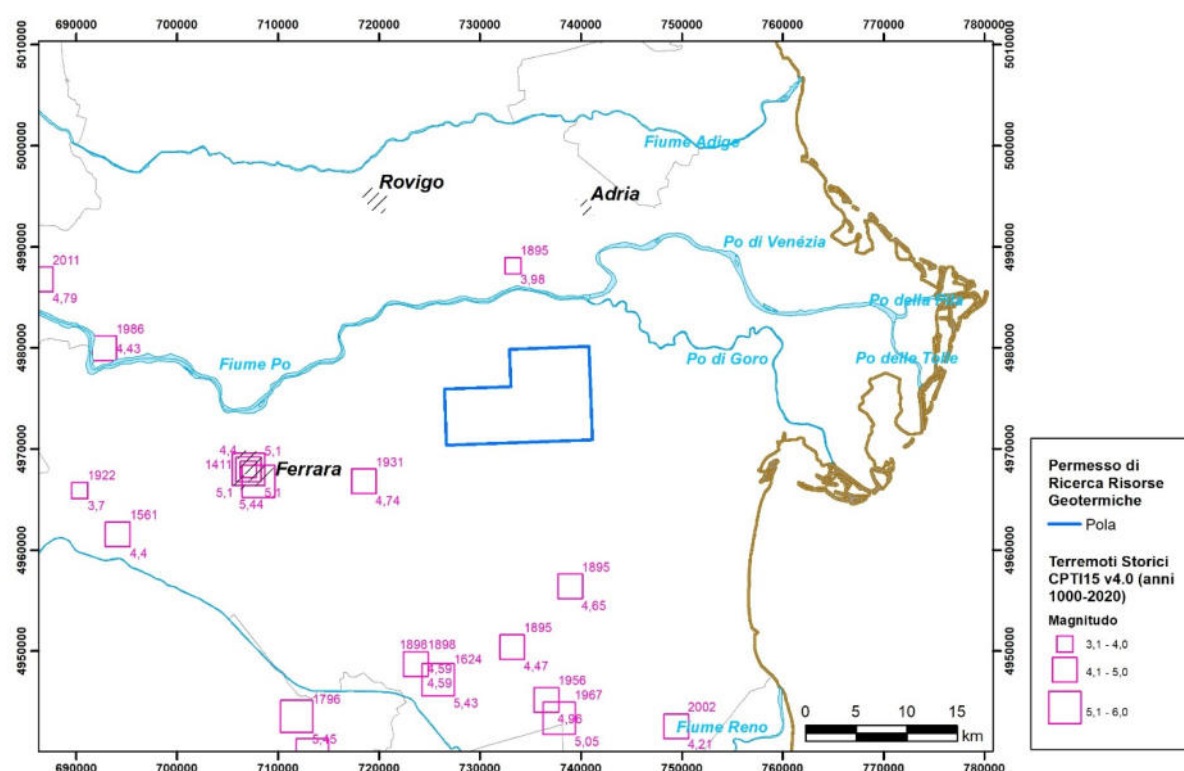


Fig. 6 - Mappa della sismicità storica nell'area in cui è ubicato il permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" e nelle zone limitrofe, tratta dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPTI15 v4.0 (Rovida et al., 2022). Gli eventi sismici sono rappresentati da quadrati viola di dimensione proporzionale alla magnitudo al fianco dei quali è indicato la magnitudo e l'anno di accadimento.

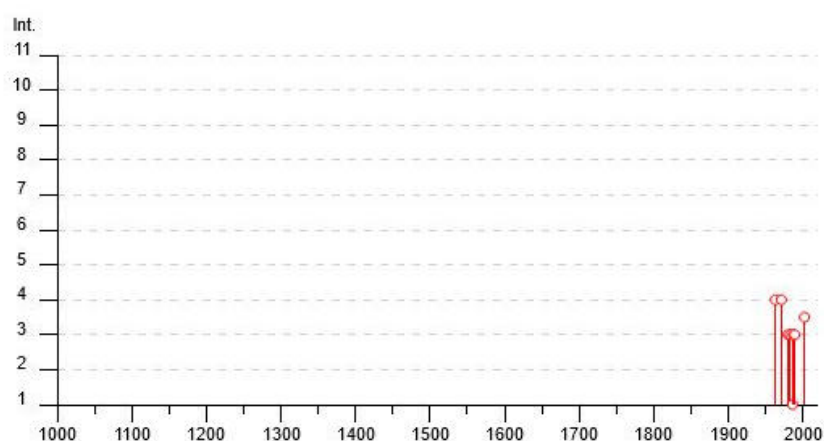
Gli effetti della sismicità storica in corrispondenza dell'area del permesso "POLA" sono stati valutati in corrispondenza delle località di Jolanda di Savoia, sulla base del catalogo delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani (DBMI15 v4.0; Locati et al., 2022) che fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche relativo ai terremoti con intensità massima ≥ 5 in una finestra temporale superiore a 1000 anni (periodo 1000-2020). In tale catalogo, i maggiori risentimenti si ebbero in occasione del terremoto della Romagna

del 1963, del Parmense del 1971 e del Ferrarese del 2002 raggiungendo rispettivamente il IV grado della scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) per i primi due terremoti e il III-IV grado per il più recente (Fig. 7).

Vale la pena di notare che per la località di Jolanda di Savoia nel catalogo considerato non sono riportati risentimenti sino al 1963 e che le massime intensità macrosismiche riportate sono solo del IV grado della scala MCS.

Jolanda di Savoia

PlaceID IT_40816
Coordinate (lat, lon) 44.885, 11.977
Comune (ISTAT 2015) Jolanda di Savoia
Provincia Ferrara
Regione Emilia-Romagna
Numero di eventi riportati 8



Effetti	In occasione del terremoto del									
Int.	Anno	Me	Gi	Ho	Mi	Se	Area epicentrale	NMDP	Io	Mw
4	1963	08	09	06	05		Romagna	16	5	5.23
4	1971	07	15	01	33	2	Parmense	228	8	5.51
3	1980	11	23	18	34	5	Irpinia-Basilicata	1394	10	6.81
3	1983	11	09	16	29	5	Parmense	850	6-7	5.04
NF	1986	12	06	17	07	1	Ferrarese	604	6	4.43
3	1987	05	02	20	43	5	Reggiano	802	6	4.71
3	1989	09	13	21	54	0	Prealpi Vicentine	779	6-7	4.85
3-4	2002	11	02	10	57	4	Ferrarese	79	4	4.21

Fig. 7 - Storia sismica della località Jolanda di Savoia tratta dal catalogo delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani, DBMI15 v4.0 (Locati et al., 2022): Int, intensità macrosismica Jolanda di Savoia espressa in unità MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg), NMDP, numero di osservazioni macrosismiche; Io, intensità macrosismica epicentrale; Mw, magnitudo momento.

3.2 SISMICITÀ STRUMENTALE

I terremoti registrati strumentalmente, riportati nel "Database Sismico Strumentale e Parametrico Italiano, ISIDE" (ISIDE Working Group, 2007) in un intorno di oltre 30 km dall'area permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" (Fig. 8), sono localizzati prevalentemente nella zona ad ovest di Ferrara dove si è sviluppata la sequenza sismica dell'Emilia del maggio 2012 (e.g., Scognamiglio et al., 2012; Bonini et al., 2014; Govoni et al., 2014).

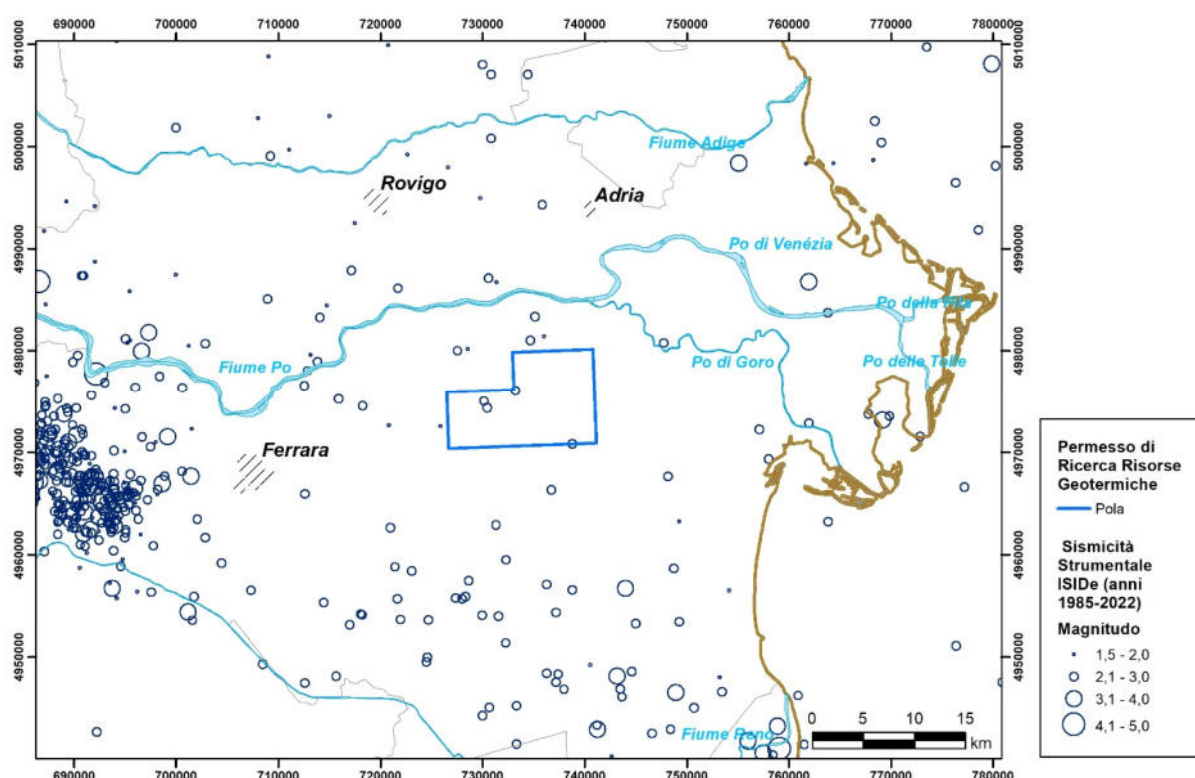


Fig. 8 - Mappa della sismicità strumentale nell'area in cui è ubicato il permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" e nelle zone limitrofe tratta dal Database Sismico Strumentale e Parametrico Italiano ISIDE (ISIDE Working Group, 2007).

Tale sequenza sismica (Fig. 4 e 8) ha avuto inizio il 20 maggio 2012 (02:03:53 UTC; M_w 6.1, M_L 5.9) ed è stata preceduta da alcuni *foreshocks* tra cui un evento con M_L 4.1 poche ore prima dell'evento principale. L'evento principale del 20 maggio è stato quindi seguito da tre *aftershocks* maggiori (con M_L 4.8, 5.1 e 4.9) nelle ore successive e quindi da migliaia di repliche minori distribuite su una zona orientata circa E-W, lunga circa 30 km e

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 14 di 37
--	--	--------------------

larga circa 15 km. Il 29 maggio un secondo evento maggiore (07:00:03 UTC; M_w 6.0, M_L 5.8) ha interessato un settore posta ad ovest dell'area colpita dal primo *mainshock* ed è stato seguito a sua volta da due *aftershocks* con $M_L > 5$.

I meccanismi focali dei due eventi principali del 20 e del 29 maggio, così come quelli degli *aftershocks* maggiori, mostrano cinematiche di faglia inversa su piani nodali orientati circa E-W (Fig. 4; Pondrelli et al., 2012; Scognamiglio et al., 2012). La profondità ipocentrale dei due eventi è stata stimata a 6.3 km per l'evento del 20 maggio e a circa 8 km per l'evento del 29 maggio (Govoni et al., 2014). L'analisi della distribuzione degli *aftershocks* evidenzia l'attivazione di piani sovrascorrimento posti nella porzione più interna (i.e., sud-occidentale) della fascia delle Pieghe Ferraresi (Bonini et al., 2014; Govoni et al., 2014).

Si segnala che nelle aree poste ad est di Ferrara (Fig. 8) dove è ubicato il permesso "Pola" sono stati invece registrati esclusivamente terremoti sparsi e generalmente di bassa magnitudo ($M < 3.2$), con ipocentri a profondità comprese tra qualche chilometro e qualche decina di chilometri. In particolare, all'interno del permesso "Pola" sono stati registrati solo 4 eventi di magnitudo comprese tra 2.2 e 3.0 e profondità ipocentrali variabili tra 5 e 38 km.

3.3 SORGENTI SISMOGENETICHE DISS 3.2.0

Le sorgenti sismogenetiche nel database DISS 3.3.0 (Basili et al., 2008; DISS Working Group, 2021; Fig. 4 e 9) sono state ricostruite sulla base di informazioni sull'assetto di sottosuolo ricavate dall'interpretazione congiunta di dati di pozzo, profili sismici ed altre informazioni geofisiche (Pieri & Groppi, 1981, Cassano et al., 1986; Boccaletti et al., 2004; Toscani et al., 2009; Fantoni & Franciosi, 2010). Le loro caratteristiche sono state analizzate in dettaglio in diversi lavori scientifici (e.g., Toscani et al., 2009; Boccaletti et al., 2011; Vannoli et al., 2015). Nella settore delle Pieghe Ferraresi in esame, tali sorgenti corrispondono ad alcune superfici di sovrascorrimento principali sepolte nel substrato della pianura padana (Fig. 2).

All'interno del perimetro del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" non sono state individuate sorgenti sismogenetiche note, mentre nelle immediate vicinanze dello spigolo sud-ovest del permesso è invece ubicata la sorgente composita ITCS050 Poggio Rusco-Migliarino, che corrisponde al fronte esterno del sistema di sovrascorrimenti sepolto appenninico. Le valutazioni effettuate nell'ambito dei lavori che

hanno portato alla compilazione del DISS 3.3.0 descrivono tale sorgente come una superficie immergente verso SW con angolo variabile di 25°-55° che si estende in profondità da circa 1 km sino a circa 8 km. Una tipica sorgente individuale associata alla ITCS050 è rappresentata dalla ITIS090 Ferrara. Dettagli sulle caratteristiche di queste sorgenti sono riportati in figura 10.

È opportuno notare che la geometria delle sorgenti contenuta nel Database delle sorgenti sismogenetiche Italiane DISS 3.3.0 è comunque una rappresentazione semplificata che non può tenere conto della configurazione strutturale di dettaglio dei sovrascorrimenti presenti nel sottosuolo.

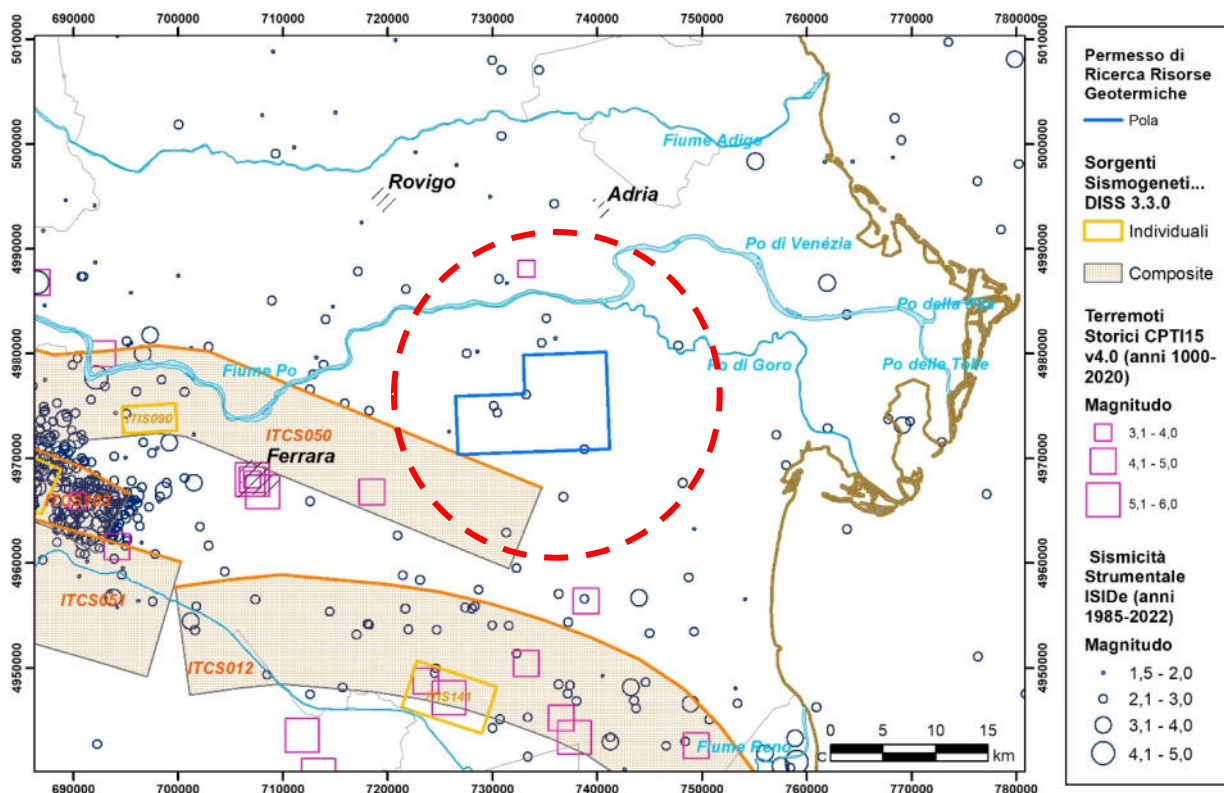


Fig. 9 – Sorgenti sismogenetiche composite ed individuali nell’intorno del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato “POLA” (DISS Working Group, 2021). Nella mappa è rappresentata anche la sismicità tratta dal Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, CPTI15 v4.0 (Rovida et al., 2022) e la sismicità strumentale dal Database Sismico Strumentale e Parametrico Italiano ISIDe (ISIDE Working Group, 2007). Il cerchio rosso a tratteggio indica l’area prossima (circa 15 km) al sito del progetto “POLA”.

GENERAL INFORMATION

DISS-ID	ITIS090
Name	Ferrara
Compiler(s)	Rovida A.(1), Burrato P.(2)
Contributor(s)	Burrato P.(2), Rovida A.(1)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione di Milano - Pavia; Via Bassini 15, 20133 Milano, Italy 2) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sismologia e Tettonofisica; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy
Created	31-May-2005
Updated	31-May-2005
Display map ...	
Related sources	ITCS050

PARAMETRIC INFORMATION


PARAMETER	QUALITY	EVIDENCE
Location [Lat/Lon]	44.89 / 11.50	OD
Length [km]	5.1	ER
Width [km]	4.0	ER
Min depth [km]	1.4	OD
Max depth [km]	4.5	OD
Strike [deg]	88	OD
Dip [deg]	50	OD
Rake [deg]	90	EJ
Slip Per Event [m]	0.35	ER
Slip rate [mm/y] min...max	0.1...0.5	EJ
Recurrence [y] min... max	700...3500	EJ
Magnitude [Mw]	5.5	LD

LD=LITERATURE DATA; OD=ORIGINAL DATA; ER=EMPIRICAL RELATIONSHIP; AR=ANALYTICAL RELATIONSHIP; EJ=EXPERT JUDGEMENT;

INFORMATION ABOUT THE ASSOCIATED EARTHQUAKES

Latest Earthquake	17 Nov 1570	CPT04.
Penultimate Earthquake	Unknown	See "Commentary" for information.

GENERAL INFORMATION

DISS-ID	ITCS050
Name	Poggio Rusco-Migliarino
Compiler(s)	Burrato P.(1)
Contributor(s)	Burrato P.(1), D'Ambrogio C.(2), Maesano F.E.(1), Toscani G.(3)
Affiliation(s)	1) Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; Sezione Roma 1; Via di Vigna Murata, 605, 00143 Roma, Italy 2) Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale; Servizio Geologico d'Italia; Via Vitaliano Brancati, 48, 00144 Roma, Italy 3) Università di Pavia; Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente; Via Ferrara, 1, 27100 Pavia, Italy
Created	08/01/2005
Updated	16/10/2013
Display map	
Related sources	ITIS090

PARAMETRIC INFORMATION

Parameter	Quality	Evidence
Min depth [km]	1.0	OD
Max depth [km]	8.0	OD
Strike [deg] min... max	85...115	OD
Dip [deg] min... max	25...55	OD
Rake [deg] min... max	90...100	OD
Slip Rate [mm/y] min... max	0.3900... 0.4500	OD
Max Magnitude [Mw]	6.8	ER

LD=Literature Data; OD=Original Data; ER=Empirical Relationship; AR=Analytical Relationship; EJ=Expert Judgement

Fig. 10 – Parametri caratteristici della sorgente sismogenetica composta ITCS050 Poggio Rusco-Migliarino e della sorgente sismogenetica individuale ITIS090 Ferrara presenti nel Database of individual Seismogenic Sources 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) a sud-ovest del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA".

3.4 CATALOGO DELLE FAGLIE CAPACI ITHACA

Il database del progetto ITHACA (*IT*aly *H*Azard from *C*APable faults; Michetti et al., 2000; ITHACA Working Group, 2019), contiene informazioni riguardo le faglie capaci, definite come faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie.

In particolare, all'interno del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA", e nella zona circostante, sono mappate alcune faglie capaci descritte come "faglie inverse" (Fig. 11). Si tratta delle faglie capaci identificate con i seguenti codici e nomi nelle pagine del database: 93787 Berra–Ravenna, 90811 Massa Fiscaglia–Ravenna, 90809 Ferrara ridge, 90808 Ferrara ridge e 93786 Tresigallo–Ravenna.

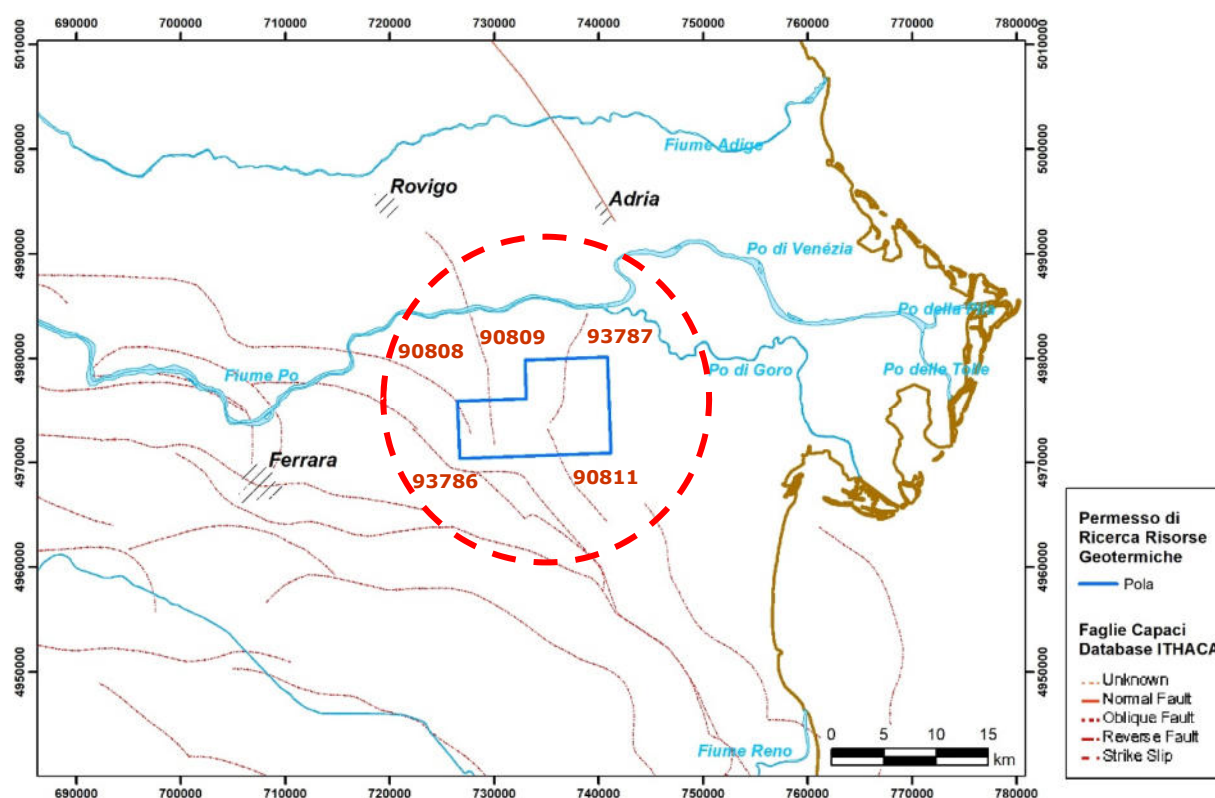


Fig. 11– Faglie capaci riprese dal catalogo ITHACA (ITHACA Working Group, 2019). Le 5 faglie mappate all'interno e nell'intorno del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" sono identificate con i codici numerici con cui sono identificate nello stesso database. Tali 5 strutture sono descritte come faglie inverse quaternarie "da indagare" che hanno causato "deformazione in superficie o in prossimità di essa nel corso del Quaternario anteriormente al Pleistocene superiore" e "per la quale non si può escludere a priori una riattivazione all'interno del contesto geodinamico attuale in assenza di ulteriori indagini specifiche". Il cerchio rosso da tratteggio indica l'area prossima (circa 15 km) al sito del progetto "POLA".

Nell'area in esame, le principali faglie contenute in questo catalogo corrispondono in parte ai principali sovrascorrimenti che deformano la base dei depositi plio-pleistocenici, già riportati anche nello "Structural Model of Italy. Scale 1:500,000" (Fig. 12; Bigi et al.,

1992), e in parte a strutture identificate nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe (Fig. 13; Martelli et al., 2017).

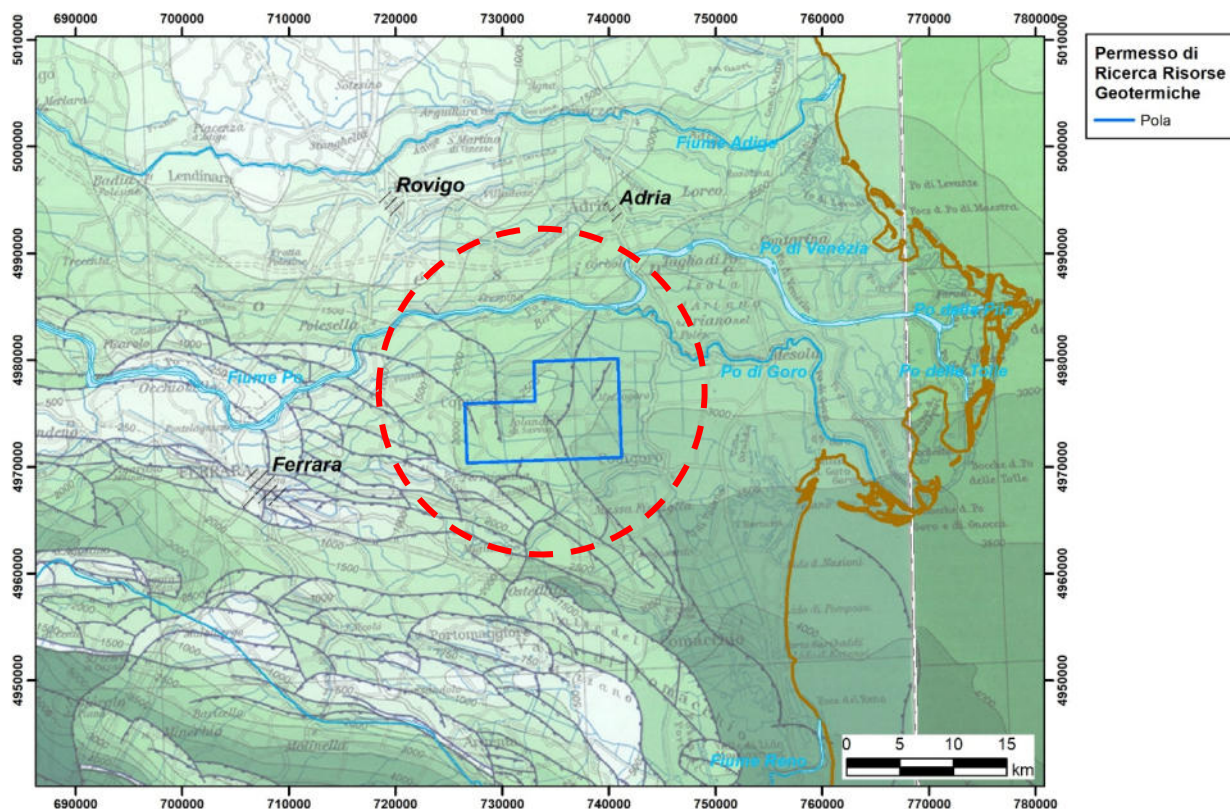


Fig. 12 – Nella mappa sono riportati in nero i sovrascorrimenti che interessano la superficie che corrisponde alla base dei depositi Plio-Pleistocenici (Bigi et al., 1992), rappresentata da isobate (in metri) con campiture di colore verde con tonalità progressivamente più scure per profondità crescenti. Il cerchio rosso a tratteggio indica l'area prossima (circa 15 km) al sito del progetto "POLA".

Vale comunque la pena di notare che nel Database ITACHA viene effettuata una rilevante distinzione tra "faglia capace" e "faglia quaternaria da indagare":

- una "faglia capace" è una "faglia che sicuramente ha causato deformazione in superficie o in prossimità di essa, nell'intervallo Pleistocene superiore-Presente";
- "faglia quaternaria da indagare" corrisponde a una "faglia che ha causato deformazione in superficie o in prossimità di essa nel corso del Quaternario anteriormente al Pleistocene superiore (Pleistocene medio per le aree cratoniche), per la quale non si può escludere a priori una riattivazione

all'interno del contesto geodinamico attuale in assenza di ulteriori indagini specifiche".

Tenuta presente la distinzione sopra ricordata, si segnala che le cinque faglie mappate nel permesso "POLA" e nella zona circostante sono definite come faglie quaternarie da indagare e non come faglie capaci in senso stretto.

3.5 CARTA SISMOTETTONICA DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA

La Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna ed aree limitrofe, con relative Note Illustrative (Martelli et al., 2017), mette in evidenza nell'area in esame la presenza di alcuni sovrascorrimenti ritenuti attivi o potenzialmente (Fig. 13).

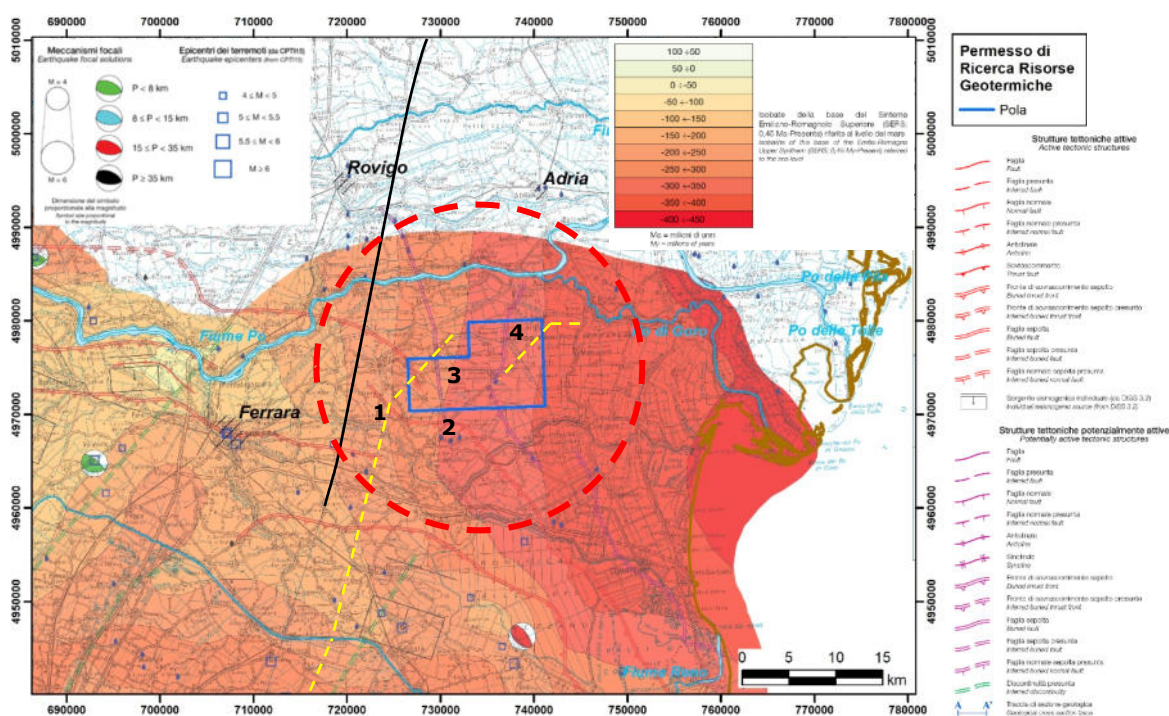


Fig. 13 – Dettaglio della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Martelli et al., 2017). Sono rappresentati i principali sovrascorrimenti attivi (in rosso) e potenzialmente attivi (in viola).

Nell'intorno del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA", i numeri 1, 2, 3 e 4 corrispondono agli elementi strutturali descritti in dettaglio nel testo. La traccia nera identifica il profilo geologico D-D' allegato alla stessa carta riportato in figura 14. La traccia gialla a tratteggio corrisponde all'ubicazione indicativa del profilo tratto da Fantoni & Franciosi (2009) in figura 15. Il cerchio rosso a tratteggio indica l'area prossima (circa 15 km) al sito del progetto "POLA".

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 20 di 37
--	--	--------------------

In figura 14, è riportata una porzione della sezione geologica D-D' tratta dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Martelli et al, 2017), basata sull'interpretazione di dati di sottosuolo e ubicata circa 5-6 km ad ovest del margine occidentale del permesso "POLA" e in cui viene rappresentata la prosecuzione verso ovest delle strutture presenti nell'area di interesse.

Le quattro faglie mappate nella Carta Sismotettonica in un intorno di 15 km dal poligono del permesso "POLA" sono discusse nel seguito.

1 - All'esterno dello spigolo sud-occidentale del poligono del permesso "POLA" (struttura "1" in figura 13) è riportato un sovrascorrimento sepolto con un'orientazione media NW-SE definito attivo. Nel profilo di figura 14, questo sovrascorrimento dovrebbe corrispondere ad uno di quelli rappresentati nel settore compreso tra i pozzi Vignola 1 e Tresigallo 1 che si radicano all'interno della successione carbonatica.

2 - All'estremo margine ovest del permesso è cartografato un altro fronte di sovrascorrimento sepolto con andamento circa NNW-SS definito attivo (struttura "2" in figura 13). Nell'interpretazione proposta nel profilo di figura 14, tale struttura corrisponde al sovrascorrimento riportato subito ad est della località Copparo, che interessa tutta la successione mesozoica ed i termini paleozoici sottostanti sino anche al basamento, dislocando verso l'alto la base dei depositi del Pliocene.

3 - Sempre nella porzione occidentale del permesso "POLA" viene indicata una faglia sepolta descritta come potenzialmente attiva, orientata circa N-S (struttura "3" in figura 13). L'interpretazione proposta in figura 14, la rappresenta come una faglia ad alto angolo con immersione verso ovest che disloca le unità stratigrafiche comprese tra il Permiano superiore-Triassico medio e l'Eocene superiore-Oligocene, ribassando i settori occidentali, senza interessare i termini più recenti dell'Oligocene superiore.

4 - Nella porzione orientale del permesso "POLA", in prossimità dei pozzi previsti dal progetto, è riportato invece un sovrascorrimento sepolto, supposto potenzialmente attivo, con una orientazione circa NNE-SSW a nord di Jolanda di Savoia e circa NNW-SSE a sud della stessa località (struttura "4" in figura 13). Tale struttura non viene intercettata dal profilo di figura 14.

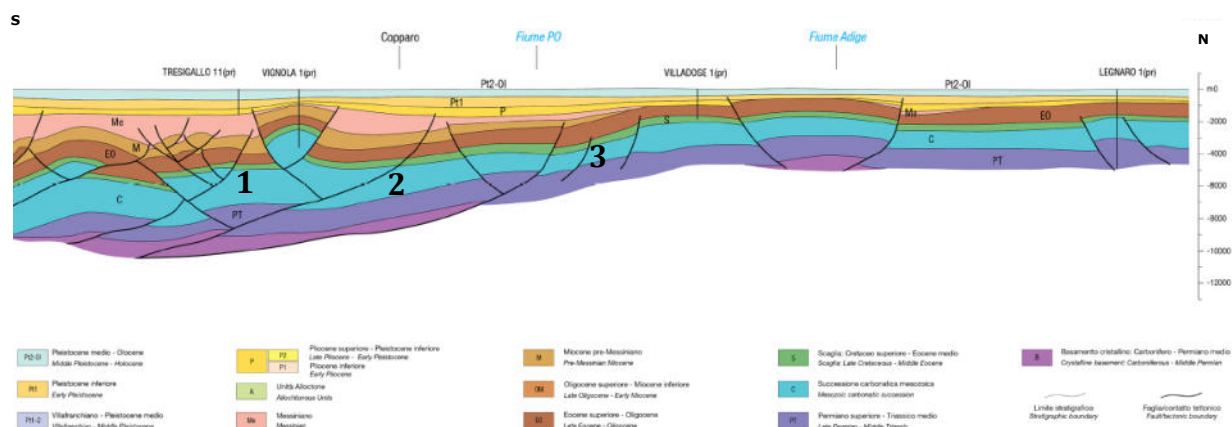


Fig. 14 – Dettaglio della sezione geologica D-D', tratta dalla Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna (Martelli et al., 2017), ubicata circa 5-6 km ad ovest del margine occidentale del permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" (traccia indicata in figura 13). Le strutture indicate con i numeri 1, 2 e 3 in figura 13 sono identificate con la stessa numerazione anche in questo profilo.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 22 di 37
--	--	--------------------

4 Analisi delle faglie attive e potenziale attive

Per definire le caratteristiche delle principali faglie note in un intorno di 15 km dal sito interessato dal progetto, e discriminare quelle con evidenze di attività recente mettendo in evidenza le loro caratteristiche sismotettoniche, l'analisi congiunta dell'insieme delle informazioni precedentemente descritte nel capitolo 3 è stata integrata con altre informazioni tratte dalla bibliografia (e.g., Pieri & Groppi, 1981; Castellarin et al., 1985; Cassano et al., 1986; Bigi et al., 1992; Scrocca et al., 2007; Toscani et al., 2009; Carminati et al., 2010; Fantoni & Franciosi, 2009, 2010; Livani et al., 2018) e con i risultati del modello geologico 3D di dettaglio realizzato dalla società proponente nel settore orientale del permesso.

Le caratteristiche delle faglie individuate sono le seguenti.

- Il sovrascorrimento della Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2014) identificato con il numero 1 in figura 13, definito attivo, corrisponde alla faglia "93786 Tresigallo-Ravenna" del database ITHACA e rappresenta una delle manifestazioni geologiche della sorgente sismogenetica ITCS050 Poggio Rusco-Migliarino. Tale sovrascorrimento si trova ad una distanza in pianta \geq a circa 6 km dal target minerario del pozzo più meridionale previsto nel progetto. Questa struttura, che rappresenta una rampa nei carbonati di età compresa tra il Triassico superiore e l'Eocene medio con una superficie immergente verso SW con angoli di circa 25°-55°, è da considerare certamente attiva ed è ritenuta nel database DISS 3.3.0 capace di generare terremoti di magnitudo significativa in accordo con i terremoti storici associati quali, ad esempio, il terremoto di Ferrara del 1570 (Toscani et al., 2009).
- Il sovrascorrimento della Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2017) identificato con il numero 2 in figura 13, definito attivo, corrisponde alla "faglia quaternaria da indagare" denominata "90808 Ferrara ridge" del database ITHACA. Questa sovrascorrimento è localizzato ad una distanza in pianta \geq a circa 7 km dal target minerario del pozzo più occidentale previsto nel progetto. Nel Profilo D-D' (Fig. 14) associato alla stessa Carta Sismotettonica questo sovrascorrimento si radica nel basamento propagandosi verso l'alto e dislocando tutta la successione meso-cenozoica sino ai termini del Pliocene. In altre interpretazioni questo sovrascorrimento viene considerato una rampa che si enuclea da un livello di scollamento superiore, posto alla base del Miocene (Fig. 3), e che si raccorda con la rampa nei carbonati mesozoici associata alla struttura descritta

al punto precedente, localizzata alcuni chilometri verso sud-ovest (Fig. 15; Fantoni & Franciosi, 2009; Toscani et al., 2009). Questa seconda ipotesi interpretativa potrebbe giustificare l'assenza di chiare evidenze di attività recente, (e.g., Boccaletti et al., 2004) e di sismicità associata (e.g., Fig. 6; Rovida et al., 2022), ed è sostanzialmente quella adottata nel database DISS 3.3.0 (DISS Working Group, 2021) in cui non è riportata una sorgente sismogenetica in corrispondenza di questo sovrascorrimento. In ogni caso, si segnala che per questa struttura non si può escludere a priori una riattivazione all'interno del contesto tettonico attuale (ITHACA Working Group, 2019).

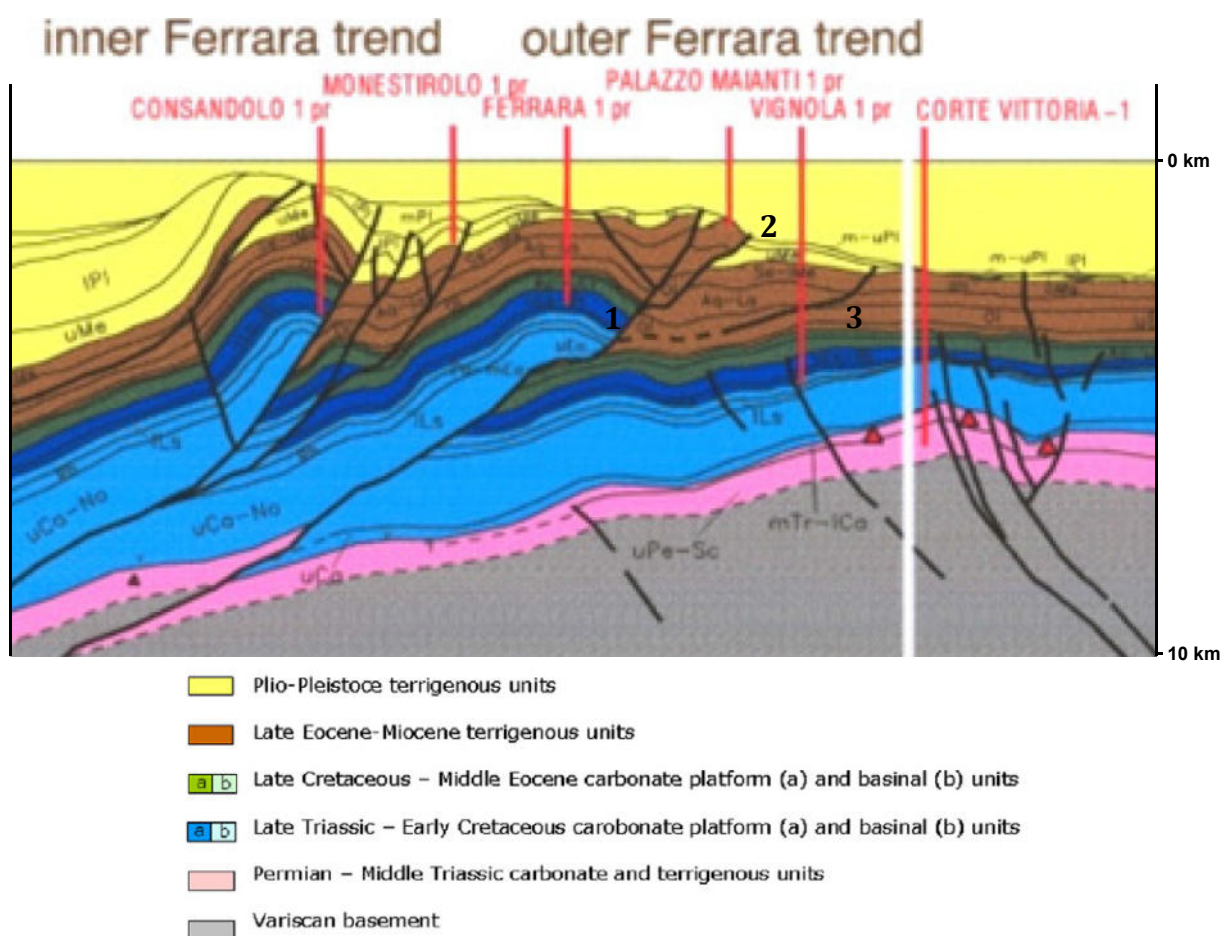


Fig. 15 – Dettaglio del profilo geologico di Fantoni & Franciosi (2009) che attraversa il permesso “POLA” e l’area in esame (esagerazione verticale 2X). L’ubicazione indicativa del profilo è riportata in figura 13. Questo profilo, elaborato dai tecnici dell’ENI utilizzando il database di pozzi e profili sismici sismici a loro disposizione, è in realtà costituito da due segmenti non allineati e distanti alcuni chilometri. Le strutture indicate con i numeri 1, 2 e 3 in figura 13 sono identificate con la stessa numerazione anche in questo profilo; si noti che il sovrascorrimento indicato con il numero 4 in figura 13 ricade invece nella fascia non coperta dal profilo.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 24 di 37
--	--	--------------------

- La faglia riportata nella Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2014) identificata con il numero 3 in figura 13, corrisponde alla faglia quaternaria da indagare denominata "90809 Ferrara ridge" nel database ITHACA. Tale faglia si trova ad una distanza in pianta \geq a circa 4 km dal target minerario del pozzo più occidentale previsto nel progetto. È opportuno notare che nel database ITHACA tale struttura è considerata una faglia inversa quaternaria da indagare, senza evidenze chiare di attività nel Pleistocene superiore-Olocene, mentre nella carta sismotettonica è rappresentata come una faglia ad alto angolo estensionale (o transtensionale), potenzialmente attiva, con immersione verso ovest che disloca le unità mesozoiche. Inoltre, il segmento meridionale di questo elemento coincide anche con una porzione di uno dei sovrascorrimenti che dislocano la base dei depositi plio-pleistocenici nello "Structural Model of Italy. Scale 1:500,000" (Fig. 12; Bigi et al., 1992). Tali apparenti incongruenze interpretative potrebbero essere forse spiegate dalla presenza, a nord del Fiume Po, della faglia ad alto angolo riportata nella Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2014) mentre, a sud del Fiume Po, tale faglia sarebbe presente al di sotto di un sovrascorrimento superficiale che si propaga dal livello di scollamento posto alla base del Miocene (descritto al punto precedente). La presenza di faglie estensionali e/o transtensionali che interessano le unità prevalentemente carbonatiche o calcaree marnose del Permiano-Eocene medio è comunque riportata anche in altri lavori (e.g., Fantoni & Franciosi, 2009; Turrini et al., 2018). Ad esempio, nel profilo di Fantoni & Franciosi (2009) rappresentato in figura 15 simili faglie sono responsabili dello sviluppo di depocentri nelle unità triassiche ad est del pozzo Corte Vittoria 1. Si rileva comunque la scarsa sismicità nota nell'intorno della faglia identificata con il numero 3 in figura 13 e l'assenza nel database delle sorgenti sismogenetiche DISS 3.3.0 di sorgenti associabili a questa struttura. In ogni caso, faglie normali o trascorrenti mesozoiche ereditate nel substrato carbonatico e nelle unità permo-triassiche e nel basamento sottostanti potrebbero essere riattivate anche nel contesto tettonico compressivo attuale, se opportunamente orientate, rappresentando una ulteriore sorgente di terremoti (e.g. Cuffaro et al., 2010; Vannoli et al., 2015).
- Il sovrascorrimento della Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2017) identificato con il numero 4 in figura 13 in prossimità dei pozzi previsti dal progetto corrisponde all'insieme delle due faglie "93787 Berra-Ravenna" e "90811 Massa Fiscaglia-Ravenna" del database ITHACA. Tale sovrascorrimento, non intercettato nel profilo di figura 14,

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 25 di 37
--	--	--------------------

rappresenta una delle strutture più esterne del sistema di sovrascorrimenti con un'orientazione variabile da NNE-SSW a NNW-SSE, anomala nel contesto strutturale in cui si inserisce. Nella Carta Sismotettonica (Martelli et al., 2017) viene considerato potenzialmente attivo mentre nel database delle sorgenti sismogenetiche DISS 3.3.0 non sono riportate sorgenti in corrispondenza di questa struttura. Considerata la vicinanza di questo sovrascorrimento ai pozzi proposti, la geometria di dettaglio di questa sovrascorrimento è stata ricostruita ed analizzata nel modello geologico 3D sviluppato dalla società proponente il progetto. In tale rapporto, a cui si rimanda per ulteriori dettagli, viene specificato che "... nel settore in cui sono ubicati i pozzi esplorativi ed i rispettivi "target" di fondo pozzo la profondità prevista del piano di faglia sia a circa -6800 nel settore settentrionale fino ad arrivare a circa -7600 m s.l.m. nel settore S/SE e quindi con un intervallo di profondità rispetto ai "target" di fondo pozzo che vanno da un minimo di circa 800 metri ad un massimo di circa 1600 metri."

La revisione dei dati di letteratura, volta ad identificare e a descrivere la geometria dei principali sovrascorrimenti e a discriminare quelli a cui sono associate evidenze di attività recente, necessità comunque di un ulteriore approfondimento in relazione alla definizione del loro comportamento sismotettonico. Un sovrascorrimento attivo può infatti essere associato sia ad un comportamento sismogenetico che ad un scorrimento asismico.

In questo senso risulta fondamentale l'approfondita analisi della distribuzione degli *aftershocks* della sequenza sismica dell'Emilia avvenuta nel 2012 effettuata da Bonini et al (2014). Tale analisi mette chiaramente in luce che i processi sismogenetici nel settore in esame sono confinati nelle rampe che attraversano le unità carbonatiche meso-cenozoiche (in rosso nella sezione in basso della figura 16) mentre i sovrastanti livelli clastici e terrigeni neogenici mostrano sostanzialmente un lento scorrimento asismico (in azzurro nella sezione in basso della figura 16). Si noti anche la parziale riattivazione di faglie normali nelle unità permo-triassiche e nel basamento (in giallo nella sezione in basso della figura 16).

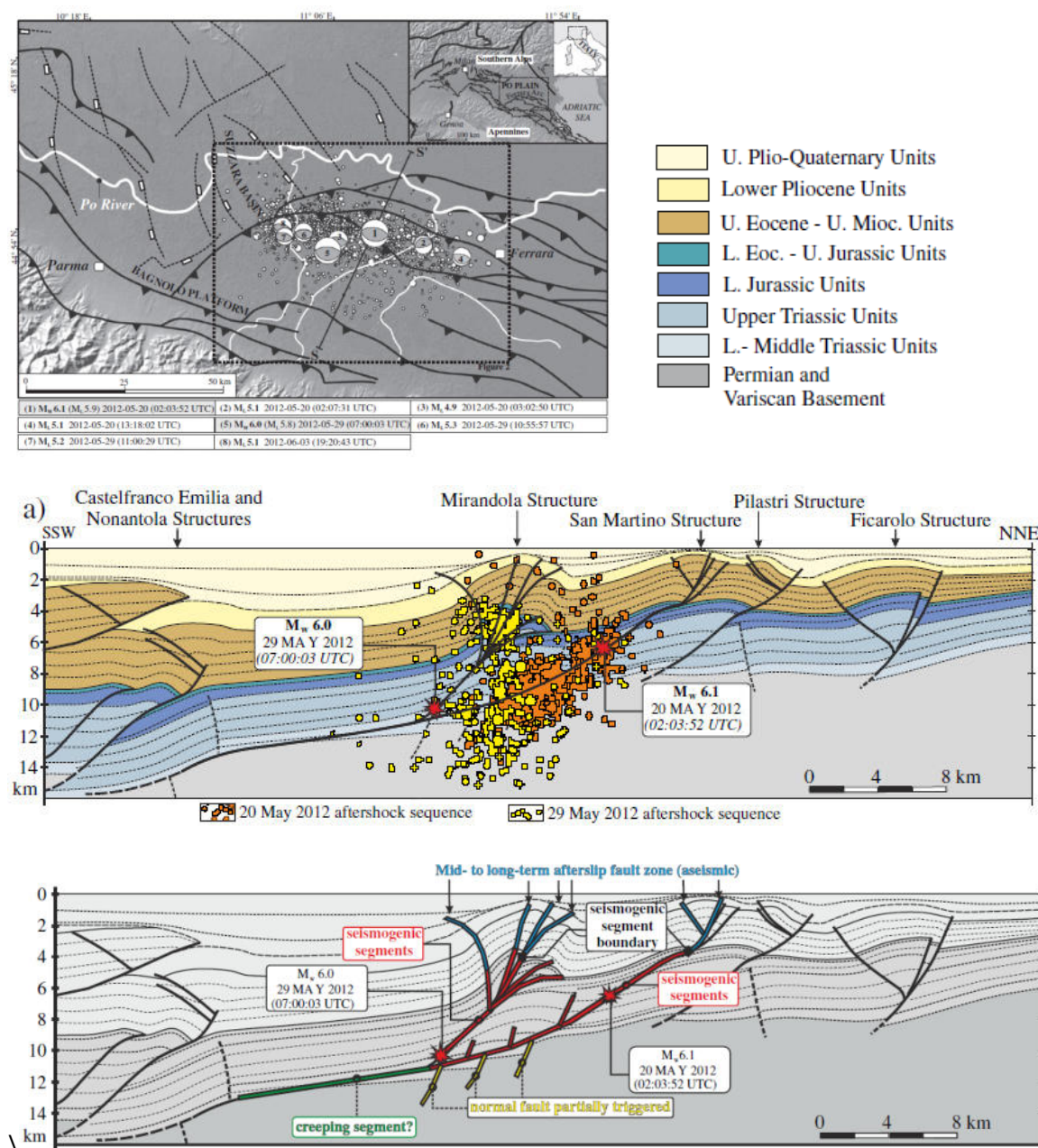


Fig. 16 – Interpretazione sismotettonica della sequenza sismica dell'Emilia avvenuta nel 2012 (Bonini et al., 2014). In alto, mappa strutturale con epicentri della sequenza e meccanismi focali degli eventi maggiori. Al centro, profilo geologico attraverso l'area epicentrale (ubicazione nella mappa e legenda in alto a destra) con sovrapposti gli aftershocks degli eventi maggiori del 20 e 29 maggio 2012. In basso, caratterizzazione del comportamento sismotettonico dei segmenti dei sovrascorrimenti basata sull'analisi della distribuzione degli aftershocks. Tale analisi mette in evidenza che i segmenti sismogenetici dei sovrascorrimenti sono confinati nelle rampe che attraversano i livelli carbonatici meso-cenozoici mentre i segmenti dei sovrascorrimenti localizzati nei sovrastanti livelli clastici e terrigeni neogenici mostrano sostanzialmente un comportamento asismico. Inoltre, viene suggerita anche la parziale riattivazione di faglie normali nelle unità permo-triassiche e nel basamento.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 27 di 37
--	--	--------------------

5 Impianti geotermici e sismicità indotta/innescata

L'estrazione e la re-iniezione di fluidi possono modificare il campo di stress che agisce nel sottosuolo come risultato di variazioni della pressione dei fluidi, effetti poro- e termo-elastici e di disequilibri isostatici, che possono potenzialmente indurre o innescare eventi sismici (e.g., McGarr et al, 2002; Majer et al., 2007; Evans et al., 2012; National Research Council, 2013; Ellsworth, 2013; Grünthal, 2014; McGarr, 2014; Zang et al., 2014; Giamberini et al., 2016; Manzella et al., 2018).

A tale riguardo è opportuno chiarire che in accordo con le definizioni proposte da McGarr et al. (2002) è possibile distinguere eventi sismici indotti, in cui le attività antropiche sono responsabili della gran parte delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità, ed eventi sismici innescati, in cui le attività antropiche sono responsabili solo di una minima frazione delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità mentre il ruolo principale è svolto dal campo di stress pre-esistente dovuto alla tettonica.

Le attività di produzione di energia geotermica in numerose aree del mondo (e.g., Evans et al., 2012, National Research Council, 2013; Grünthal, 2014 ; Zang et al., 2014; Manzella et al., 2018) dimostrano che le attività geotermiche possono essere associate allo sviluppo di eventi sismici indotti/innescati in genere di piccola magnitudo (e.g., $M_L < 2$ al di sotto della soglia di percezione). In alcune eccezioni, gli eventi sismici associati hanno però raggiunto anche magnitudo maggiori come nel campo geotermico a vapore dominante The Geysers (USA) con una magnitudo massima di 4.6 o nei progetto EGS (engineered o enhanced geothermal systems) di Berlin (El Salvador), con una magnitudo massima di 4.4, o di Basilea, con magnitudo massima 3.4.

Nell'analisi delle possibili relazioni tra attività di estrazione e re-iniezione di fluidi connesse con la valorizzazione di risorse geotermiche e lo sviluppo di fenomeni sismici indotti/innescati (e.g., Giamberini et al., 2016; Manzella et al., 2018), è opportuno distinguere le diverse tipologie di sistemi geotermici idrotermali, a vapore dominante o ad acqua dominante, e le tecnologie adottate per lo sviluppo della risorsa geotermica, distinguendo la produzione da sistemi idrotermali e le specifiche attività di stimolazione idraulica previste nello sviluppo dei sistemi EGS (Enhanced o Engineered Geothermal System).

Ad esempio, gli studi scientifici disponibili dimostrano che quando la risorsa geotermica viene sviluppata mantenendo un bilanciamento tra la quantità di fluido geotermico estratto

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 28 di 37
--	--	--------------------

e volumi re-iniettati, come avviene ad esempio in molti campi geotermici ad acqua dominante, e se le pressioni di re-iniezione a fondo pozzo sono minori di quelle necessarie per causare l'idrofratturazione della roccia, vengono sostanzialmente meno i presupposti per lo sviluppo di eventi sismici indotti e che la sismicità riscontrata è comunque di bassa magnitudo (Ellsworth, 2013; National Research Council, 2013; Giamberini et al., 2016). In Europa, gli eventi sismici più rilevanti in campi geotermici ad acqua dominante sono stati documentati in alcuni progetti realizzati in Germania a Unterhaching e Landau, con magnitudo massime rispettivamente di 2.4 e 2.7 (Evans et al., 2012; Grünthal, 2014).

Per una approfondita revisione delle relazioni tra le attività di impianti geotermici e sismicità indotta/innescata in Italia si rimanda alle sintesi già pubblicate (e.g., Evans et al., 2012; Di Bucci et al., 2014; Giamberini et al., 2016; Manzella et al., 2018; Manzella et al., 2019) da cui emerge, ad esempio, che nelle classiche aree geotermiche toscane i dati disponibili mostrano l'occorrenza di eventi indotti di bassa magnitudo correlati ai processi di re-iniezione dei fluidi mentre il livello della sismicità naturale di fondo rende dibattuta l'interpretazione di alcuni eventi di magnitudo maggiore.

In questa sede, invece, viene discusso il caso del progetto geotermico di Casaglia ubicato vicino Ferrara poco distante dal permesso "POLA" in un contesto tettonico simile. Inoltre, questo caso di studio è significativo anche perché la possibilità che le operazioni effettuate nel campo geotermico di Casaglia possano aver influenzato l'attività sismica del 2012 in Emilia è stata valutata da una commissione appositamente istituita dal Dipartimento della Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri (International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region – ICHESE).

Nell'impianto geotermico di Casaglia il fluido geotermico viene estratto dai due pozzi Casaglia-2 e Casaglia-3 ad una temperatura di circa 100° C e re-iniettato nel pozzo Casaglia-1 a circa 70° C (ICHESE, 2014). Le attività sono iniziate nel 1995 e, sulla base dei dati disponibili, nel periodo compreso tra 1995 e il 2012 sono stati estratti in totale 26 milioni di m³ che sono stati poi completamente re-iniettati, in un regime di bilanciamento totale dei volumi. Si noti che la distanza tra il pozzo di re-iniezione Casaglia-1 e la sorgente sismogenetica "ITCS050 - Poggio Rusco-Migliarino" è in questa zona di circa 2500-3000 m (misurati perpendicolarmente alla sorgente sismogenetica dalla base della zona di iniezione).

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 29 di 37
--	--	--------------------

A tale riguardo, sulla base di diversi elementi e considerazioni discusse in dettaglio nel suo rapporto (ICHESE, 2014), la Commissione ICHESE conclude che "...è molto improbabile che le operazioni effettuate nel campo geotermico di Casaglia possano avere influenzato l'attività sismica del 2012".

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 30 di 37
--	--	--------------------

6 Conclusioni

Nel settore della Pianura Padana dove è ubicato permesso di ricerca di risorsa geotermica denominato "POLA" un regime tettonico compressivo attivo con un il sigma 1 orientato circa NNE-SSW è provato da *breakout* di pozzo (Montone et al., 2004, 2012), meccanismi focali (Boccaletti et al., 2004; Pondrelli et al., 2006; Calderoni et al., 2009; Vannoli et al., 2015; Martelli et al., 2017) e dati sismologici (Castello et al., 2006; ISIDE Working Group, 2007; Vannoli et al., 2015; Rovida et al., 2022). Analisi del capo di deformazione derivati da geodesia spaziale (e.g., Devoti et al. 2008; Cuffaro et al., 2010) mostrano tassi di raccorciamento di qualche mm/a.

Le informazioni sull'assetto di sottosuolo del settore padano in esame ricavate dall'interpretazione congiunta di dati di pozzo, profili sismici ed altre informazioni geofisiche (e.g., Pieri & Groppi, 1981, Cassano et al., 1986; Boccaletti et al., 2004; Scrocca et al., 2007; Carminati et al., 2010; Vannoli et al., 2015; Toscani et al., 2009; Fantoni & Franciosi, 2009, 2010; Carminati et al., 2010; Bonini et al., 2014; Vannoli et al., 2015; Martelli et al., 2017; Livani et al., 2018), consente di definire il quadro sismotettonico del settore delle "Pieghe Ferraresi" in esame. Le principali strutture sismogenetiche riconosciute sono rappresentate da sovrascorrimenti sepolti, attivi o potenzialmente attivi, responsabili della deformazione compressiva delle coperture sedimentarie meso-cenozoiche (e.g., Boccaletti et al., 2004; Basili et al., 2008; Calderoni et al., 2009; Toscani et al., 2009; Cuffaro et al., 2010; Vannoli et al., 2015; Martelli et al., 2017; Livani et al., 2018; DISS Working Group, 2021). Inoltre, faglie normali o trascorrenti localizzate nel substrato carbonatico mesozoico e nelle unità permo-triassiche e nel basamento sottostanti possono rappresentare un'ulteriore sorgente di terremoti (e.g. Cuffaro et al., 2010; Vannoli et al., 2015). I sovrascorrimenti che mostrano evidenze di attività recente sono però associati a sorgenti sismogenetiche solo in alcuni casi. In accordo con i risultati dell'analisi della distribuzione degli *aftershocks* della sequenza sismica dell'Emilia avvenuta nel 2012 (Fig. 16; Bonini et al., 2014) i segmenti sismogenetici dei sovrascorrimenti sono confinati nelle rampe che attraversano i livelli carbonatici meso-cenozoici mentre i segmenti dei sovrascorrimenti localizzati nei sovrastanti livelli clastici e terrigeni neogenici sono interessati da uno scorrimento asismico.

La revisione critica dell'insieme dei dati disponibili in un intorno di circa 15 km dal sito oggetto del progetto ha messo in evidenza la presenza di alcuni sovrascorrimenti attivi che

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 31 di 37
--	--	--------------------

mostrano evidenze di attività recente e di altre strutture potenzialmente attive (Fig. 9, 11, 13, 14 e 15), descritti e discussi in dettaglio nel capitolo 4, di cui si riportano di seguito le caratteristiche principali.

Il sovrascorrimento indicato con il numero 1 in figura 13 è certamente attivo ed associato ad una sorgente sismogenetica capace di generare terremoti di magnitudo anche sino a 6.8 (DISS Working Group, 2021). Questo sovrascorrimento è ubicato a SW del permesso ad una distanza in pianta \geq a circa 6 km dal target minerario del pozzo più meridionale previsto nel progetto.

Il sovrascorrimento riportato con il numero 2 in figura 13 è stato interpretato sia come una rampa attiva nei carbonati di età compresa tra il Triassico superiore e l'Eocene medio (Fig. 14; Martelli et al., 2017), sia come rampa senza chiare evidenze di attività recente che si enuclea da un livello di scollamento superiore posto alla base del Miocene (Fig. 15; Fantoni & Franciosi, 2009). Questa sovrascorrimento è ubicato nella pozione occidentale del permesso "POLA" ad una distanza in pianta \geq a circa 7 km dal target minerario del pozzo più occidentale previsto nel progetto.

La struttura identificata con il numero 3 in figura 13 è costituita da una faglia ad alto angolo estensionale (o transtensionale), potenzialmente attiva, con immersione verso ovest che disloca le unità mesozoiche. A sud del Fiume Po questa faglia prosegue all'interno del permesso "POLA", come suggerito in Martelli et al. (2017), probabilmente al di sotto di un sovrascorrimento superficiale (Fig. 10). Sebbene tale struttura non sia individuata come una sorgente sismogenetica nel database DISS 3.3.0 (DISS Working Group, 2021), faglie normali o trascorrenti ereditate nel substrato carbonatico mesozoico e nelle unità permo-triassiche e nel basamento sottostanti potrebbero essere potenzialmente riattivate anche nel contesto tettonico attuale rappresentando una ulteriore sorgente di terremoti (e.g. Cuffaro et al., 2010; Vannoli et al., 2015). Questa faglia si trova ad una distanza in pianta \geq a circa 4 km dal target minerario del pozzo più occidentale previsto nel progetto.

Il sovrascorrimento sepolto contrassegnato con il numero 4 in figura 13, interessa la porzione orientale del permesso "POLA" in prossimità dei pozzi previsti dal progetto. Questo sovrascorrimento viene considerato potenzialmente attivo nella Carta Sismotettonica della Regione Emilia-Romagna (Martelli et al., 2017) mentre nel database delle sorgenti sismogenetiche DISS 3.3.0 non sono riportate sorgenti in corrispondenza di

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 32 di 37
--	--	--------------------

questa struttura. La geometria di questo sovrascorrimento è stata analizzata in dettaglio nel modello geologico 3D sviluppato dalla società proponente, a cui si rimanda per ulteriori dettagli. Nel rapporto a corredo del modello 3D viene comunque chiarito che nella zona interessata dal progetto tale sovrascorrimento si trova profondità maggiori dei "target" di fondo pozzo previsti (da un minimo di circa 800 metri ad un massimo di circa 1600 metri).

Premesso che l'area in oggetto è interessata da strutture tettoniche attive o potenzialmente attive che potranno generare comunque terremoti naturali a prescindere dalle attività di produzione di energia geotermica previste nel progetto "POLA", e fatta salva la necessità di effettuare comunque un appropriato monitoraggio sismico per verificare, controllare e mitigare eventuali fenomeni sismici indotti e/o innescati (vedi allegato al progetto ed al SIA relativo al monitoraggio), è possibile sviluppare alcune considerazioni aggiuntive.

Per quanto riguarda il sovrascorrimento identificato dal numero 4 in figura 13, le possibili perturbazioni generate dalle previste attività di estrazione e re-iniezione di fluidi geotermici sono state analizzate nel rapporto che descrive i risultati della simulazione numerica del comportamento del serbatoio e di doppietto geotermico nel permesso "POLA" (a cui si rimanda per ulteriori dettagli). I risultati delle simulazioni effettuate, nei limiti dei dati attualmente disponibili per la caratterizzazione delle proprietà del serbatoio e per la definizione della struttura di sottosuolo, non evidenziano la presenza di significativi disturbi di pressione alle profondità a cui è stato ricostruito nel modello geologico 3D il sovrascorrimento. Sulla base di queste indicazioni, e dei risultati del lavoro della Commissione ICHESE, si ritiene improbabile che le attività di produzione di energia geotermica previste nel progetto "POLA", possano perturbare in modo significativo lo stato naturale anche delle altre faglie note nel substrato carbonatico mesozoico e nelle unità permo-triassiche e nel basamento sottostanti (identificate dai numeri 1, 2 e 3 in figura 13), poste a distanze maggiori di 4 km dai pozzi in progetto.

Roma, 18 dicembre 2022

Preparata per IdroGeo Service Srl

Da Dott. Davide Scrocca



	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 33 di 37
--	--	--------------------

7 Bibliografia

- Bally A.W., Catalano R., Oldow J.S., 1985. Elementi di tettonica regionale. Pitagora editrice, 290 pp., ISBN-13: 9788837103590.
- Basili R., G. Valensise, P. Vannoli, P. Burrato, U. Fracassi, S. Mariano, M.M. Tiberti, E. Boschi, 2008. The Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), version 3: summarizing 20 years of research on Italy's earthquake geology. Tectonophysics, doi:10.1016/j.tecto.2007.04.014.
- Bigi G., Cosentino D., Parotto M., Sartori R., Scandone P., 1992. Structural Model of Italy. Scale 1:500,000. In: Quaderni de La Ricerca Scientifica, vol. 114 (3), CNR.
- Boccaletti M., Coli M., Eva C., Ferrari G., Giglia G., Lazzarotto A., Merlanti F., Nicolich R., Papani G., Postpischl D., 1985. Considerations on the seismotectonics of the Northern Apennines. Tectonophysics, 117, 7-38.
- Boccaletti M., Bonini M., Corti G., Gasperini P., Martelli L., Piccardi L., Severi P., Vannucci G., 2004. Carta sismotettonica della regione Emilia-Romagna, scala 1:250.000. Servizio geologico sismico e dei suoli, Regione Emilia-Romagna. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/geologia/temi/geologia/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-in-scala-1-250.000>.
- Boccaletti M., Corti G., Martelli L., 2011. Recent and active tectonics of the external zone of the Northern Apennines (Italy). Int. J. Earth Sci. (Geol Rundsch), 100, 1331-1348, doi 10.1007/s00531-010-0545-y.
- Bonini L., Toscani G., Seno S., 2014. Three-dimensional segmentation and different rupture behavior during the 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy). Tectonophysics 630, 33-42.
- Burrato P., Ciucci F., Valensise G., 2003. An inventory of river anomalies in the Po Plain, Northern Italy: evidence for active blind thrust faulting. Ann. Geophys., 46, 865-882.
- Calderoni, G., R. Di Giovambattista, P. Burrato, G. Ventura 2009 A seismic sequence from Northern Apennines (Italy) provides new insight on the role of fluids in the active tectonics of accretionary wedges. Earth Planet. Sci. Lett., 10.1016/j.epsl.2009.02.015.
- Carminati E., Scrocca D., Doglioni C., 2010. Compaction-induced stress variations with depth in an active anticline: Northern Apennines, Italy. J. Geophys. Res., 115, B02401, doi:10.1029/2009JB006395.
- Cassano, E., Anelli L., Fichera R., Cappelli V., 1986. Pianura Padana. Interpretazione integrata di dati geofisici e geologici. Proc. 73° Meeting Società Geologica Italiana, Roma, 29 settembre - 4 ottobre 1986, 27 pp.
- Castellarin, A., Eva C., Giglia G., Vai G.B., Rabbi E., Pini G.A., Crestana G., 1985. Analisi strutturale del Fronte Appenninico Padano. Giorn. Geol., 3a, 47/1-2.
- Castello B., Selvaggi G., Chiarabba C., Amato A., 2006. CSI Catalogo della sismicità italiana 1981-2002, versione 1.1. INGV-CNT, Roma <http://csi.rm.ingv.it>.
- Cuffaro M., Riguzzi F., Scrocca D., Antonioli F., Carminati E., Livani M., Doglioni C., 2010. On the geodynamics of the northern Adriatic plate. Rendiconti Lincei, 21(1), 253-279. doi:10.1007/s12210-010-0098-9.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 34 di 37
--	--	--------------------

- Devoti, R., Riguzzi F., Cuffaro M., Doglioni C., 2008. New GPS constraints on the kinematics of the Apennines subduction, *Earth Planet Sci. Lett.*, 273, 163–174, doi:10.1016/j.epsl.2008.06.031.
- Di Bucci D., Dolce M., Panei L., D'Ambrogi C., Ferri F., Vittori E., Improta L., Scrocca D., Stabile T.A., Donda F., Mucciarelli M. (2014) Rapporto sullo stato delle conoscenze riguardo alle possibili relazioni tra attività antropiche e sismicità indotta/innescata in Italia. 74 pp. Disponibile su http://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/rapporto-sismicita-indotta-innescata-in-italia/Rapporto_sismicita_indotta_innescata_in_italia.pdf.
- DISS Working Group, 2021. Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.3.0: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/diss3.3.0>.
- Doglioni C., 1991. A proposal for the kinematic modelling of W-dipping subductions – possible applications to the Tyrrhenian-Apennines system. *Terra Nova*, 3, 423-434.
- Ellsworth W L., 2013. Injection-Induced Earthquakes. *Science* 341, 1225942, doi: 10.1126/science.1225942.
- Evans K.F., Zappone A., Kraft T., Deichmann N., Moia F., 2012. A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics* 41, 30–54.
- Fantoni R., Franciosi R., 2009. Mesozoic extension and Cenozoic compression in Po Plain and Adriatic foreland. *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, 9, 28-31.
- Fantoni R., Franciosi R., 2010. Tectono-sedimentary setting of the Po Plain and Adriatic foreland. *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 21(Suppl 1), S197–S209, doi 10.1007/s12210-010-0102-4.
- Ghielmi M., Minervini M., Nini C., Rogledi S., Rossi M., Vignolo A., 2010. Sedimentary and tectonic evolution in the eastern Po-Plain and northern Adriatic Sea area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy). *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 21 (Suppl 1), S131–S166, doi 10.1007/s12210-010-0101-5.
- Giamberini M.S., Donato A., Manzella A., Pellizzone A., Scrocca D., Bruno D.E., Nardini I., Botteghi S., Uricchio V.F., 2016. Rischi ambientali connessi all'utilizzo della risorsa geotermica: cause e buone pratiche per la loro minimizzazione. In: Adele Manzella (Ed.) *Progetto Atlante Geotermico del Mezzogiorno*, CNR per il Mezzogiorno, CNR-IGG. ISBN: 9788879580304
- Govoni A., Marchetti A., De Gori P., Di Bona M., Lucente F.P., Improta L., Chiarabba C., Nardi A., Margheriti L., Piana Agostinetti N., Di Giovambattista R., Latorre D., Anselmi M., Ciaccio M.G., Moretti M., Castellano C., Piccinini D., 2014. The 2012 Emilia seismic sequence (Northern Italy): imaging the thrust fault system by accurate aftershocks location. *Tectonophysics* 622, 44–55, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2014.02.013>
- Grünthal, G., 2014. Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. *Geothermics* 52, 22-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.09.009>

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 35 di 37
--	--	--------------------

- ISIDe Working Group., 2007. Italian Seismological Instrumental and Parametric Database (ISIDe). Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/ISIDE>
- ICHESE, 2014. Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region, . International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia-Romagna region, 213 pp., http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it/unmig/agenda/upload/45_175.pdf.
- ITHACA Working Group, 2019. ITHACA (ITaly HAZard from CAPable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal <http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx>
- Latorre D., Di Stefano R., Castello B., Michele M., Chiaraluce L., 2023. An updated view of the Italian seismicity from probabilistic location in 3D velocity models: The 1981–2018 Italian catalog of absolute earthquake locations (CLASS). <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229664>.
- Livani M., Scrocca D., Arecco P., Doglioni C., 2018. Structural and stratigraphic control on salient and recess development along a thrust belt front: the Northern Apennines (Po Plain, Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(5), 4360-4387.
- Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Antonucci A., 2022. Database Macrosismico Italiano (DBMI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/DBMI/DBMI15.4>
- Majer E.L., Baria R., Stark M., Oates S., Bommer J., Smith B., Asanuma H., 2007. Induced seismicity associated with enhanced geothermal systems. *Geothermics* 36, 185–222.
- Manzella A., Bonciani R., Allansdottir A., Botteghi S., Donato A., Giamberini S., Lenzi A.P.M., Pellizzone A. & Scrocca D., 2018. Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics* 72, 232–248. doi: 10.1016/j.geothermics.2017.11.015.
- Manzella A., Bianchi F., Ventisette M.S., Gorini F., Lelli M., Montanari D., Minichilli F., Montegrossi G., Scrocca D., Chiarabba C., Lattanzi P., Pandeli E., Maury J., Maurel C., Ragnarsson A., Hauksdottir S., Oladottir A.A., Manfrida G., Fiaschi D., Parisi M.L., Tosti L., Harcouet-Menou V., Bos S., Luchini M., Lenzi S., Paci M., Taccone R., Batini F., Bosia C., Dumas O., Aksoy N., Nador A., 2019. Report on mitigation measures - Adopted solutions and recommendations to overcome environmental concerns. Report GEOENVI Project: Tackling the Environmental Concerns for Deploying Geothermal Energy in Europe. Deliverable number D2.2., <https://www.geoenvi.eu/wp-content/uploads/2019/12/D2.2-Report-on-mitigation-measures-2-1.pdf>.
- Martelli L., Bonini M., Calabrese L., Corti G., Ercolessi G., Molinari F.C., Piccardi L., Pondrelli S., Severi P., 2017. Carta sismotettonica della Regione Emilia-Romagna e aree limitrofe. Regione Emilia-Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli. <https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/pubblicazioni/cartografia-geo-tematica/carta-sismotettonica-della-regione-emilia-romagna-e-aree-limitrofe-edizione-2016>.

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 36 di 37
--	--	--------------------

- McGarr A., 2014. Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 119, 1008–1019.
- McGarr A., Simpson D., Seeber L., 2002. Case histories of induced and triggered seismicity. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, vol. 81A, edited by W. W. Lee et al., pp. 647–661, Acad. Press, San Diego, Calif.
- Michetti, A.M., Serva, L. Vittori, E., 2000. ITHACA Italy Hazard from Capable Faults: a database of active faults of the Italian onshore territory. CD-Rom e note esplicative, ANPA, Roma.
- Montone, P., Mariucci M. T., Pondrelli S., Amato A., 2004. An improved stress map for Italy and surrounding regions (central Mediterranean). *J. Geophys. Res.*, 109, B10410, 10.1029/2003JB002703.
- Montone, P., Mariucci M. T., Pierdominici S., 2012. The Italian present-day stress map. *Geophys. J. Int.*, 189, 705–716 doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05391.x.
- National Research Council, 2013. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies, 225 p., National Academies Press, Washington, D. C. Disponibile su: <http://dels.nas.edu/Report/Induced-Seismicity-Potential-Energy-Technologies/13355>.
- Picotti V., Pazzaglia F.J., 2008. A new active tectonic model for the construction of the Northern Apennines mountain front near Bologna (Italy). *J. Geophys. Res.*, 113, B08412, doi:10.1029/2007JB005307.
- Pieri M., Groppi G., 1981. Subsurface geological structure of the Po plain (Italy). CNR, Progetto Finalizzato Geodinamica, Pubblicazione n. 414, 21 pp.
- Pieri M., 1983. Three seismic profiles through the Po Plain. In: A.W. Bally (Ed.), *Seismic Expression of Structural Stiles*. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology. 15 (3.4.1), 8-26.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Ekström G., Morelli A., Gasperini P., Vannucci G., 2006. The Italian CMT dataset from 1977 to the present. *Phys. Earth Planet. Int.*, 159(3-4), 286-303, doi: 10.1016/j.pepi.2006.07.008.
- Pondrelli S., Salimbeni S., Perfetti P., Danecek P., 2012. Quick regional centroid moment tensor solutions for the Emilia 2012 (northern Italy) seismic sequence. *Ann. Geophys.* 55. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6146>.
- Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli, B., Gasperini P., Antonucci A., 2022. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>
- Royden L., 1988. Flexural behaviour of the continental lithosphere in Italy: constraints imposed by gravity and deflection data. *J. Geophys. Res.*, 93, 7747-7766.
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M., Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marcocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., 2012. The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations and magnitudes. *Ann. Geophys.* 55, 549–559. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-6159>.
- Scrocca D., Carminati E., Doglioni C., Marcantoni, D., 2007. Slab retreat and active shortening along the central-northern Apennines. In: Lacombe O., Lavé J., Roure, F., Verges, J. (Eds), *Thrust belts and Foreland Basins: from fold*

	<u>Relazione Sismotettonica</u>	Pagina 37 di 37
--	--	--------------------

kinematics to hydrocarbon systems, *Frontiers in Earth Sciences*, 471–487, Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-69425-0, doi 10.1007/978-3-540-69426-7_25.

- Toscani, G., Burrato P., Di Bucci D., S. Seno and G. Valensise, 2009. Plio-Quaternary tectonic evolution of the Northern Apennines thrust fronts along the Bologna-Ferrara section (Po Plain, Italy), based on geological observations and analogue modelling: seismotectonic implications. *Boll. Soc. Geol. It.*, 128, 2, 605-613.
- Turrini, C., Toscani, G., Lacombe, O., & Roure, F. (2016). Influence of structural inheritance on foreland-foredeep system evolution: An example from the Po valley region (northern Italy). *Marine and Petroleum Geology*, 77, 376-398.
- Turrini C., Bosica B., Ryan P., Shiner P., Lacombe O., Roure F., 2018. 3D structural and thermal modelling of Mesozoic petroleum systems in the Po Valley Basin, northern Italy. *Petroleum Geoscience*, 24(2), 172-196.
- Vannoli, P., Burrato P., Valensise G., 2015. The Seismotectonics of the Po Plain (Northern Italy): Tectonic Diversity in a Blind Faulting Domain. *Pure Appl. Geophys.*, 172, 1105-1142, 10.1007/s00024-014-0873-0.
- Zang A., Oye V., Jousset P., Deichmann N., Gritto R., McGarr A., Majer E., Bruhn D., 2014. Analysis of induced seismicity in geothermal reservoirs – An overview. *Geothermics* 52, 6–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.06.005>.