

EXPLORATION



Exploration

SGEG-GEOM

**Campo di CALIPSO
Studio Sismo-Tettonico**

Aprile 2019



Eni S.p.A.
Exploration

GEOM-2019006-MS-RAT-01

TIPO
DOCUMENTO

DI

RAPPORTO TECNICO

OGGETTO:

Campo di CALIPSO
STUDIO SISMO-TETTONICO

DISTRIBUZIONE:

A: *GEOES/CS*
GEOM

NOTE:

DATA DI EMISSIONE: 11/04/2019

"Servizi di Geologia e Geofisica"

GEOM

"Geodinamica e Monitoraggio Geofisico"

01
Rev.

55
Pagine

Redatto da GEOM:

F. Ferulano

Verificato da GEOM:

L. Barzaghi

F. Ferulano

Approvato da GEOM:

A. Crottini



Eni S.p.A.
Exploration

RAPPORTO TECNICO

“STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO”

DOC. N°
GEOM-2019006-MS-RAT-01

REV.
00

PAG. 2 DI 55

Foglio Revisioni

Rev	Modifiche
00	11/04/2019 Emissione



SOMMARIO

1	Introduzione.....	4
2	Sintesi risultati	5
3	Geologia e Tettonica.....	6
3.1	Tettonica Regionale	7
3.2	Geologia e tettonica Locale.....	14
4	Storia sismica e valutazione della pericolosità sismica dell’area di Calipso	15
4.1	Sismicità nell’area di Calipso.....	15
4.1.1	Sismicità Storica (1000-2018)	15
4.1.2	Sismicità Strumentale (1981-2018)	21
4.1.3	Faglie Sismogenetiche	25
4.1.4	Faglie Capaci	27
4.2	Pericolosità Sismica	28
4.2.1	Risentimenti avvertiti nell’area del campo di Calipso	28
4.2.2	Inquadramento amministrativo e Normativa sismica	33
4.2.3	Analisi Statistiche	35
5	Sismicità indotta da attività petrolifere.....	38
5.1	Inquadramento generale	38
5.2	Cause d’innescò della sismicità legate all’attività estrattiva	39
5.2.1	Iniezione di fluidi.....	39
5.2.2	Fratturazione idraulica (fracking)	40
5.2.3	Effetti poro elastici legati all’estrazione di fluidi.....	40
5.2.4	Disequilibrio isostatico indotto dalla estrazione di fluidi.....	41
5.3	La situazione italiana.....	42
5.4	Considerazioni relative al campo di Calipso.....	45
5.4.1	Sismicità regionale e campi idrocarburi.....	45
5.4.2	Sismicità locale e campo di Calipso	46
5.4.3	Iniezione di fluidi e fratturazione idraulica (fracking).....	51
5.4.4	Effetti poro-elastici legati all’estrazione di fluidi	51
5.4.5	Disequilibrio isostatico indotto dalla estrazione di fluidi.....	52
6	Bibliografia.....	53



1 Introduzione

Il campo di Calipso è ubicato nell'offshore marchigiano a una distanza dalla costa di circa 35 km. E' stato scoperto nel 1984 ed è stato messo in produzione nel 2002 con i pozzi Calipso 3 Dir A e Calipso 4 Dir A. Il progetto attuale nasce dalla nuova interpretazione sismica del 2013 e prevede la perforazione del pozzo Calipso 5 Dir, con lo scopo di mettere in produzione l'area sud-orientale del giacimento. La profondità verticale massima prevista è di 1250 m da livello mare.

Nell'ambito della procedura VIA, al fine di rispondere alle richieste del Ministero dell'Ambiente e delle Tutela del Territorio e del Mare, alle osservazioni della Regione Marche (*“Verificare se l'intervento proposto possa in qualche modo contribuire all'innescio di attività sismica”*) e del pubblico, è stato finalizzato uno studio sulla situazione sismo-tettonica dell'area per valutare se la messa in produzione del nuovo pozzo possa in qualche modo indurre attività sismica.

A tal fine, il presente documento inquadra l'area d'interesse nel contesto geologico-tettonico-strutturale, analizza la sismicità verificatasi negli ultimi secoli ricavabile dai DB nazionali storici e strumentali, e mette in relazione quanto raccolto con le caratteristiche del campo e con i parametri del progetto proposto.



2 Sintesi risultati

Il campo di Calipso si trova nell'offshore marchigiano, a circa 35 km dalla costa. La geologia superficiale è caratterizzata da una successione terrigena plio-pleistocenica discordante sulla successione messiniana. Gli strati superficiali pleistocenici non risultano coinvolti dall'attività di sollevamento, che ha interessato l'area fino al Pliocene, indicando una sostanziale inattività del fronte di Calipso quantomeno negli ultimi 200-300 mila anni, con le attuali spinte Appenniniche che si scaricano in buona parte nella catena affiorante, in quella sepolta onshore e nella fascia offshore immediatamente antistante il M. Conero, presso Ancona.

I dati disponibili a partire dall'anno 1000 relativi alla sismicità sia storica sia strumentale nell'offshore di fronte ad Ancona, mostrano una sismicità con magnitudo maggiore di 4 ma minore di 6, ubicata solo in corrispondenza dei fronti carbonatici della zona del M. Conero, presso la costa, mentre non ci sono eventi con $M > 4$ nella zona dell'avafossa plio-pleistocenica, in cui è ubicato il campo di Calipso, e nel raggio di 30 km da detto campo.

Dalle informazioni disponibili e considerata la posizione offshore del campo di Calipso, non emergono situazioni di criticità in merito alla pericolosità sismica.

Le specifiche caratteristiche strutturali e produttive del campo di Calipso sono state confrontate con le possibili cause di sismicità indotta da attività estrattive disponibili in letteratura. Poichè Calipso presenta parametri ben inferiori a quelli dei campi dove si sono verificati episodi di questo tipo, è ragionevole escludere situazioni di rischio.



3 Geologia e Tettonica

In questo capitolo viene presentata una sintesi della geologia e della tettonica dell'area marchigiana, sia onshore che offshore, con lo scopo di evidenziare e descrivere le aree sismogenetiche, che possono essere sede della sismicità nell'intorno del campo a gas di Calipso.

Il giacimento di Calipso (nella concessione B.C14.AS, Fig. 1) è prossimo ad altri campi dell'offshore marchigiano (in particolare Clara - concessione B.C13.AS), per i quali vi sono informazioni di letteratura che sono state utilizzate a supporto del presente studio.

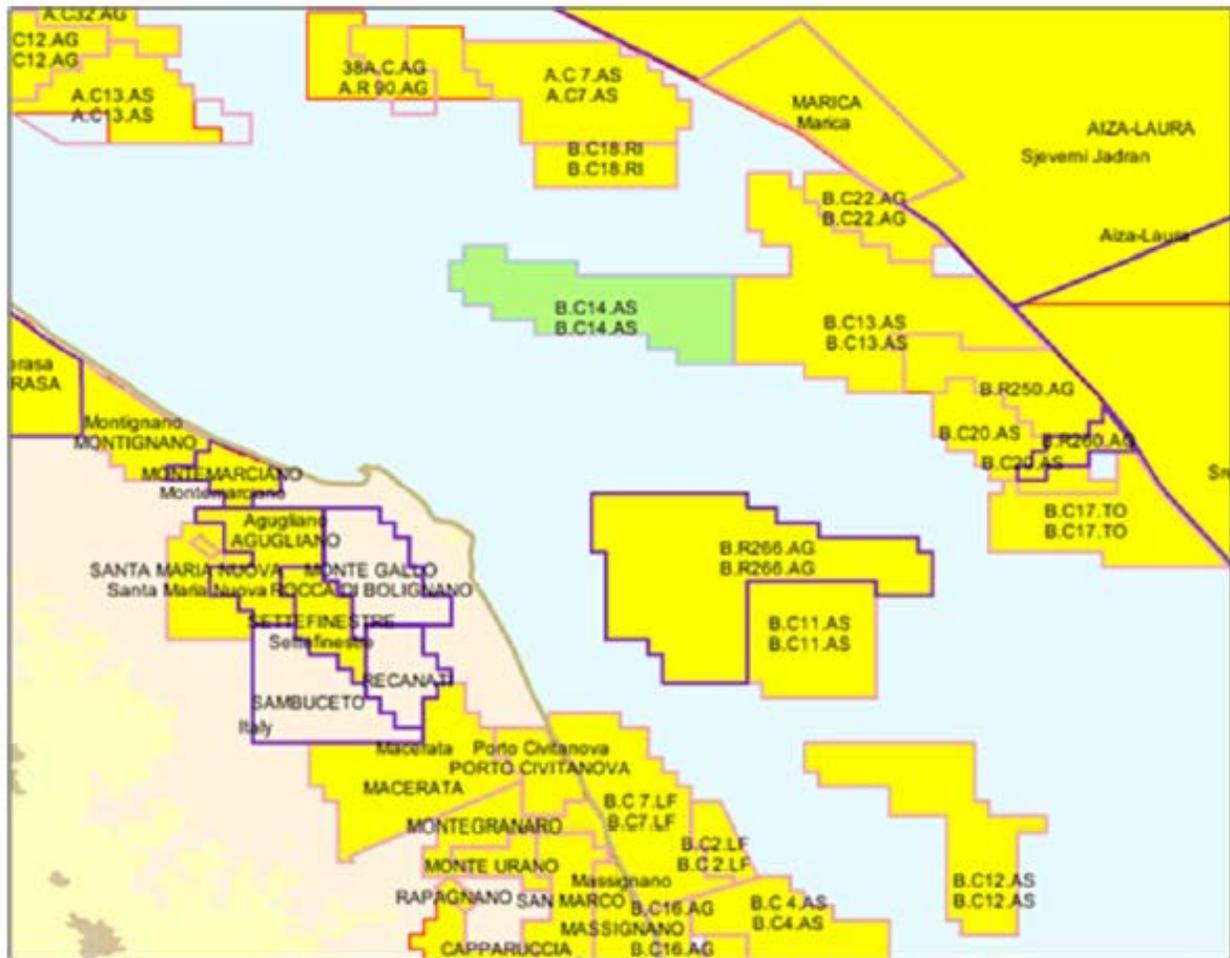


Fig. 1: mappa indice con evidenziata in verde la concessione B.C14.AS



3.1 Tettonica Regionale

Il sottosuolo dell'offshore marchigiano ed abruzzese è costituito dalle medesime unità presenti in affioramento nel Bacino Umbro – Marchigiano. Durante il Cretaceo, il bacino è stato caratterizzato dalla sedimentazione della Maiolica, delle Marne a Fucoidi (che rappresentano un buon riflettore sismico) e della Scaglia. La sedimentazione carbonatica della Scaglia è proseguita anche nel Paleocene-Eocene.

A partire dall'Eocene superiore e nei successivi Oligocene e Miocene, si sono aggiunti nel bacino importanti apporti terrigeni fini, che hanno dato luogo alla deposizione di prevalenti marne.

A livello regionale, nel tardo Oligocene (25-30 Ma) si è originata la tettonica compressiva che ha dato origine alla catena Appenninica Centrale Adriatico vergente, formata da falde e pieghe che sovrascorrono e si impilano sulla placca adriatica in subduzione (Fig. 2). Il fronte della tettonica compressiva è progressivamente migrato verso Est, dislocando ed impilando falde di ricoprimento costituite dalle successioni carbonatiche marine meso-cenozoiche ed interessando unità terrigene neogeniche di avansfossa progressivamente più giovani, comprese quelle, lungo la costa abruzzese e marchigiana, dove è presente una zona di deformazione il cui stile tettonico ricalca quello appenninico.

Nell'offshore anconetano la maggiore densità di strutture tettoniche si osserva in prossimità del Monte Conero (Sud di Ancona), (Fig. 3) con anche importanti svincoli/rampe laterali (SW-NE) nei carbonati: tali strutture sono in parte riconducibili ad inversioni tettoniche di graben mesozoici. Quest'area è stata definita come la propaggine più esterna sepolta della catena appenninica, e si estende verso Est fino ai campi di Calipso e Clara.

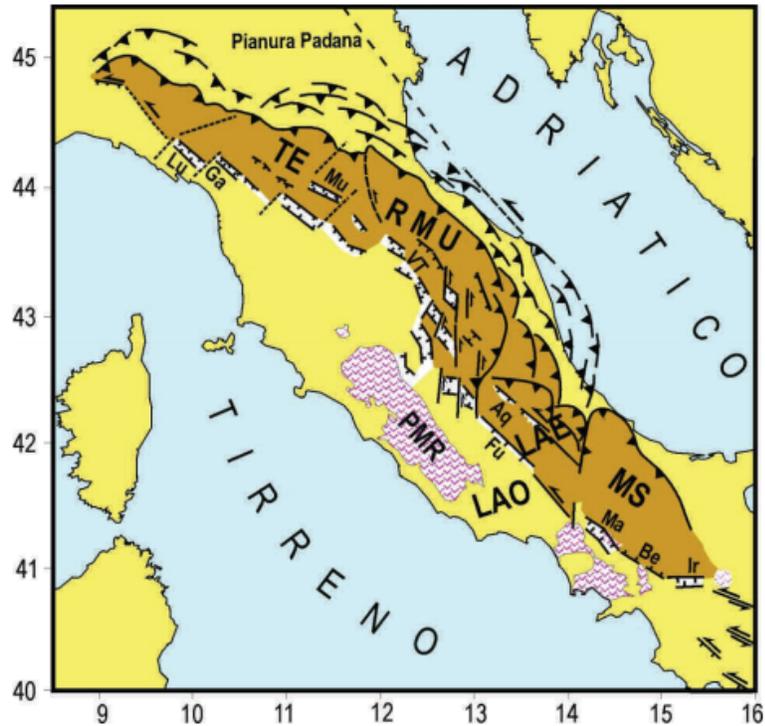


Fig. 3.3. Settore esterno della catena appenninica (in colore scuro) che sotto la spinta dell'Adriatico si muove più velocemente della parte interna della catena. Aq = sistema di faglie aquilano, Be=Beneventano, ELA = parte orientale della piattaforma Lazio-Abruzzi, Fu = sistema di faglie del Fucino, Ga=Garfagnana, Ir=Irpinia, Lu=Lunigiana, Ma=Matese, MS = cuneo Molise-Sannio, Mu=Mugello, RMP = Provincia magmatica romana, RMU = cuneo Romagna-Marche-Umbria, TE =cuneo Toscana-Emilia, VT=Val Tiberina, WLA = parte occidentale della piattaforma Laziale-Abruzzese.

Fig. 2: rappresentazione del settore esterno della Catena Appenninica (da Mantovani et al., 2014).

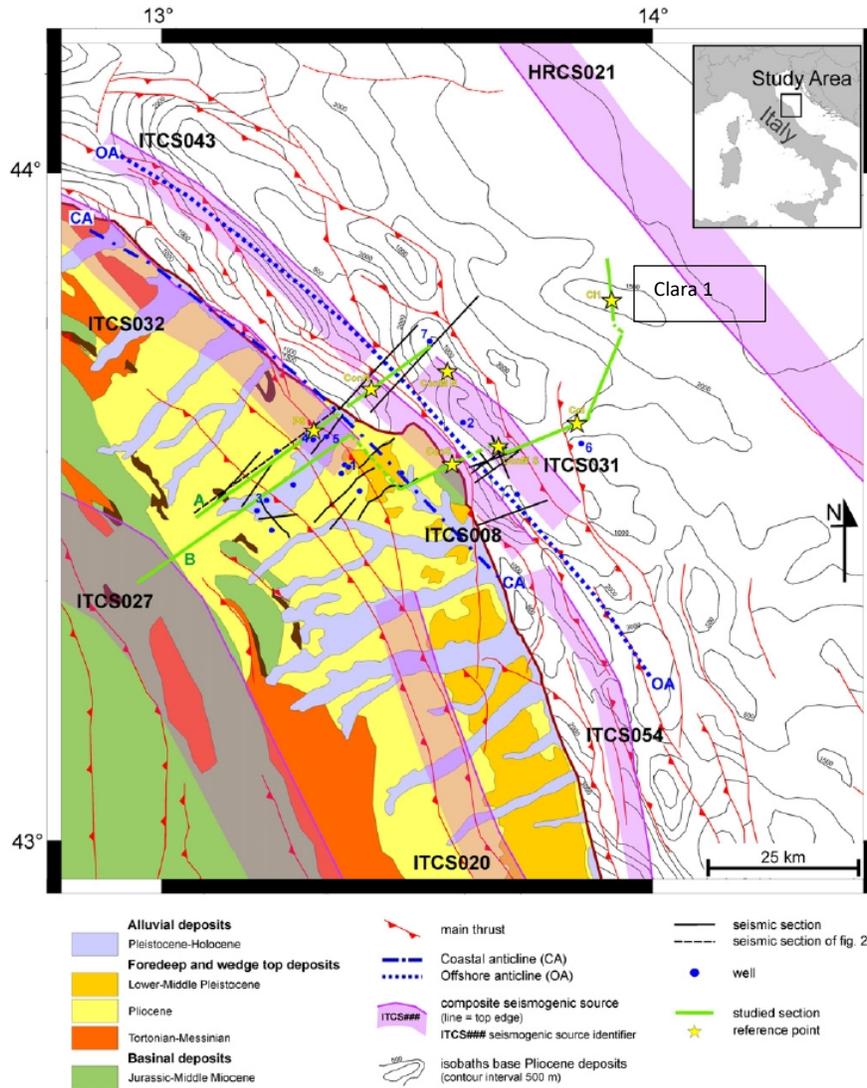


Figure 1. Map showing the main geological and structural features in and around the study area. Stars indicate the position of the reference points used to calculate the slip rates for the studied structures (PS: Pesaro–Senigallia; ConN: Conero North; ConS: Conero South; ConM N: Conero Offshore North; ConM S: Conero Offshore South; Col: Colosseo; C11: Clara 1). Well: 1) Offagna1, 2) Brezza1, 3) Filottrano1, 4) Chiaravalle1, 5) Monsano1, 6) Colosseo1, 7) Elga 1. Cross sections: A) Esino-BR5-11 section, B) Conero section. Seismogenic source identifiers (e.g. ITCS###) as in DISS 3.1.1 (DISS Working Group, 2010).

Fig. 3: mappa con i principali elementi geologici e strutturali nell'area Marchigiana (Maesano et al, 2013)

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 10 DI 55

In Fig. 4 è visibile la ricostruzione geologica in profondità lungo le 2 sezioni presenti in Fig. 3 con un'analisi di dettaglio fino a 10 km. L'area di interesse per il campo di Calipso è quella ad Est della sezione B, in prossimità della stellina contrassegnata con C11 che indica il pozzo CLARA 1. Si osserva che la serie superficiale Plio-Pleistocenica (evidenziata dai colori giallo e arancione) non è interessata da strutture significative, le quali terminano più in profondità all'interno degli strati messiniani.

In Fig. 5 è presentata una linea sismica proprietaria di Eni, estratta dal rilievo sismico 3D denominato "Adria", la quale partendo da ENE incontra il pozzo Clara 1 e si estende a SW fino a giungere alla costa in prossimità di Ancona, e corrisponde al tratto NE della sezione B di Fig. 4. Essa mostra il dettaglio della serie stratigrafica fino a circa 3 km di profondità: essenzialmente l'area arancione della figura precedente, con la discontinuità pre-pliocenica che corrisponde al top-messiniano (*t-mes*). In direzione della costa, i livelli mineralizzati, si chiudono in onlap, sui livelli argillosi della formazione Santerno, per limite deposizionale. Nella sezione, inoltre, il substrato dell'offshore anconetano presenta una successione carbonatica pre-pliocenica posta talora a poche centinaia di metri di profondità (pozzo Brezza1) che localmente affiora sulla costa (Monte Conero) in corrispondenza di alti strutturali appenninici. Verticalmente, la successione terrigena di copertura è relativa a intervalli stratigrafici differenti e idraulicamente separati dalle zone reservoir. La formazione Santerno rappresenta un'importante barriera idraulica di natura geologica verso la costa. Si può notare come i sedimenti Pliocenico-Quaternari risultino progressivamente indeformati allontanandosi dalla linea di costa e addentrandosi nell'offshore adriatico. Alla risoluzione della linea non appaiono evidenti discontinuità degli strati, i quali quindi non sono stati interessati da fenomeni tettonici significativi da oltre 500 mila anni.

Differenti modelli cercano di spiegare i movimenti deformativi della regione. Esiste un buon accordo tra i ricercatori circa la presenza di 2 piani principali dentro il prisma di accrescimento (freccie rosse nella legenda in Fig. 4): quello alla base delle Evaporiti triassiche (passaggio dal grigio scuro al grigio chiaro) sul quale si sono originati i



sovrascorrimenti principali, e quello più superficiale coincidente con la formazione Marne a Fucoidi o Scaglia Cinerea, su cui si riconoscono sovrascorrimenti minori (*sch* nella Fig. 4).

Invece, è dibattuta l'esistenza di un livello di scollamento profondo in corrispondenza della parte superiore del basamento magnetico.

Da quanto evidenziato nelle sezioni la struttura di Clara (*C11*) è la più esterna della deformazione tettonica della catena Umbro-Marchigiana nell'offshore Adriatico.

Maesano et al. (2013) hanno presentato una ricostruzione temporale del sistema di sovrascorrimenti delle 2 sezioni della Fig. 4 e hanno calcolato come è distribuita la velocità di scivolamento (*slip rate*) delle strutture da Sud-Ovest ad Nord-Est .

Nel complesso le strutture a mare risultano più antiche e con una velocità di *slip* più bassa di quelle sulla costa. Le velocità di *slip* sono distribuite in un intervallo 0.26-1.35 mm/yr e decrescono da SW a NE, quindi le faglie compressive prossime alla costa (quelle vicino ad Ancona denominate Conero onshore e Conero offshore) sono 3-4 volte più veloci di quelle localizzate al largo in Adriatico (Clara). Clara appare come la struttura più vecchia e la più lenta, rispetto a quella di Conero onshore che è più giovane e più veloce.

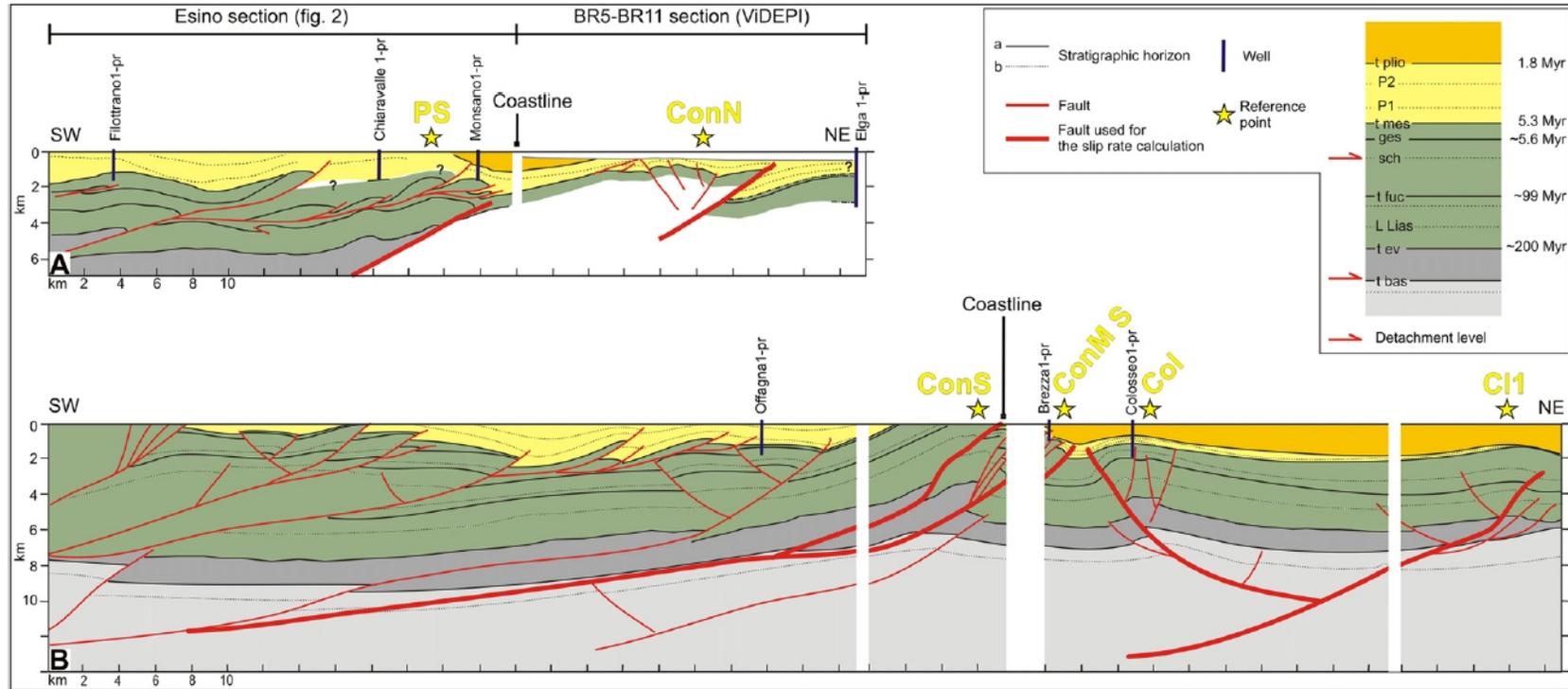


Figure 4. Geological cross sections: A) Esino-BR5-11 section, obtained from the ViDEPI database and original data (see Fig. 2 for seismic data and interpretation); B) Conero section, modified from line 6 in Fantoni and Franciosi (2010). Stratigraphic horizons: a) main seismic reflectors identified in all the analyzed seismic lines; b) other seismic reflectors. Simplified local stratigraphy: t bas, top of the acoustic basement; t ev, top of the Anidriti di Burano fm.; t fuc, top of the Marne a Fucoidi fm., ges, top of Messinian; P1, top of Cellino unit (Zanclean), P2, top of Morro d'Oro and Tortoreto units, (Piacenzian), t plio, Gelasian; for simplicity stratigraphic terms not cited in the text are omitted. For other symbols see Figure 1.

Fig. 4: sezione geologica che si estende dal fronte Nord-Appenninico alla costa Marchigiana (Maesano et al., 2013). CI1 nella sezione B indica il pozzo Clara 1.

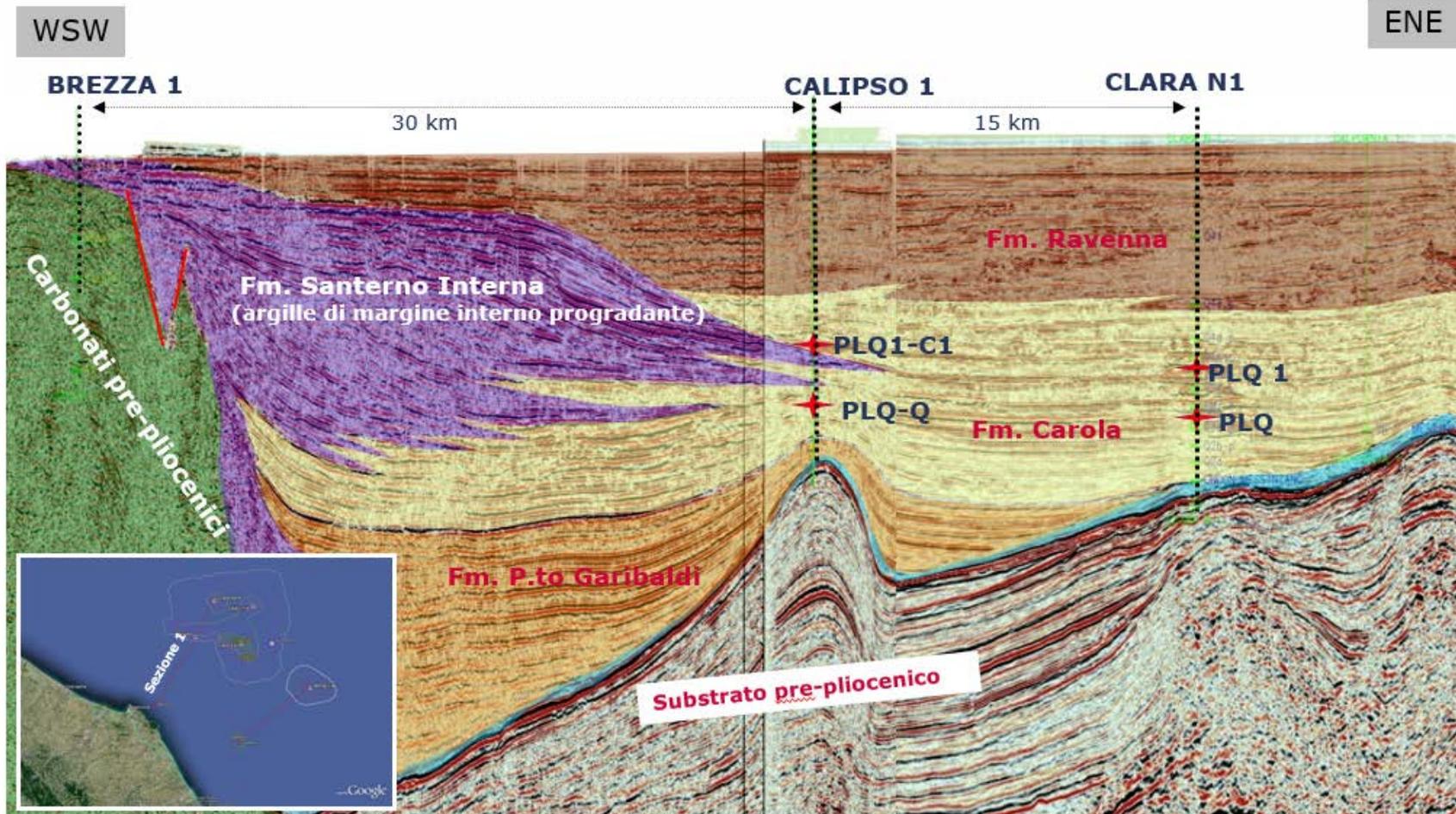


Fig. 5: sezione sismica regionale interpretata Clara Complex-M.te Conero (Sezione 1 della mappa).

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 14 DI 55

3.2 Geologia e tettonica Locale

Il giacimento di Calipso è costituito da un'anticlinale pleistocenica in posizione molto avanzata, con asse orientato NO-SE, che si è formata al di sopra di un sovrascorrimento intrabacinale (Fig. 5).

La ricostruzione strutturale si basa sull'interpretazione dell'acquisizione sismica 3D denominata "Adria". Sono stati interpretati tre orizzonti, corrispondenti ai livelli PLQ1 A, PLQ AE e il Top Unconformity, a partire dai quali, con i dati dei pozzi, è stato ricostruito il layering interno del reservoir.

I livelli mineralizzati a gas appartengono alla Formazione Carola, ma si trovano in sequenze deposizionali diverse: il livello principale, PLQ1 C, è costituito da sabbie Pleistoceniche accumulate ai piedi della scarpata del prograding appenninico; i livelli secondari più profondi, appartenenti alla sequenza PLQ, sono livelli sottili caratterizzati da facies di transizione tra le facies interne di scarpata e quelle esterne di bacino.

Il pozzo Calipso 5 Dir ha come obiettivo di ottimizzare la produzione nell'area sud-orientale, con un ulteriore punto di drenaggio di livelli già sviluppati dagli altri pozzi del campo, che si prevede siano intercettati dal pozzo alla profondità rispettivamente di 1059 m slm (PLQ P1) e 1086 m slm (PLQ Q).

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 15 DI 55

4 Storia sismica e valutazione della pericolosità sismica dell'area di Calipso

4.1 Sismicità nell'area di Calipso

In Italia i database macrosismici partono generalmente dall'anno 1000. Per i terremoti più antichi le informazioni si limitano a episodi di estremo danno o risentiti nei centri più importanti, la completezza dei cataloghi migliora nel tempo e aumentano le informazioni per singolo evento.

La storia sismica è stata studiata all'interno di 2 circonferenze di raggio rispettivamente 50 e 100 km centrate sul pozzo Calipso 1. Si sono cercate informazioni bibliografiche sui risentimenti che ha subito la zona nel passato, la presenza di faglie considerate sismogenetiche e la pericolosità sismica stimata secondo gli ultimi decreti ministeriali e regionali.

4.1.1 Sismicità Storica (1000-2018)

Le informazioni sulla sismicità storica in Italia (1000-2014) sono disponibili nel DB CPT15 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) (Rovida et al., 2016), revisione più recente di cataloghi sviluppati negli ultimi 30 anni.

In tale catalogo sono riportati i sismi con intensità $I_{max} > 5$ (scosse forti) e magnitudo momento (M_w) stimata maggiore di 4.0. Le informazioni disponibili per eventi fino al 1963 sono solo di tipo macrosismico (effetti di tipo geologico e/o danni al patrimonio immobiliare), poi fino al 1980 sono miste macrosismiche e strumentali. Dal 1980, con l'ampliarsi della rete sismologica nazionale, le informazioni sono essenzialmente di tipo strumentale.

In Fig. 6 sono stati riportati gli epicentri dei sismi con magnitudo $M_w > 4$ estratti dal DB CPT15. Nessun evento con $M > 4$ è stato registrato dal 2015 al 2018. Al centro dei cerchi di raggio rispettivamente 50 e 100 km (verde e arancione) si trova il pozzo Calipso 1.



EnGIS
enterprise GIS

Campo di Calipso Sismicità Storica dal 1000 al 2018

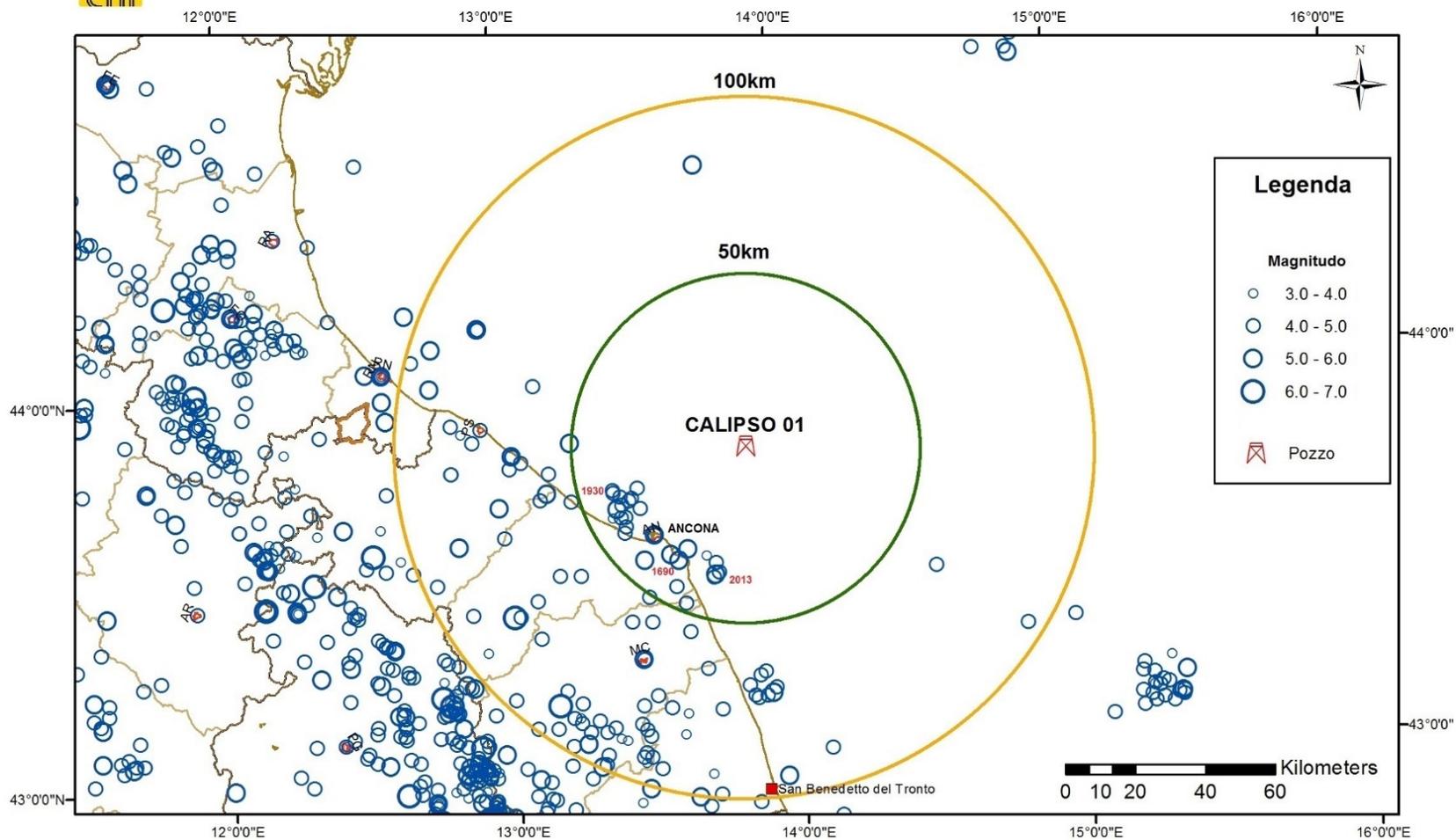


Fig. 6: mappa con gli epicentri di magnitudo ≥ 4.0 dal 1000 al 2018. Le circonferenze arancio e verde hanno raggi di 100 e 50 km rispettivamente



Appare evidente che all'interno delle aree da investigare la sismicità è tutta raggruppata nel settore ad Ovest, in corrispondenza dell'Appennino Umbro-Marchigiano, mentre è molto scarsa nel cerchio di 50 km, che copre essenzialmente l'area a mare.

Si tenga presente che per le sorgenti in mare le localizzazioni sono vincolate solo con informazioni concentrate tutte sulla costa (si veda in Fig. 7 la distribuzione dell'intensità per l'evento del 1930).

Si nota che la sismicità principale ($M_w > 5$) entro 50 km dal campo di Calipso è concentrata intorno alla città di Ancona (vedi Tabella 1 per la lista di sismi con M stimata > 5). Le informazioni disponibili per i singoli terremoti precedenti il secolo XX sono spesso scarse, limitate alla città di Ancona e i comuni vicini, anche per il sisma del 1690 di M stimata $=5.6$. Il terremoto più forte dell'ultimo secolo si è verificato nel 1930 (vedi Fig. 7) (M stimata $5.8-6.0$) con danni numerosi in un'ampia fascia da Senigallia (VIII-IX grado) fino a sud di Ancona (VIII grado ad Ancona, Sirolo, Numana e altre località). L'ultimo fenomeno significativo si è avuto nel Luglio 2013 ($M_w=4.9$) con epicentro in mare ad una decina di chilometri dalla costa e profondità di circa 8 km, all'interno di una sequenza iniziata vari mesi prima. In Fig. 8 la distribuzione dell'intensità ottenuta da questionari dell'INGV via WEB.



30 October 1930 07:13:--, Senigallia
MDP set by Molin and Mucci, 1992
NMDP 268 Imax 8-9

CPTI15 ★ **43.689, 13.385** **Mw 5.83 ±0.08**
macroseismic □ 43.689, 13.385 Mw 5.74 ±0.10
instrumental Mw 6.02 ±0.14

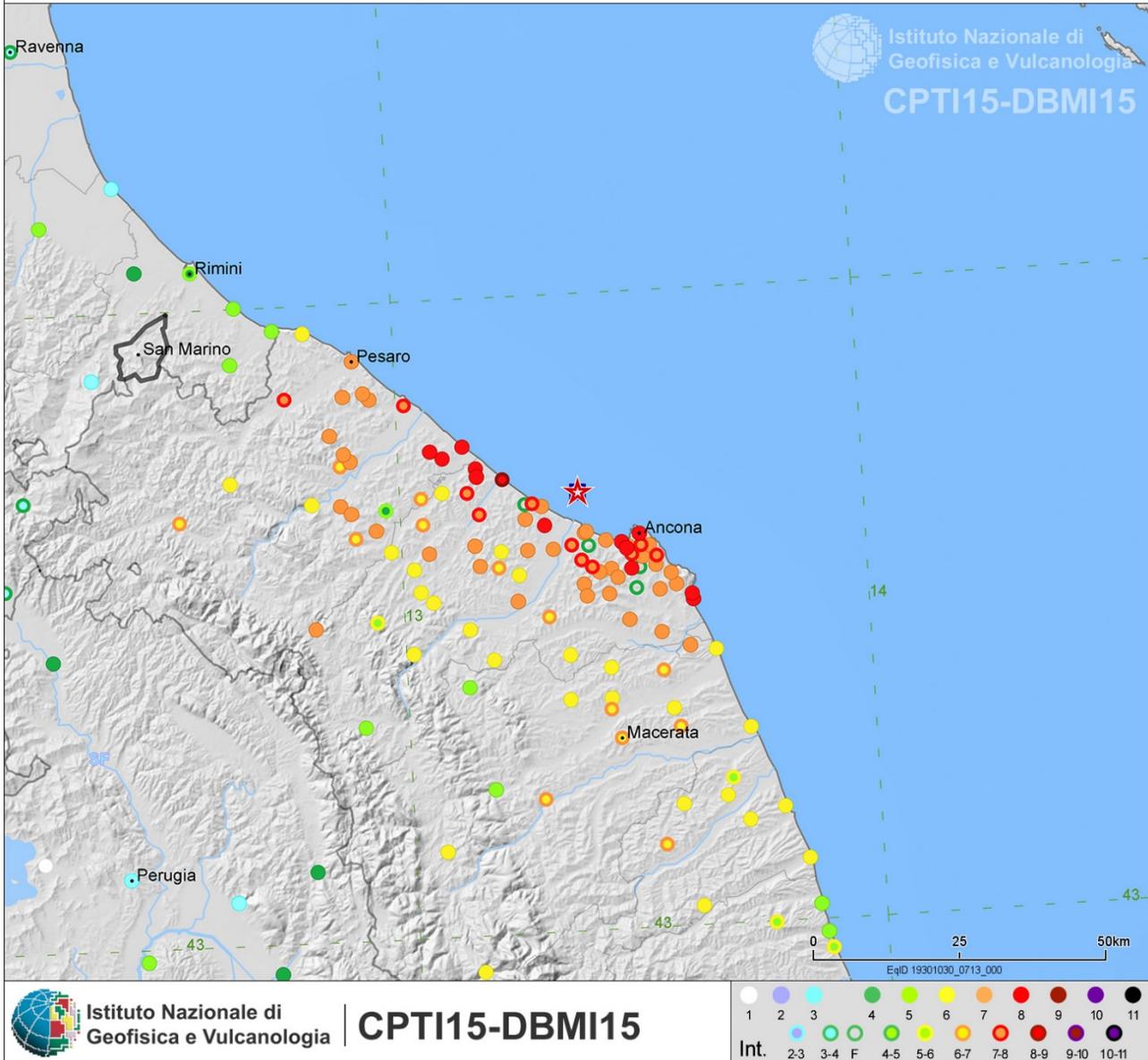


Fig. 7: distribuzione delle intensità per il sisma del 30 Ottobre 1930 07:13 UTC (stellina rossa).

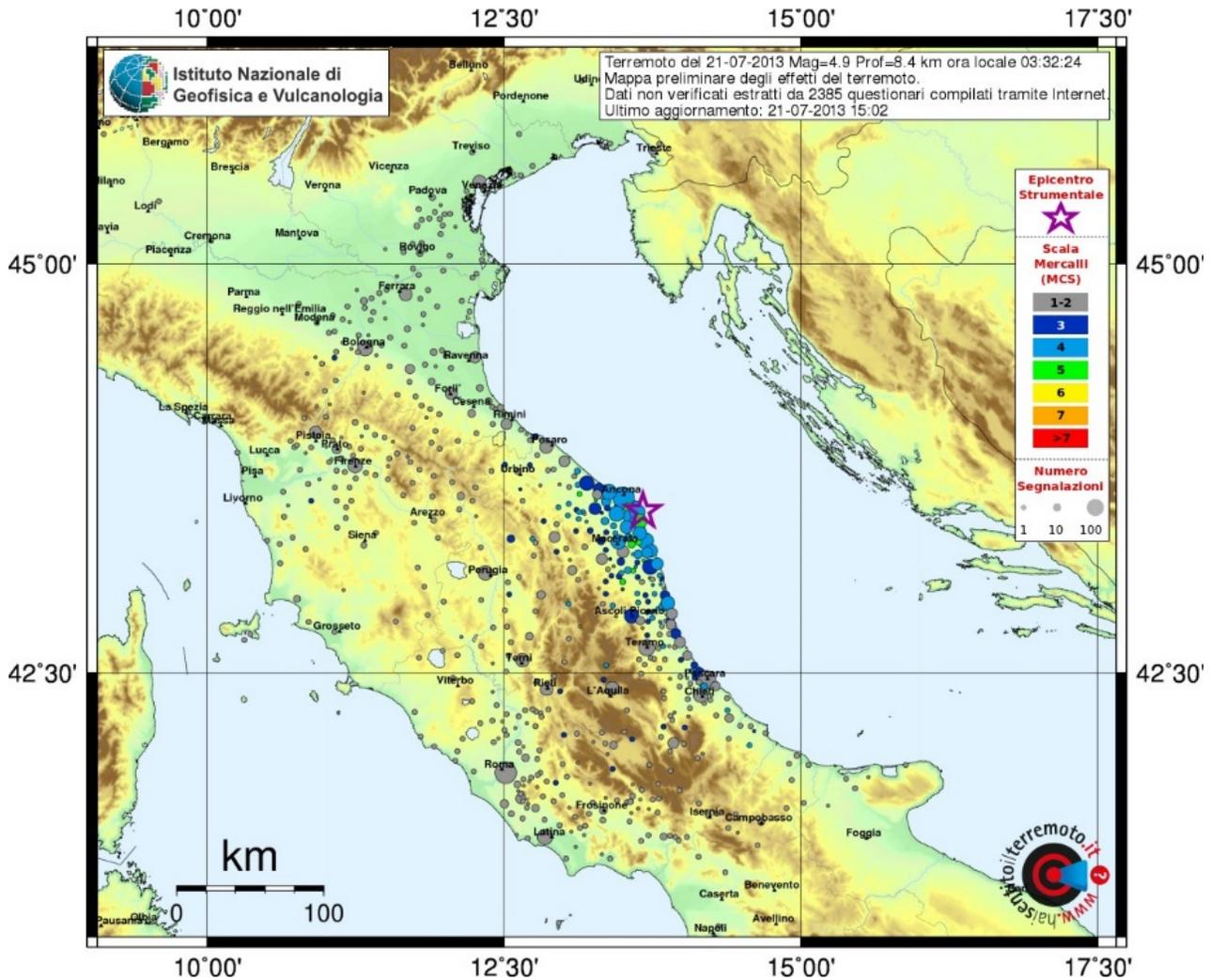


Fig. 8: mappa preliminare della distribuzione delle intensità per il sisma del 21 Luglio 2013 01:32 UTC (stella viola).



YEAR	MO	DA	HO	MI	SE	AX	TL	LAT	LON	MW	DMW	TMW
1269	9					Costa anconetana	MM	43.566	13.567	5.56	0.5	Mdm
1474	8	18				Ancona	MM	43.619	13.513	5.10	0.5	Mdm
1690	12	23	00	20		Costa anconetana	MM	43.550	13.594	5.58	0.3	Mdm
1870	2	8				Anconetano	MM	43.555	13.473	5.15	0.4	Mdm
1917	11	5	22	47		Costa anconetana	MM	43.578	13.628	5.22	0.1	Wmim
1924	1	2	08	55	13.00	Senigallia	MM	43.737	13.138	5.48	0.1	Wmim
1928	5	30	20	01		Senigallia	MM	43.865	13.228	5.02	0.1	Wmim
1930	10	30	07	13		Senigallia	MM	43.689	13.385	5.83	0.1	Wmim

Tabella 1: Sismi vicino ad Ancona con Magnitudo stimata > 5. AX= Area dei maggiori effetti. TL=epicentro di default, ossia MI = macrosismico (se in alternativa a strumentale), II = strumentale solo (unica alternativa), MM = macrosismico solo (unica alternativa). DMW= errore associato alla stima della magnitudo momento MW. TMW=codice di determinazione della magnitudo, ossia Mdm = macrosismica, determinata da dati di intensità, Mlo = macrosismica, calcolata dall'intensità epicentrale lo, Wmim = media della magnitudo momento strumentale e macrosismica pesata con l'inverso dei quadrati delle rispettive incertezze, InsO = strumentale "osservata", InsC = strumentale calcolata.



4.1.2 Sismicità Strumentale (1981-2018)

La sismicità strumentale registrata dal 1981 è estratta dai DB CSI 1.1 (fino al 1985) e CNT (dal 1986) dell'INGV (Fig. 9). L'attività sismica principale è concentrata, come già osservato per i dati storici, nell'entroterra appenninico e lungo la costa. E' presente uno sciame in mare a SE di Ancona, di fronte al Monte Conero. Il numero degli altri epicentri in mare si riduce all'allontanarsi dalla costa senza evidenziare altre zone significative.

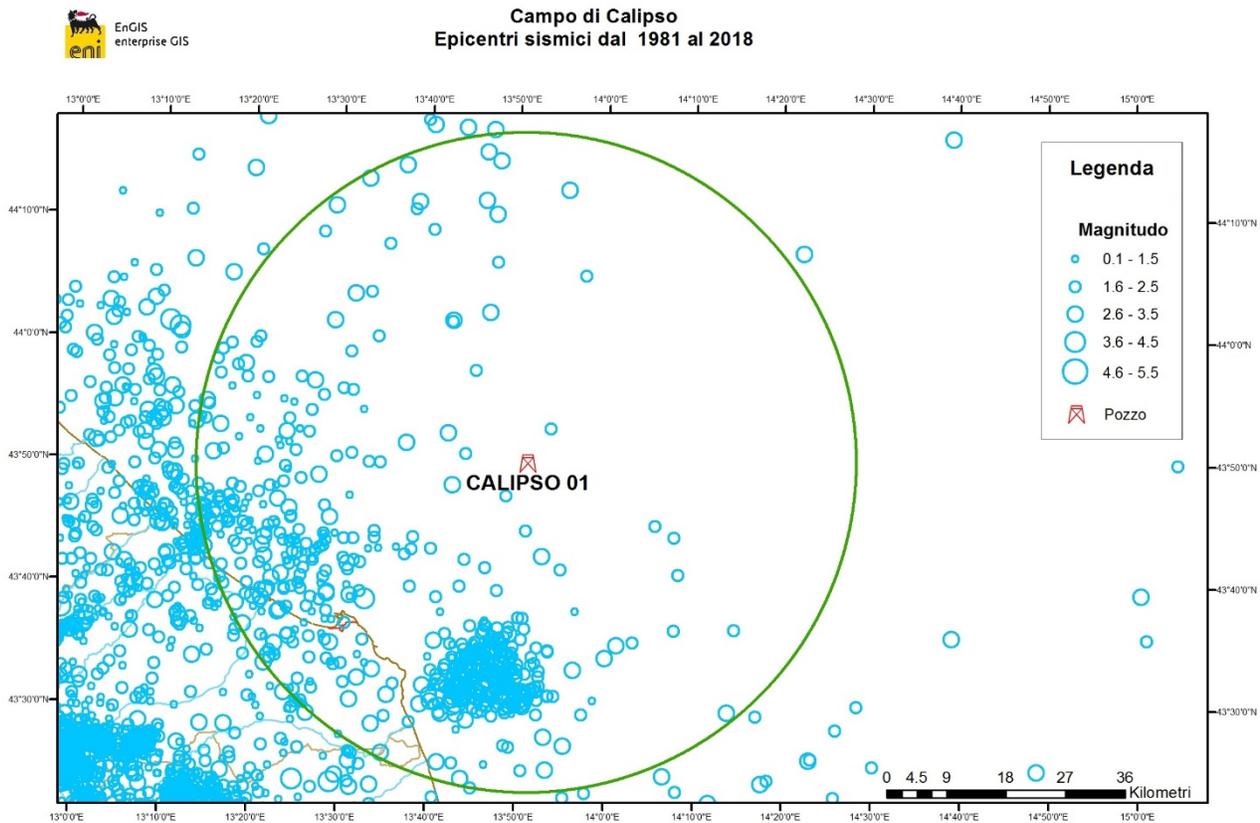


Fig. 9: sismicità strumentale dal 1981 al 2018 nell'offshore Anconetano. In verde la circonferenza di raggio 50 km.

In 38 anni sono stati localizzati entro 50 km dall'area di interesse 588 eventi con magnitudo massima di 5 (Fig. 9). In Fig. 10 è riportata la distribuzione nel tempo di questi



sismi con l'indicazione della magnitudo. Si osserva che la magnitudo minima resta costante fino a circa il Giugno 2005, poi c'è un abbassamento di tale soglia, dovuto all'incremento del numero di stazioni della rete sismica nazionale (RSNC) nell'area, in particolare nella zona marchigiana. Tutte le stazioni sono localizzate ad una distanza maggiore di 35 km dal campo (Fig. 11).

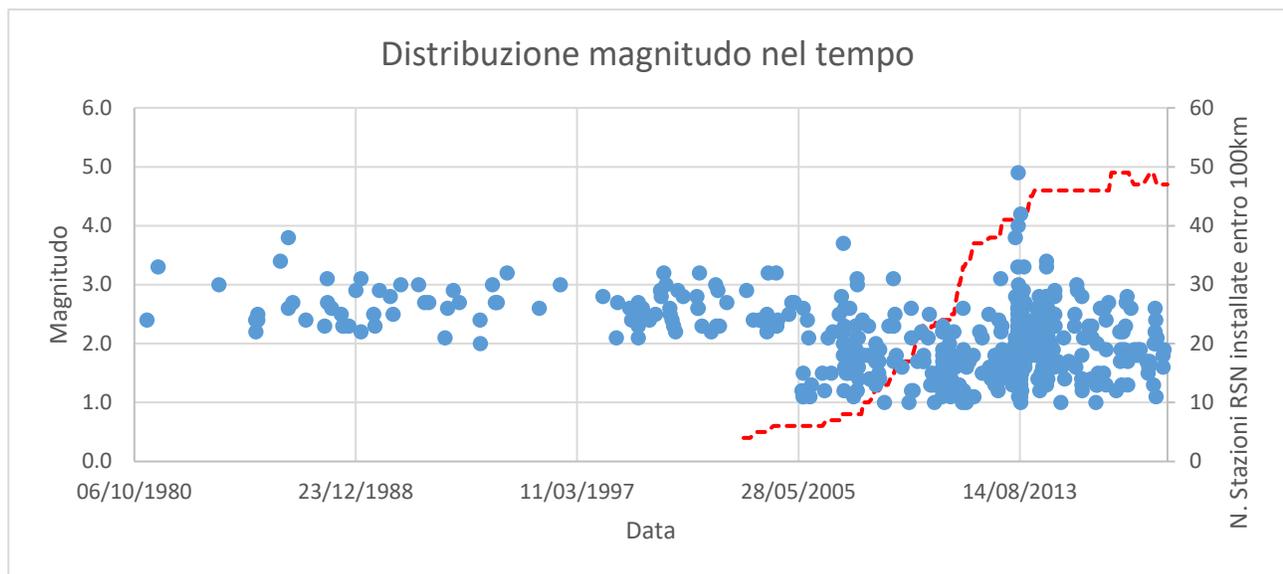


Fig. 10: distribuzione della magnitudo nel tempo per i sismi con epicentro entro 50 km dal pozzo Calipso 1. La linea rossa indica le stazioni installate entro 100 km di distanza.

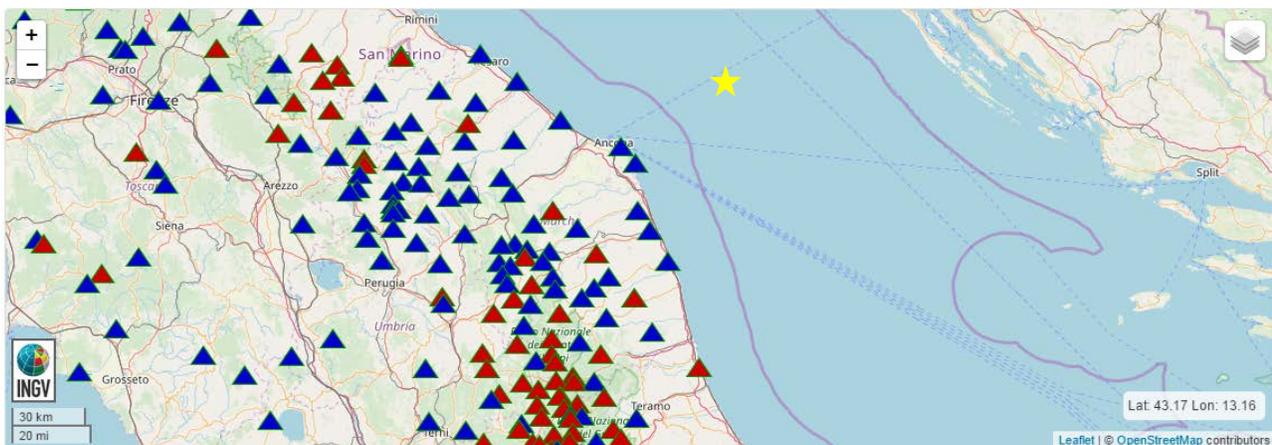


Fig. 11: distribuzione delle stazioni della Rete Sismica Nazionale dal 1988 (in blu quelle attualmente funzionanti, in rosso quelle chiuse). La stella gialla indica la posizione del campo di Calipso.



In Fig. 12 è mostrata la distribuzione dei sismi per classi di magnitudo. Sotto $M=1.8$ il numero di eventi diminuisce, segno che al di sotto di tale valore, le informazioni sulla sismicità sono statisticamente non complete.

La distribuzione dei sismi in profondità (Fig. 13 e distribuzione in mappa in Fig. 14) indica che la maggior parte dell'attività è concentrata nei primi 40 km della crosta e a profondità maggiori dei 5 km.

Uno sguardo sull'attività sismica più vicina a Calipso, circa entro 20 km (Fig. 14), evidenzia una ventina di eventi di energia medio-bassa con valori di profondità dispersi tra 5 – 40 km.

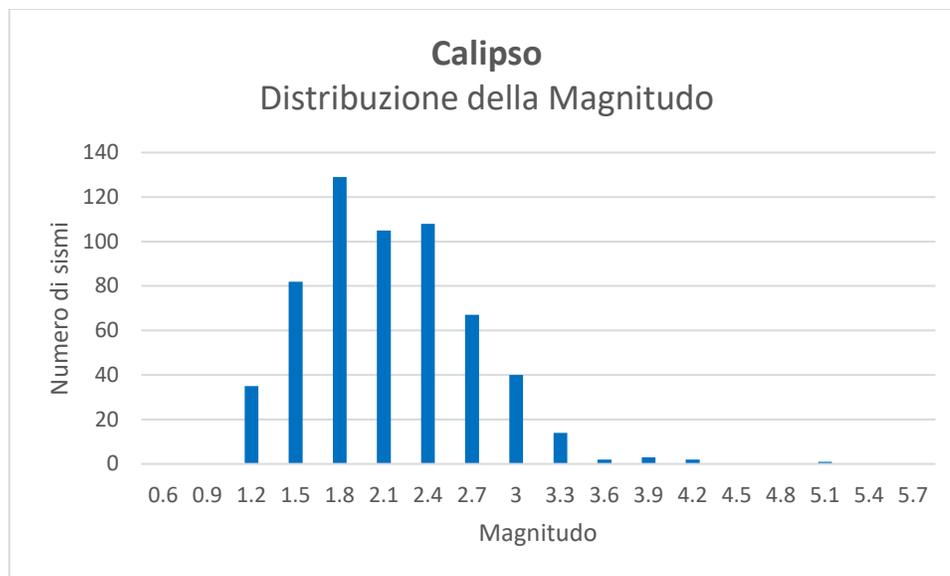


Fig. 12: distribuzione della magnitudo per i sismi registrati dal 1981 al 2018 con epicentro entro 50 km dal pozzo Calipso 1.

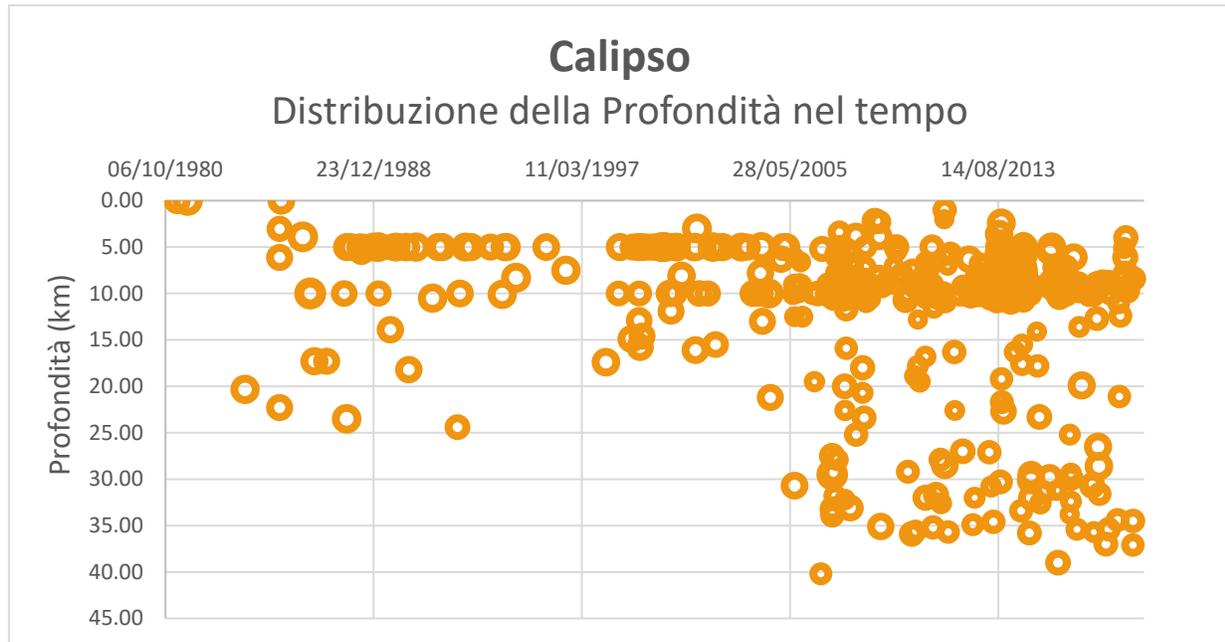


Fig. 13: distribuzione della profondità nel tempo per i sismi con epicentro entro 50 km dal campo di Calipso. I sismi con $M \geq 4$ sono concentrati nello sciame del Luglio-Agosto 2013. Dimensione dei cerchi proporzionale alla magnitudo.

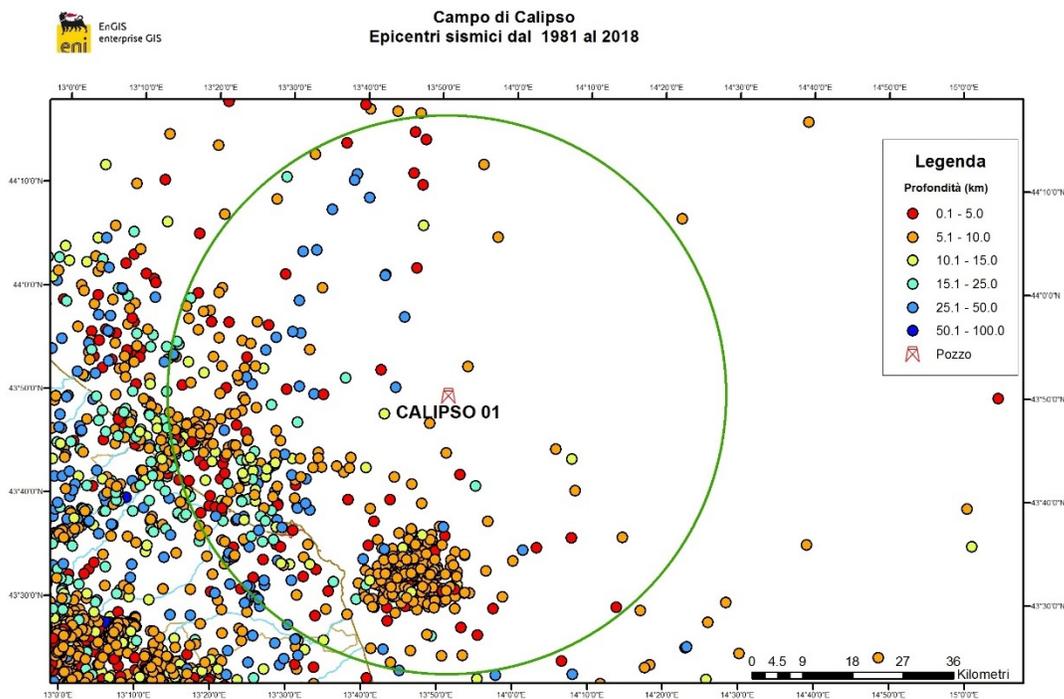


Fig. 14: mappa della sismicità strumentale nell'offshore Marchigiano in funzione della profondità degli ipocentri. In verde la circonferenza di raggio 50 km.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 25 DI 55

4.1.3 Faglie Sismogenetiche

Tramite lo studio della sismicità storica e strumentale è possibile individuare le strutture sismogenetiche, ossia in grado di generare un terremoto, disponibili nel DB DISS 3.2.1 (database delle faglie sismogenetiche - INGV), che riporta informazioni su Sorgenti Sismogenetiche Singole e su Sorgenti Complesse.

Nella Fig. 15 sono visualizzate le strutture sismogenetiche per l'area Anconetana, che recuperano quanto è stato presentato nel capitolo di Tettonica Regionale (3.1). Per la zona a mare sono stati inseriti 2 elementi principali, uno vicino alla costa e uno spostato verso Est. Entrambi corrispondono a rampe di sovrascorrimenti individuate sulle sezioni sismiche.

La ITCS031 (Conero offshore) è localizzata nella zona di costa a Sud di Ancona, in corrispondenza della quale sono state individuate le principali attività sismiche nell'area. In particolare il sisma del 23 Dicembre 1690 viene attribuito a questa struttura e ne viene ipotizzata la posizione (rettangolo giallo) con informazioni estratte dall'analisi delle sezioni sismiche, completate con quelle geologiche disponibili.

La struttura ITCS108 (Clara) rappresenta la parte più avanzata del sovrascorrimento Appenninico e come tale è stata inserita nelle faglie sismogenetiche. Allo stato attuale non ci sono riscontri di attività tettonica in questa regione. Le sue caratteristiche geometriche riportate nel DISS sono state dedotte dai dati geofisici e dalle considerazioni geometriche estrapolabili dalla geometria del thrust, la profondità della struttura viene indicata tra 2 – 8 km.

Per i dettagli sul suo assetto strutturale si rimanda al capitolo 5.



Fig. 15: mappa delle faglie sismogenetiche estratta dal DISS 3.2.1. I rettangoli gialli sono le proiezioni in superficie delle sorgenti sismogenetiche individuali. Le fasce arancioni sono invece le proiezioni delle sorgenti sismogenetiche composite, di cui evidenziate la ITCS108 (Clara) e la ITCS031 (Conero offshore)



4.1.4 Faglie Capaci

Le informazioni disponibili per i terremoti storici, quelle di tipo paleosismologico e quelle geologico-strutturali di un'area permettono di individuare le cosiddette “Faglie Capaci”, definite come “faglie che potenzialmente possono creare deformazione in superficie”.

Per completare il quadro delle informazioni disponibili a livello nazionale sulle aree potenzialmente attive dal punto di vista sismico, si riporta in Fig. 16 la mappa con la distribuzione di Faglie Capaci presenti nel DB ITHACA di ISPRA per la zona in studio.

Si osserva che il campo di Calipso non risulti interessato da alcuna faglia capace.



Fig. 16: distribuzione delle Faglie Capaci (in rosso) nell'area Marchigiana. Mappa estratta da “SGI GeoMapViewer” con dati del DB ITHACA di ISPRA.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 28 DI 55

4.2 Pericolosità Sismica

4.2.1 Risentimenti avvertiti nell'area del campo di Calipso

Prima di presentare gli aspetti della normativa sismica della zona del campo di Calipso, che tiene conto di quanto l'area ha risentito nel passato di attività sismica vicina e lontana, viene presentato il quadro delle informazioni disponibili dal database DBMI15 dell'INGV (Locati et al., 2015) sui risentimenti sismici sperimentati dall'anno 1000. Tali informazioni sono state raccolte da fonti coeve o successive, da memorie sui danni (quando ce ne sono stati), in particolare da archivi parrocchiali (dopo il concilio di Trento), da archivi pubblici o privati. È possibile avere dati incompleti in zone più isolate rispetto ai centri amministrativi e a quelli con maggiori scambi commerciali. Le analisi fin qui compiute sui terremoti nell'area entro 50 km dal campo di Calipso indicano il comune di Ancona come quello con una storia più esauriente. Le informazioni disponibili per $Int > 3$ sono visualizzabili in Fig. 17 e in Tabella 2.

La massima intensità osservata nell'area Anconetana è 8 (Scossa rovinosa) per 3 sismi, evidenziati in giallo in Tabella 2. Le informazioni dei 2 sismi precedenti il 1800 (1269 e 1690) risultano scarse, in particolare per quello del 1269 vi è anche un grande incertezza sulla reale localizzazione. Il terremoto del 1930 è localizzato in mare di fronte a Senigallia e, come già detto nel capitolo 4.1.1, ha presentato danni da Senigallia ad Ancona.

Valori di Intensità 7 (Scossa Fortissima) sono stati osservati per sismi localizzati lungo la costa e nell'entroterra Anconetano. La zona ha risentito anche dell'attività del vicino Appennino sia nel suo settore Romagnolo, sia in quello Umbro-Marchigiano, ma con valori di intensità più bassi.

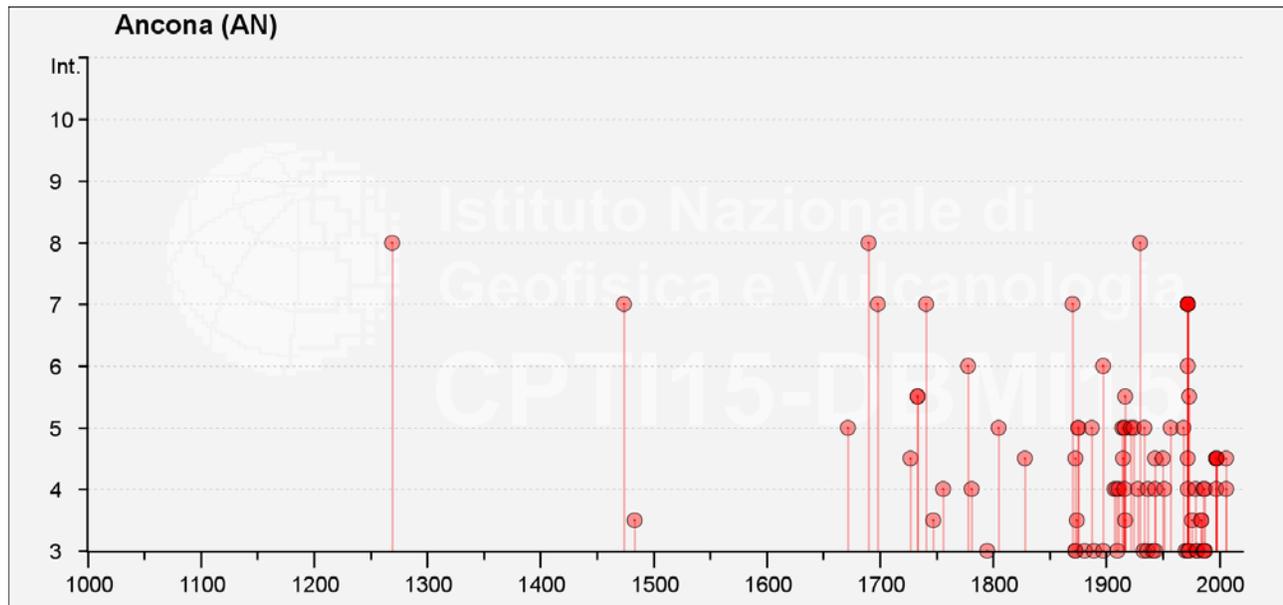


Fig. 17: risentimenti riferiti a Intensità > 3 avvertiti ad Ancona dall'anno 1000 (fonte INGV DBMI15).

Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Area dei maggiori effetti	NMDP	Io
8	1269 09	Costa anconetana	2	8
7	1474 08 18	Ancona	1	7
3-4	1483 08 11 19 40	Romagna(FC)	14	8
F	1599 11 06 01 25	Valnerina (PG)	20	9
5	1672 04 14 15 45	Riminese	92	8
8	1690 12 23 00 20	Costa anconetana	16	8
7	1698 12	Anconetano	2	6
4-5	1727 12 14 19 45	Valle del Metauro (PS)	32	7
5-6	1733 10 19 03 30	Anconetano	4	4-5
5-6	1733 10 20	Anconetano	1	5-6
7	1741 04 24 09 20	Fabrianese (AN)	135	9
3-4	1747 04 17	Appennino umbro-marchigiano (PG)	63	9
F	1751 07 27 01	Appennino umbro-marchigiano (PG)	66	10
4	1756 10 06 20	Costa pesarese	7	4-5
F	1756 10 22	Golfo di Manfredonia (FG)	4	5-6
6	1778 01 04 16 30	Ancona	1	6
4	1781 06 03	Cagliese (PS)	157	10
3	1795 06 19 23 30	Maceratese	17	6



Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Area dei maggiori effetti	NMDP	Io
F	1799 07 28 22 05	Appennino marchigiano (MC)	70	9
5	1805 05 09 01	Maceratese	3	5-6
F	1818 12 09 18 55	Parmense	26	7
4-5	1828 04 11 22 25	Appennino umbro-marchigiano	22	5-6
7	1870 02 08	Anconetano	10	7
4-5	1873 03 12 20 04	Appennino marchigiano (MC)	196	8
3	1873 06 29 03 58	Alpago Cansiglio (BL)	197	9-10
3	1873 09 17	Appennino tosco-ligure	64	6-7
3-4	1874 02 24 06 52	Aquilano	26	6-7
2-3	1874 12 06 15 50	Val Comino (FR)	43	7-8
5	1875 03 17 23 51	Costa romagnola	144	8
5	1875 12 06	Gargano (FG)	97	8
3	1881 09 10 07	Chietino	43	7-8
5	1887 05 26	Jesi (AN)	19	5
3	1889 12 08	Gargano (FG)	122	7
6	1897 09 21	Marche settentrionali (PS)	44	7
3	1897 12 18 07 24 20.00	Alta Valtiberina (AR-PG)	132	7
4	1907 01 23 00 25	Adriatico centrale	93	5
4	1909 01 13 00 45	Emilia Romagna orientale (BO)	867	6-7
3	1910 12 26 16 30	Monti della Laga (RI-PG)	50	5-6
4	1911 02 19 07 18 30.00	Forlivese	181	7
5	1914 10 27 09 22	Lucchesia	660	7
4-5	1915 01 13 06 52 43.00	Marsica (AQ)	1041	11
5	1916 05 17 12 50	Riminese	132	8
F	1916 07 04 05 06	Monti Sibillini (PG)	18	6-7
5	1916 08 16 07 06 14.00	Riminese	257	8
4	1916 11 16 06 35	Alto Reatino (RI)	40	8
3-4	1917 04 26 09 35 59.00	Alta Valtiberina (AR-PG)	134	9-10
5-6	1917 11 05 22 47	Costa anconetana	26	6
2	1922 06 08 07 47	Valle del Chienti (MC)	47	6
5	1922 10 11 06 43 42.00	Costa anconetana	20	5
5	1924 01 02 08 55 13.00	Senigallia (AN)	76	7-8
4	1928 05 30 20 01	Senigallia (AN)	17	5
2	1929 04 10 05 44	Bolognese	87	6
2-3	1929 04 19 04 16	Bolognese	82	6-7
2-3	1930 07 23 00 08	Irpinia (AV)	547	10
8	1930 10 30 07 13	Senigallia (AN)	268	8
2	1931 06 25 05 01	Senigallia (AN)	14	4-5



Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Area dei maggiori effetti	NMDP	Io
3	1933 09 26 03 33 29.00	Maiella - Abruzzo	325	9
5	1934 11 30 02 58 23.00	Adriatico settentrionale	51	5
3	1936 10 18 03 10	Alpago Cansiglio (BL)	269	9
2	1936 12 09 07 34	Caldarola (MC)	31	6-7
4	1937 11 26 21 58 30.00	Costa pesarese	7	5
3	1941 12 19	Monti Sibillini (AP)	30	7
2-3	1943 01 16	Monti Sibillini (AP)	22	6-7
3	1943 01 29	Monti Sibillini (AP)	50	6-7
4	1943 03 25	Marche meridionali	15	6
4-5	1943 07 31 04 37	Senigallia (AN)	5	5
4-5	1950 09 05 04 08	Gran Sasso (TE)	386	8
4	1951 08 08 19 56	Gran Sasso (TE)	94	7
5	1957 11 11 21 40	Costa anconetana	50	5
2	1962 01 23 17 31	Costa pesarese	49	5
5	1968 01 29 03 14 47.00	Ancona	1	5
3	1970 09 07 14 02 21.00	Appennino umbro-marchigiano	56	5
6	1972 01 25 20 24 35.20	Costa anconetana	24	6
7	1972 02 04 02 42 18.56	Costa anconetana	75	
7	1972 02 04 09 18 30.09	Costa anconetana	56	
7	1972 02 05 01 26 29.88	Costa anconetana	2	
7	1972 02 05 07 08 11.75	Costa anconetana	6	
7	1972 02 05 15 14 48.05	Costa anconetana	3	
7	1972 02 06 01 34 18.75	Costa anconetana	1	
7	1972 06 14 18 55 52.54	Costa anconetana	17	
3	1972 10 25 21 56 11.31	Appennino settentrionale	198	5
4-5	1972 11 26 16 03	Marche meridionali	73	8
4	1972 11 30 11 25 27.45	Costa pesarese	30	
3	1973 04 19 17 41 35.00	Pietralunga (PG)	22	7
5-6	1973 11 10 03 01 04.88	Costa anconetana	5	
F	1974 12 02 01 55 15.00	Valnerina (PG)	27	7-8
3-4	1976 05 06 20	Friuli (UD)	770	9-10
F	1978 12 05 15 39 04.00	Romagna (FO)	34	4-5
4	1979 09 19 21 35 37.00	Valnerina (PG)	694	8-9
3	1980 02 28 21 04 40.00	Valnerina (PG)	146	6
3	1980 11 23 18 34 52.00	Irpinia-Basilicata	1394	10
3-4	1984 04 29 05 02 59.00	Umbria settentrionale (PG)	709	7
3-4	1984 05 07 17 50	Monti della Meta (IS)	912	8
4	1986 06 22 14 07 51.16	Costa anconetana	20	5



Intensity	Year Mo Da Ho Mi Se	Area dei maggiori effetti	NMDP	Io
3	1986 10 13 05 10 00.31	Monti Sibillini (AP)	322	5-6
4	1987 07 03 10 21 57.64	Costa Marchigiana	359	7
3	1987 09 04 16 42 49.60	Costa Marchigiana	75	6
3	1987 09 10 13 24 23.24	Costa Marchigiana	21	
2-3	1997 09 03 22 07 29.70	Appennino umbro-marchigiano (PG)	62	6
4-5	1997 09 26 00 33 12.88	Appennino umbro-marchigiano (PG)	760	7-8
4-5	1997 09 26 09 40 26.60	Appennino umbro-marchigiano (PG)	869	8-9
4-5	1997 10 03 08 55 22.07	Appennino umbro-marchigiano (PG)	490	
4-5	1997 10 06 23 24 53.29	Appennino umbro-marchigiano (PG)	437	
4	1997 10 14 15 23 10.64	Valnerina (PG)	786	
4-5	1998 04 05 15 52 21.01	Appennino umbro-marchigiano	395	
4-5	2006 04 10 19 03 36.67	Maceratese	211	5
4	2006 10 21 07 04 10.01	Anconetano	287	5
4	2009 09 20 03 50 17	Maceratese	2441	5
	2009 12 12 18 51 20	Costa anconetana	493	4
3	2013 06 13 05 44 54	Costa anconetana	568	4
4	2013 07 21 01 32 24	Costa anconetana	3707	5 -6
3-4	2013 07 21 03 07 24	Costa anconetana	633	4-5
4	2013 08 22 06 44 51	Costa anconetana	1397	4-5

Tabella 2: storia sismica di Ancona estratta da DBM15 fino al 2006, dal CNT dal 2007. Intensity= intensità locale (F= terremoto solo avvertito). NMDP= numero di osservazioni macrosismiche. Io= intensità epicentrale.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 33 DI 55

4.2.2 Inquadramento amministrativo e Normativa sismica

Il campo di Calipso è a circa 35 km dalla costa; il comune più vicino è quello di Ancona, alla cui normativa sismica si fa riferimento.

In Fig. 18 viene riportata la classificazione delle zone sismiche nelle Marche come normato dall'Ordinanza della Presidenza del Consiglio 3274/03 s.m.i. e ratificato dalla Regione Marche con Delibera della Giunta regionale n.1046 29/07/2003. Questa figura è messa a confronto con la mappa di pericolosità sismica (MPS04) elaborata da INGV (Ordinanza PCM 28/04/2006 n. 3519, All. 1b), espressa in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi (Fig. 19).

Per determinare la classificazione delle Marche sono state utilizzate le stesse informazioni riportate nei capitoli precedenti (cataloghi storici macrosismici e strumentali e informazioni geologiche-strutturali): la maggior parte dei comuni delle Marche presentano una classificazione 2 – rischio medio-alto, in quanto coinvolti nella significativa attività sismica dell'Appennino Umbro-Marchigiano e in quella meno intensa sulla costa.



REGIONE MARCHE

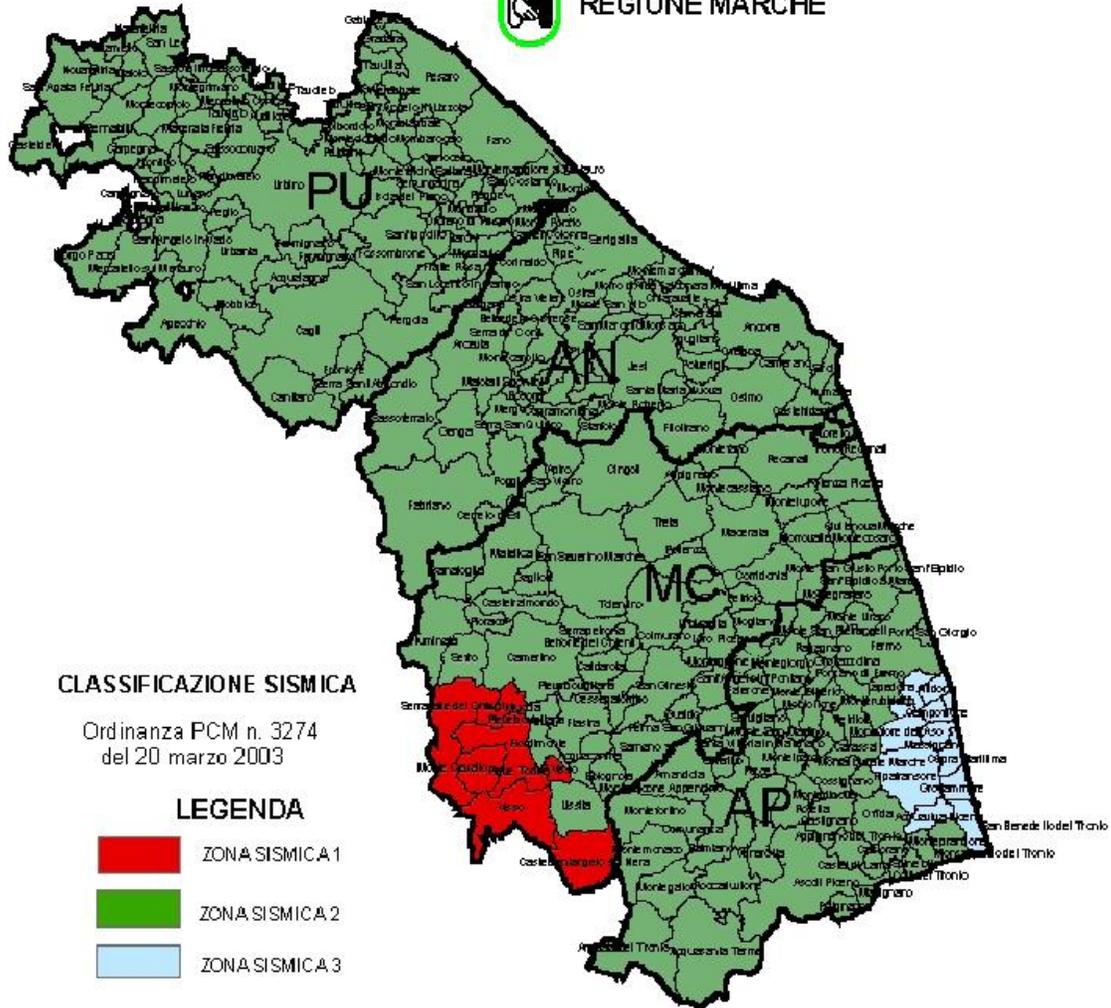


Fig. 18: classificazione sismica delle Marche (classificazione 1° zona: ad altissimo rischio).

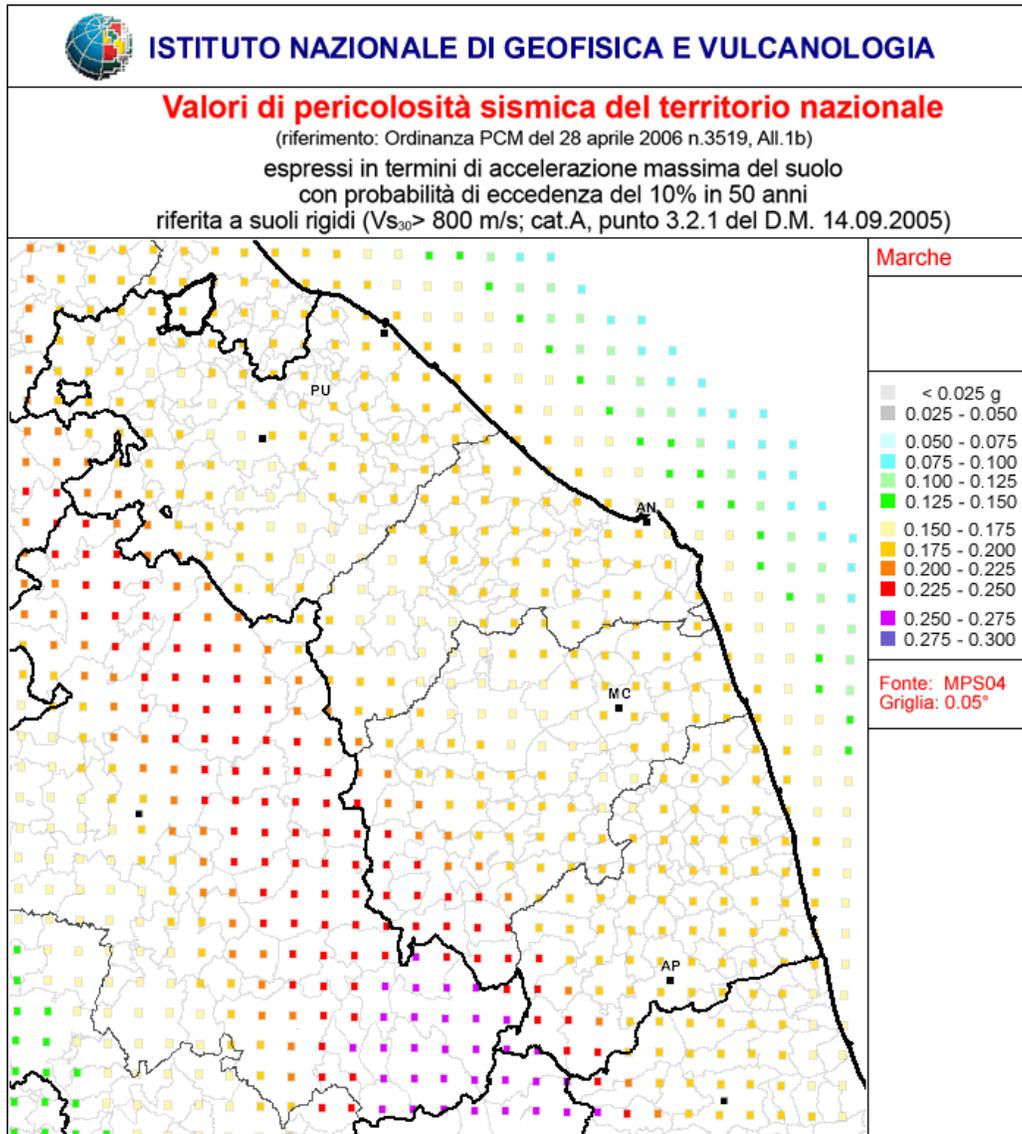


Fig. 19: valori di pericolosità sismica delle Marche (MPS04) origine INGV.

4.2.3 Analisi Statistiche

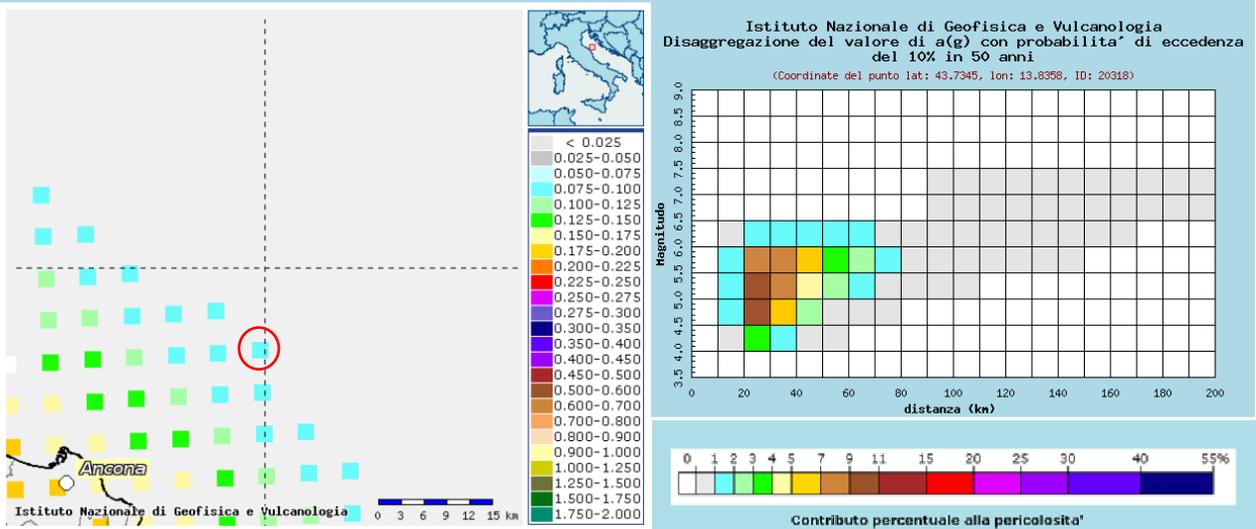
In Fig. 20 sono evidenziati i valori di pericolosità sismica disponibili vicino al campo di Calipso e la probabilità di un evento forte in zona. In Fig. 20A viene riportata la risposta massima in accelerazione prevista, riferita a suoli rigidi e pianeggianti: il campo di Calipso è al di fuori dell'area di analisi, ma si può osservare che i valori di accelerazione previsti diminuiscono dalla costa verso il mare e il valore più vicino è di 0.075 g (colore azzurro



chiaro, intervallo 0.050-0.075 g), con probabilità di superamento di questo valore del 10% in 50 anni. Questa informazione indica quanto si può prevedere essere forte il risentimento causato da terremoti in corrispondenza del sito di interesse, indipendentemente che gli epicentri siano vicini o lontani.

La Fig. 20B permette di valutare il contributo di diverse sorgenti sismogenetiche a distanza R capaci di generare terremoti di magnitudo M. In altre parole fornisce il terremoto che domina lo scenario di pericolosità (terremoto di scenario), inteso come l'evento di magnitudo M a distanza R dal sito oggetto di studio che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica del sito stesso (Spallarossa e Barani, 2007). Per il punto più vicino elaborabile (cerchio rosso nella figura A) il contributo più alto (15%) è per un terremoto di magnitudo compresa tra M=4.5 e 5.5 ad una distanza di 20 - 30 km: a tale distanza ritroviamo i sismi dell'off-shore di Monte Conero. Correggendo per la reale posizione dei pozzi le distanze in questione devono essere aumentate di circa 10 km.

Mappe interattive di pericolosità



A

B

Fig. 20: A) pericolosità sismica nell'area del campo di Calipso, punto di incrocio del reticolo nero, B) contributo percentuale alla pericolosità del punto più vicino a Calipso elaborato (cerchio rosso). (da INGV: dati on-line della pericolosità sismica in Italia).



Si vuol sottolineare che le informazioni di accelerazione previste sono calcolate per suoli rigidi (velocità delle onde S a 30 m di profondità = 800 m/s), ma che tali valori devono essere ulteriormente corretti per situazioni diverse (D.M. 17/01/2018).

Le caratteristiche litologiche dell'area presa in considerazione sono ben lontane da una situazione di rigidità, perché il campo è in mare su depositi alluvionali saturi d'acqua.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 38 DI 55

5 Sismicità indotta da attività petrolifere

5.1 Inquadramento generale

La letteratura sismologica utilizza comunemente i termini "indotto" e "innescato" per descrivere i terremoti causati da azioni umane. In alcune pubblicazioni entrambi i termini sono utilizzati come sinonimi; in altre, assumono significati diversi:

- terremoti "indotti" sono eventi in cui le attività antropiche sono responsabili della gran parte delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità,
- terremoti "innescati" sono quelli in cui le attività antropiche sono responsabili solo di una minima frazione delle variazioni del campo di stress tettonico preesistente che genera la sismicità, determinando il verificarsi del terremoto prima del suo accadimento naturale (McGarr et al., 2002).

Per semplicità, nel seguito si utilizzeranno i termini come sinonimi.

In letteratura esiste un'ampia trattazione dell'argomento legato alle estrazioni di idrocarburi, con numerosi lavori che hanno analizzato la casistica per individuare quali siano le situazioni più frequenti in cui si abbia un'attività indotta, quali i possibili meccanismi fisici che la determinano, quali le azioni preventive che possono essere messe in atto (ad es. Grasso, 1992; Suckale, 2009; The National Research Council, 2013).

In questi lavori, che hanno fatto una sintesi di quanto presente in letteratura sulla sismicità indotta nelle vicinanze di campi di idrocarburi, sono riportati circa un'ottantina di casi in cui sono presenti sismi con Magnitudo > 0. Nel testo del National Research Council (2013), sono citati i casi per estrazione di olio e gas (38), per attività con iniezione d'acqua (38) e per fratturazione idraulica in shale gas (2). Nel presentare l'elenco gli autori sottolineano che non necessariamente la sismicità registrata vicino ai giacimenti di idrocarburi elencati è di tipo indotto. Per alcuni casi è generalmente riconosciuta una connessione (es. Rangely in Colorado, Lacq in Francia), mentre per altri (es. Coalinga, Kettleman, Montebello, in California) la questione è controversa o la relazione causa/effetto è addirittura improbabile.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 39 DI 55

5.2 Cause d'insacco della sismicità legate all'attività estrattiva

Per quanto riguarda l'estrazione di idrocarburi dal sottosuolo i meccanismi riconosciuti in letteratura che possono innescare un evento sismico sono legati principalmente alla variazione dello sforzo di Coulomb; questa variazione può verificarsi a seguito di:

- Iniezione di fluidi;
- Fratturazione idraulica (fracking);
- Effetti poro-elastici legati all'estrazione di fluidi;
- Disequilibrio isostatico indotto dalla estrazione di quantità di fluidi.

5.2.1 Iniezione di fluidi

È noto fin dagli anni '60 che i terremoti possono essere indotti da attività di iniezione di fluidi (Hsieh & Bredehoeft, 1981). Questo avviene perché l'iniezione riduce lo sforzo effettivo: il fluido iniettato penetra all'interno di fratture preesistenti e sostiene quella parte dello sforzo normale che corrisponde alla pressione del fluido. Quindi, lo sforzo normale effettivo è ridotto e, poiché un fluido non ha resistenza al taglio, la resistenza allo scivolamento è diminuita. Se la frattura è soggetta a uno sforzo di taglio maggiore del prodotto dello sforzo normale effettivo per il coefficiente d'attrito, la roccia scorrerà e si genera un terremoto.

In ambito petrolifero l'iniezione di fluidi può avvenire per diverse ragioni, ma in ogni caso sempre con lo scopo di mantenere integro il reservoir:

- 1) Per smaltire l'acqua di strato presente naturalmente nelle rocce e prodotta insieme agli idrocarburi.
- 2) Per mantenere la pressione del giacimento e ottimizzare la produzione.
- 3) Per sostituire i fluidi estratti e prolungare la vita produttiva di campi in esaurimento.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 40 DI 55

5.2.2 Fratturazione idraulica (fracking)

Diverso è il caso delle fratturazioni idrauliche (fracking), durante le quali i fluidi ad alta pressione sono iniettati nel giacimento proprio con lo scopo di fratturare la roccia e creare i passaggi che permettono il movimento degli idrocarburi in esse contenuti. Tale tecnica si è diffusa nei giacimenti non convenzionali statunitensi, in cui le rocce di scisto (shale) fungono sia da sorgente (rocce madri) sia da serbatoio (rocce reservoir) e sono praticamente impermeabili. In tale contesto, gli idrocarburi contenuti non possono essere prodotti perché non possono muoversi verso il pozzo. Scopo della fratturazione è quindi di creare una rete di fratture che permettano ai fluidi di mobilizzarsi e raggiungere il pozzo. La fratturazione avviene in modo controllato, con l'attivazione di monitoraggi sismici, per ottimizzare il trattamento e per evitare che le fratture si propaghino al di fuori delle rocce reservoir, il che comporterebbe l'arrivo al pozzo dell'acqua di strato e quindi una perdita di capacità produttiva del pozzo.

5.2.3 Effetti poro elastici legati all'estrazione di fluidi

Usando la teoria della poro-elasticità, Segall (1985, 1989) mostra che la rimozione di fluidi da una formazione reservoir provoca delle variazioni volumetriche che indurranno sforzi direttamente nelle regioni circostanti il reservoir stesso. Segall (1989, 1992) e Grasso (1992) suggeriscono che il meccanismo potrebbe coinvolgere numerosi esempi di aree sismiche circostanti o al di sotto di aree petrolifere nel mondo.

Il meccanismo dell'estrazione di fluidi causa un decremento della pressione di poro ed una conseguente contrazione del reservoir con relativa subsidenza associata. Se il reservoir è accoppiato elasticamente con le rocce circostanti, questa contrazione genera il trasferimento di stress poro-elastico alle aree adiacenti. Nel caso in cui in queste aree siano presenti faglie che non permettono il riequilibrio della pressione attraverso esse, sulla faglia si crea uno stress differenziale il quale può accumularsi inducendo lo sviluppo di terremoti.

Il fenomeno richiede che entrino in gioco grandi volumi netti di produzione per ottenere anche solo piccoli cambiamenti nello stato di stress prossimo al reservoir. Sia Grasso (1992) che Segall (1992) concludono entrambi che questo meccanismo può essere efficace

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 41 DI 55

nell'indurre terremoti solo se la zona è già prossima allo stress critico necessario per generare il terremoto.

La sismicità tende a svilupparsi nella zona del giacimento, entro circa 5 km sopra e sotto il reservoir, con $M \leq 5$ e con ritardo temporale variabile tra i 5 e i 20 anni dall'inizio della produzione.

Le caratteristiche principali dei campi esaminati sono le seguenti:

- Una subsidenza totale elevata, anche dell'ordine dei 9 m (*Wilmington-California*, *Ekofisk-Norvegia*) e comunque superiore a molte decine di centimetri.
- La geologia mostra la presenza di formazioni competenti al di sopra o al di sotto del reservoir (*Lacq-Francia* - carbonati; *Ekofisk-Norvegia* - gessi; *Fashion-Texas* - carbonati);
- I giacimenti hanno dimensioni e produzioni notevoli (*Groningen-Olanda*, circa 1200 km² e 2900 Gm³ di gas; *Ekofisk-Norvegia*, circa 50 km² con 1.1 Gm³ di olio e 300 Gm³ di gas; *Lacq-Francia*, circa 160 km² e 250 Gm³ di gas).

5.2.4 Disequilibrio isostatico indotto dalla estrazione di fluidi

Il meccanismo del disequilibrio isostatico è stato proposto da McGarr (1991). L'idea alla base è che l'estrazione di fluidi da un giacimento produca la rimozione di una massa che genera un assestamento isostatico che a sua volta può indurre un evento sismico.

I casi esaminati nella letteratura contemplano rimozioni di massa dell'ordine di $1-3 \times 10^{11}$ kg (Fig. 21). Appare quindi evidente che i possibili effetti dovuti a disequilibrio isostatico sono riferibili solo a variazioni di massa ingenti, legate a giacimenti di grandi dimensioni.



TABLE I
SEISMIC DEFORMATION AND LIQUID EXTRACTION FROM OIL FIELDS

Earthquake Sequence	Oil Field	M_0	ΣM_0	Net Liquid	Δm	γ	$\frac{2\mu\Delta m\gamma}{\rho_c}$	$M_0/\frac{2\mu\Delta m\gamma}{\rho_c}$	$\Sigma M_0/\frac{2\mu\Delta m\gamma}{\rho_c}$
		N-m	N-m	Removed m ³ *	kg		N-m		
Coalinga 1983	Coalinga	3.95×10^{18}	5.36×10^{18}	$2.7 \times 10^{8*}$	2.7×10^{11}	0.69	4.14×10^{18}	0.95	1.29
Kettleman N. Dome 1985	Kettleman N. Dome	$1.7 \times 10^{18\dagger}$	1.74×10^{18}	$1.23 \times 10^{8\dagger}$	1.23×10^{11}	0.60	1.62×10^{18}	1.05	1.07
Whittier Narrows 1987	Montebello	$1.0 \times 10^{18§}$	$1.13 \times 10^{18¶}$	$1.35 \times 10^{8‡}$	1.35×10^{11}	0.38	1.14×10^{18}	0.88	0.99

*From Segall (1985).

†Very broadband estimate by Ekström (1987).

‡Conservation Committee of California Oil Producers (1983-1987); California Division of Oil and Gas (1927-1987).

§Hauksson *et al.* (1988).

¶Hauksson and Jones (1989).

* Net liquid produced is given by: oil + water produced – water injected. In the case of the Montebello field, the total water produced was estimated from California Division of Oil and Gas statistics indicating the fraction of water in the annual produced liquid for the years 1924 to 1987.

Fig. 21: tabella riassuntiva dei volumi estratti di liquidi per i campi riportati da McGarr (1991).

5.3 La situazione italiana

In Italia il fenomeno della sismicità indotta ha avuto risalto pubblico a seguito della sequenza di terremoti iniziatisi in Emilia Romagna nel Maggio 2012 nell'area ferrarese e modenese, per i quali era stata ipotizzata una possibile causa nelle attività petrolifere e geotermiche presenti nell'area. A questo proposito, è opportuno ricordare l'evoluzione spazio-temporale degli eventi con il sisma del 20 Maggio che ha avuto epicentro a 20 km dal campo a olio di Cavone (terremoto di Finale Emilia), e quello del 29 Maggio che è avvenuto proprio nella struttura sotto il campo di Cavone (terremoto di Mirandola).

Per indagare l'esistenza di una correlazione tra attività estrattive e la sequenza sismica, su richiesta del Presidente della Regione Emilia-Romagna, nel Dicembre 2012 il Capo della Protezione Civile istituì la Commissione ICHESE (International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia region).

Nel seguito si fa riferimento al rapporto finale della Commissione nell'originale in Inglese.

Le conclusioni della Commissione ICHESE hanno avuto vasta risonanza pubblica quasi unicamente per la frase di seguito riportata (in Italiano nel rapporto):

“...Lo studio effettuato non ha trovato evidenze che possano associare la sequenze sismica del maggio 2012 in Emilia alle attività operative svolte nei campi di Spilamberto, Recovato, Minerbio e Casaglia, mentre non può essere escluso che le attività effettuate

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 43 DI 55

nella Concessione di Mirandola (Cavone) abbiano potuto contribuire a innescare la sequenza." (da: *Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region*, 2014, pag. 195).

Purtroppo, tale affermazione risulta incoerente con molte delle analisi presentate nel rapporto stesso e si fonda solo su una presunta correlazione statistica tra l'aumento, avvenuto circa un anno prima, dell'attività di estrazione/iniezione nel giacimento di Cavone da un lato e l'attività sismica della scossa principale del 20 Maggio dall'altro (ICHESE, 2014, pag. 184). La stessa Commissione sembra rendersi conto della debolezza dell'argomento in quanto, a pagina 186 del rapporto, esprime la necessità di sviluppare un modello fisico che permetta di supportare i risultati statistici.

Al contrario, all'interno del rapporto lo studio geologico-strutturale dell'area conclude che non c'è connessione idraulica tra i volumi interessati dai terremoti del 20 Maggio e del 29 Maggio (ICHESE, 2014, pag. 132).

Inoltre, anche lo studio geomeccanico indica che l'evento del 20 Maggio è fuori dall'area d'influenza del giacimento di Cavone (ICHESE, 2014, pag. 151).

Entrambi i risultati precedenti implicano che gli effetti delle attività svolte nel campo di Cavone non possono aver condizionato il volume di sottosuolo dove si è generato il terremoto del 20 Maggio.

Nonostante ciò, la commissione ICHESE ha ipotizzato, in modo piuttosto singolare e sulla base di un mero esercizio matematico, che le attività svolte nel giacimento di Cavone avrebbero innescato il sisma del 20 Maggio nel punto più lontano da Cavone, senza evidenze di altri eventi sismici nella zona intermedia e senza effetti sulla struttura di Cavone, la quale poi effettivamente ha ceduto, ma solo dopo 9 giorni e solo per l'azione della sequenza sismica in atto (come indicato nel rapporto) e non per l'attività del giacimento di Cavone.

A seguito delle conclusioni interlocutorie della Commissione ICHESE, il Ministero dello Sviluppo Economico, la Regione Emilia-Romagna, Assomineraria e la società Padana Energia (titolare del campo) hanno concordato un'attività di monitoraggio e ricerca al fine di



fornire una risposta esaustiva per il campo di Cavone, denominata “Laboratorio di monitoraggio Cavone” (<http://labcavone.it/>). Contrariamente alle speculazioni teoriche della commissione ICHESE, il progetto prevedeva non simulazioni numeriche ma la raccolta di una serie di misure dirette sul campo e nei pozzi del campo, per verificare la distribuzione del campo di stress. In particolare, il programma delle prove sperimentali ha consentito di raccogliere un numero esaustivo di informazioni che hanno confermato l'assenza sulle strutture geologiche circostanti di interferenze derivanti dall'attività di reiniezione, i cui effetti si esauriscono a meno di 500 m dal pozzo iniettore (Laboratorio Cavone, 2014).

Contemporaneamente, altri studi hanno confermato che i terremoti emiliani del 2012 non sono correlabili con l'attività estrattiva di idrocarburi e con quella di iniezione d'acqua nel giacimento di Cavone (Astiz et al., 2014 validato dall'INGV; Dahm et al., 2015; Juanes et al., 2016).

Quindi, alla luce delle risultanze sopra riportate, appare chiaro come le ipotesi conclusive della Commissione ICHESE siano state ampiamente confutate e attualmente non risulti più accettabile richiamare tale rapporto per sollevare generici dubbi circa la possibile correlazione tra attività estrattive e sismicità.

Invece, appare chiara la necessità di svolgere analisi più approfondite su tale tema, come ad esempio fatto da Mucciarelli et al., 2015. In tale studio, focalizzato per l'area dell'Emilia-Romagna, il confronto tra distribuzione della sismicità strumentale e la posizione dei campi a gas suggerisce l'assenza sia di apprezzabili attività sismiche naturali che di significativi fenomeni di sismicità legata alla produzione dei giacimenti. Infatti, si osserva che in corrispondenza delle faglie sismogenetiche individuali, responsabili dei forti sismi avvenuti negli ultimi secoli, sono presenti essenzialmente pozzi sterili. Ciò indicherebbe che l'integrità dei serbatoi sovrastanti è stata compromessa dall'attività delle sorgenti individuali. Invece, buona parte dei pozzi produttivi sono in corrispondenza o di zone prive di sorgenti sismogenetiche o di zone con faglie sismogenetiche composite, ossia regioni contenenti un numero imprecisato di sorgenti sismogenetiche allineate che non possono essere individuate singolarmente. Esse non sono associate ad uno specifico insieme di terremoti o

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 45 DI 55

ad una distribuzione di terremoti, ma indicano un'area di possibile deformazione basata su dati geologici, geofisici e su vincoli storici: si tratta di strutture piccole che non sarebbero in grado di compromettere i giacimenti sovrastanti.

Un ultimo punto da considerare riguarda la tecnica del fracking: tale attività non ha ragione di essere in Italia, in quanto le caratteristiche sedimentologiche e petrofisiche delle rocce madri nel contesto geologico italiano non permettono l'applicazione della tecnica del fracking. La tecnica è inoltre esplicitamente vietata nell'Art. 38 - comma 11-quater del decreto legge n. 133/2014 (Sblocca Italia).

5.4 Considerazioni relative al campo di Calipso

Per il campo di Calipso è possibile valutare la possibilità di induzione di attività sismica tenendo presente la sismicità naturale illustrata nei paragrafi precedenti, le caratteristiche del giacimento e i parametri dello sviluppo produttivo previsto.

5.4.1 Sismicità regionale e campi idrocarburi

Il confronto tra la distribuzione epicentrale della sismicità strumentale e la posizione dei campi a gas lungo l'offshore marchigiano (Fig. 22), suggerisce l'assenza sia di apprezzabili attività sismiche naturali sia di fenomeni di sismicità legata alla produzione dei giacimenti nell'area, in accordo con le conclusioni di Mucciarelli et al., 2015.

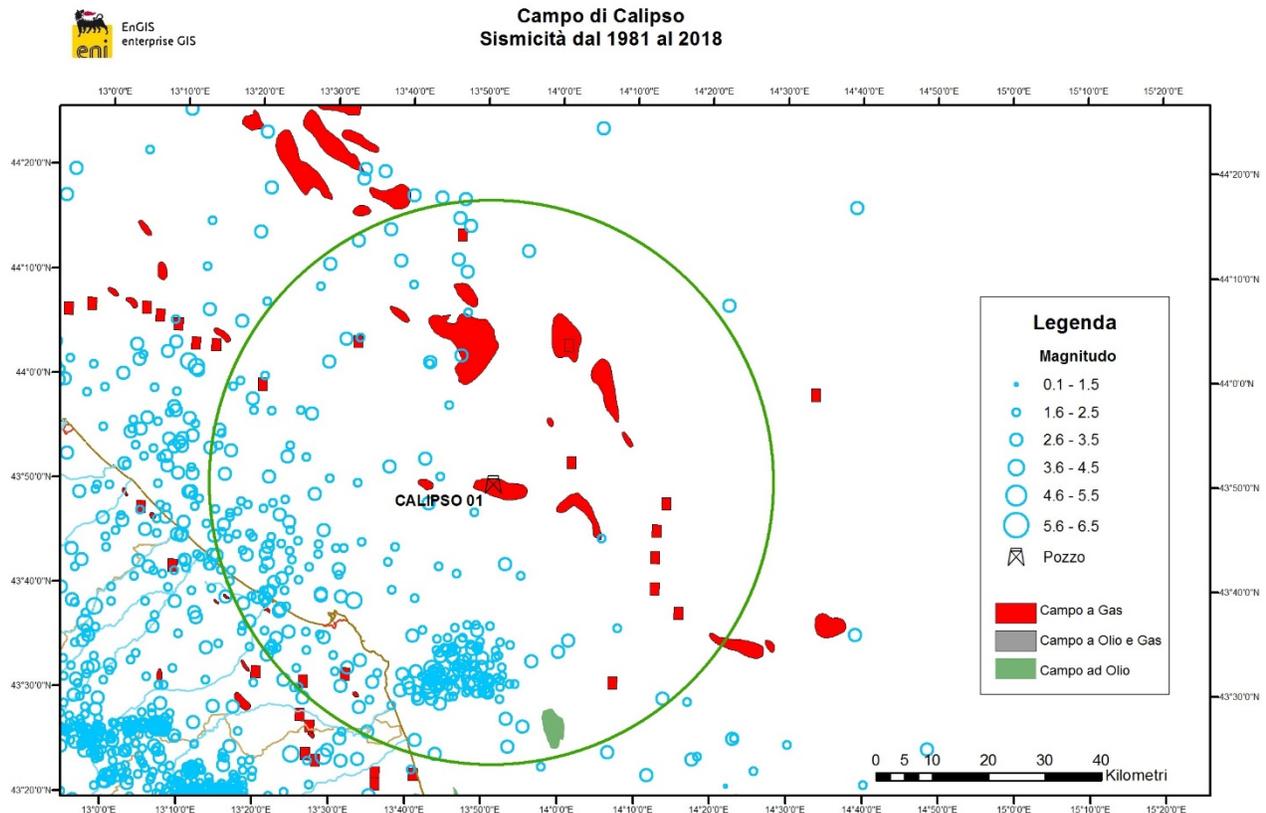


Fig. 22: sismicità con magnitudo >2.5 e ubicazione dei giacimenti a gas.

5.4.2 Sismicità locale e campo di Calipso

Come già descritto nel paragrafo 3.2, la struttura del campo di Calipso è costituita da un anticlinale con asse principale orientato NW-SE, con chiusure per pendenza su tutti i lati. La struttura si è formata a causa del sollevamento del substrato carbonatico mesozoico-paleogenico, sbloccato da una faglia inversa frontale, ad andamento NW-SE (in Fig. 23 è riportata una linea sismica proprietaria). La successione marnosa oligo-miocenica, e soprattutto i sovrastanti depositi sabbioso-argillosi del Plio-Pleistocene, risultano solo piegati, ma non interessati da dislocazioni tettoniche. La successione torbiditica pleistocenica inferiore, con una struttura prevalentemente di tipo plicativo, si è deposta durante l'ultima fase di sollevamento del trend strutturale, andando in parte a suturare



l'anticlinale in via di formazione. I sovrastanti sistemi progradanti, del Pleistocene medio-superiore, a partire da circa 500 mila anni fa, non mostrano deformazioni plicative legate a sollevamenti del fronte strutturale, ed infine i depositi di piana deltizio-alluvionale di colmamento del bacino hanno un assetto piano-parallelo, sub-orizzontale, a testimonianza dell'assenza di deformazioni strutturali nel substrato (in Fig. 24 dettaglio della figura precedente). La debole inarcatura dei livelli a gas del campo può essere in buona parte attribuita alla compattazione differenziale rispetto ai due depocentri circostanti, non necessariamente a deformazione tettonica. Ciò suggerisce una sostanziale inattività del fronte di Calipso quantomeno negli ultimi 200-300 mila anni (durante le facies deltizio-fluviali della successione), con le attuali spinte appenniniche che si scaricano in gran parte nella catena affiorante, in particolare nella zona del M. Conero, e in quella sepolta nella zona offshore in prossimità della linea di costa.

Dalle informazioni del paragrafo 4.1.2 risulta che nell'area di Calipso la sismicità è generalmente localizzata nella successione carbonatica, più profonda di 5 km; il pozzo Clara Est 1, ubicato sullo stesso trend strutturale, pochi km ad est del campo di Calipso, ha intaccato i calcari argillosi della Scaglia a circa 2500 metri di profondità e il top della Maiolica a circa 3900 metri. Nelle Fig. 23 e Fig. 25 è indicata la posizione di un ipocentro su una sezione sismica in profondità e su una sezione geologica. La profondità di questo evento è stata determinata con una precisione superiore ad altri ipocentri più lontani dalle sezioni (dati sono desunti dal sito INGV). Gli scarsi eventi dell'area di Calipso hanno comunque magnitudo inferiori a 3 e profondità superiori a 5 km. Tali eventi sono ubicati nella serie mesozoica, o addirittura nel basamento, in un contesto geologico completamente diverso e distinto dal reservoir sabbioso pliocenico di Calipso. Inoltre, lo spesso intervallo di successione compreso tra la base dei reservoir e il top carbonati (oltre 1200 metri), costituito da marne ed argille oligo-mioceniche, impedisce connessioni idrauliche tra i due intervalli permeabili ed eventuali interferenze legate alla produzione del campo.

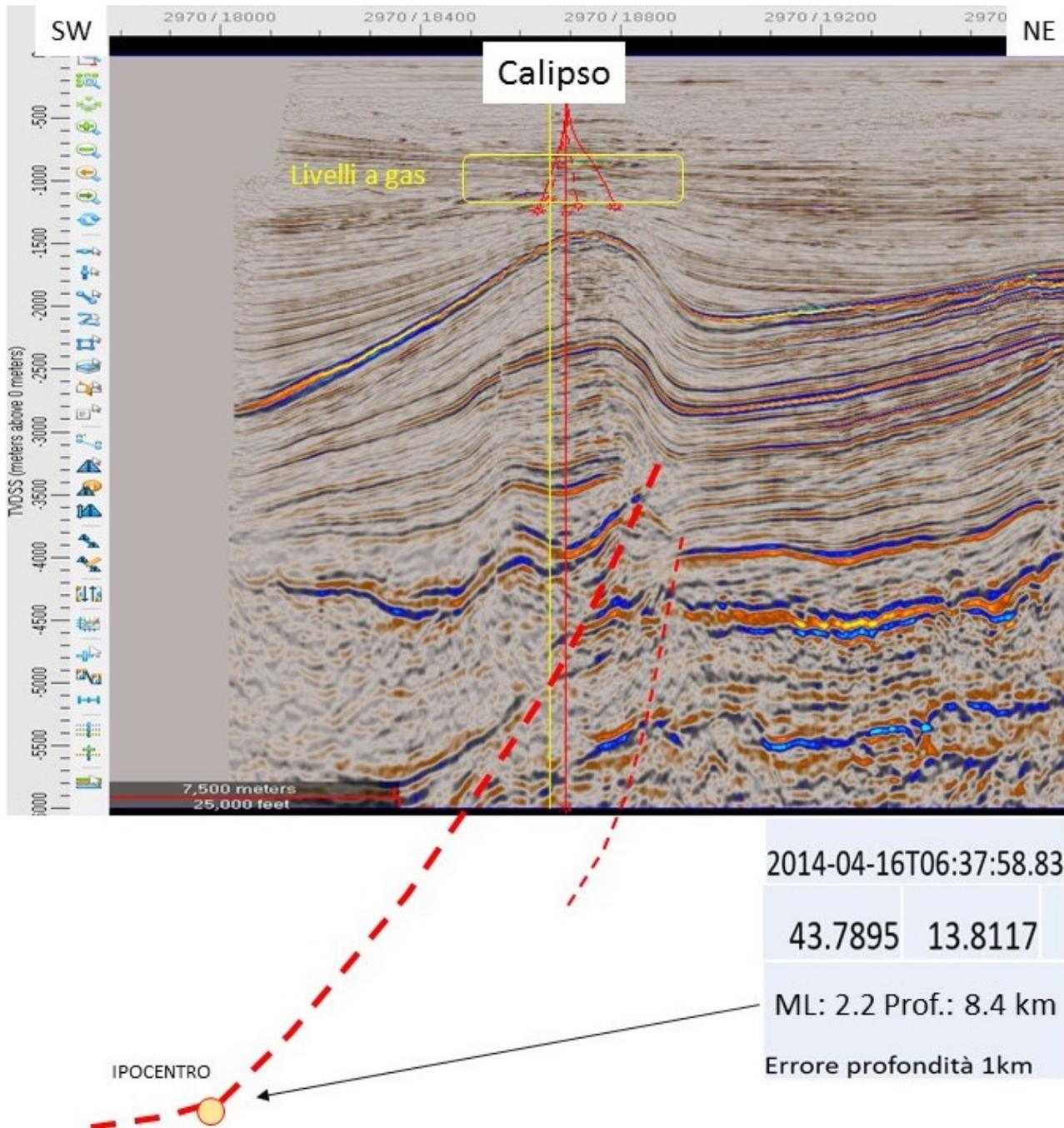


Fig. 23: struttura di Calipso. Linea sismica passante per la Piattaforma e interpretazione del sisma del 16 Aprile 2014.

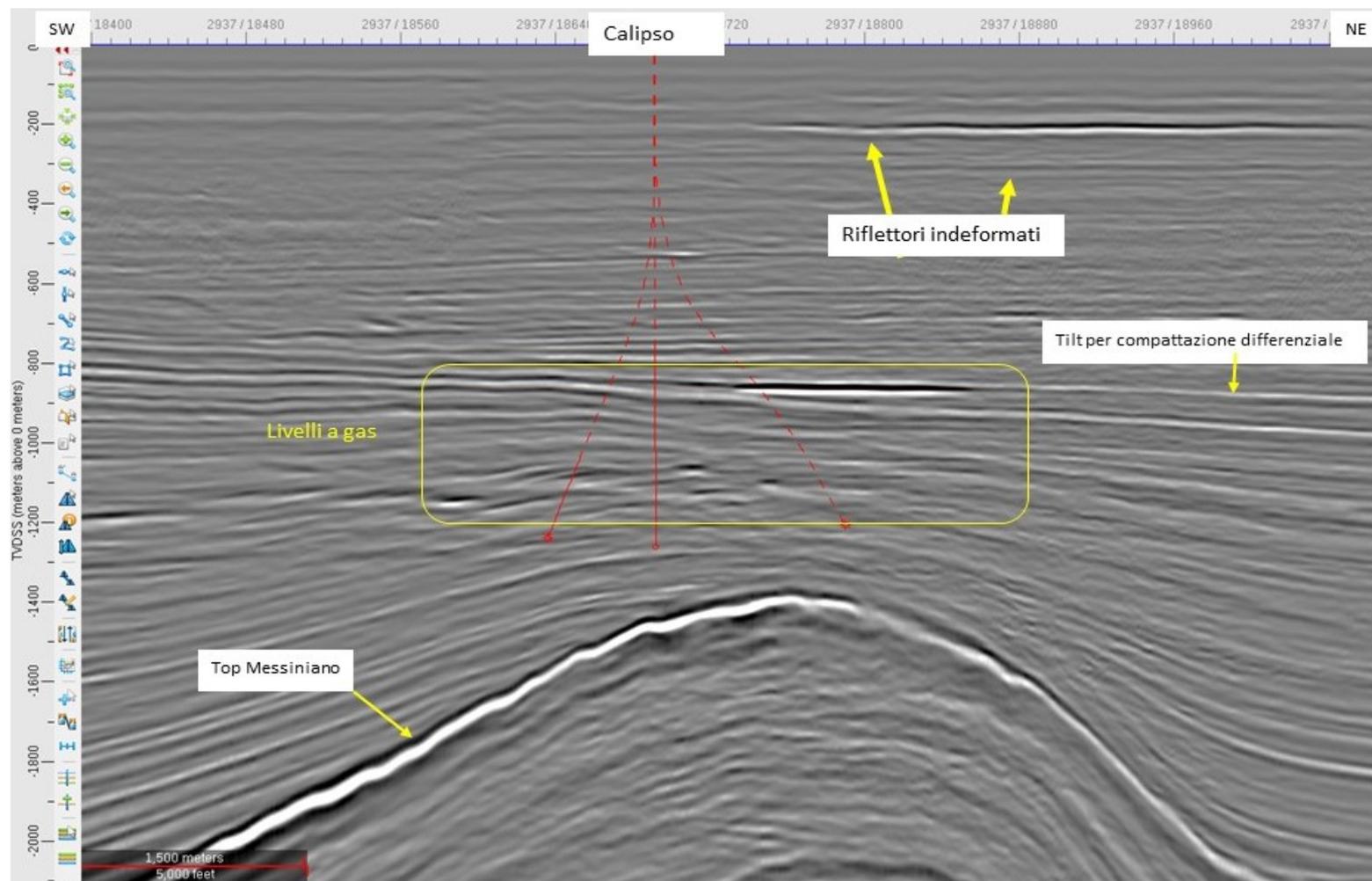


Fig. 24: linea sismica SW-NE, passante per il Campo di Calipso. Gli orizzonti del Pleistocene medio-superiore non risultano deformati da attività tettonica; ciò è indice di inattività delle faglie, quantomeno nelle ultime fasi glaciali.

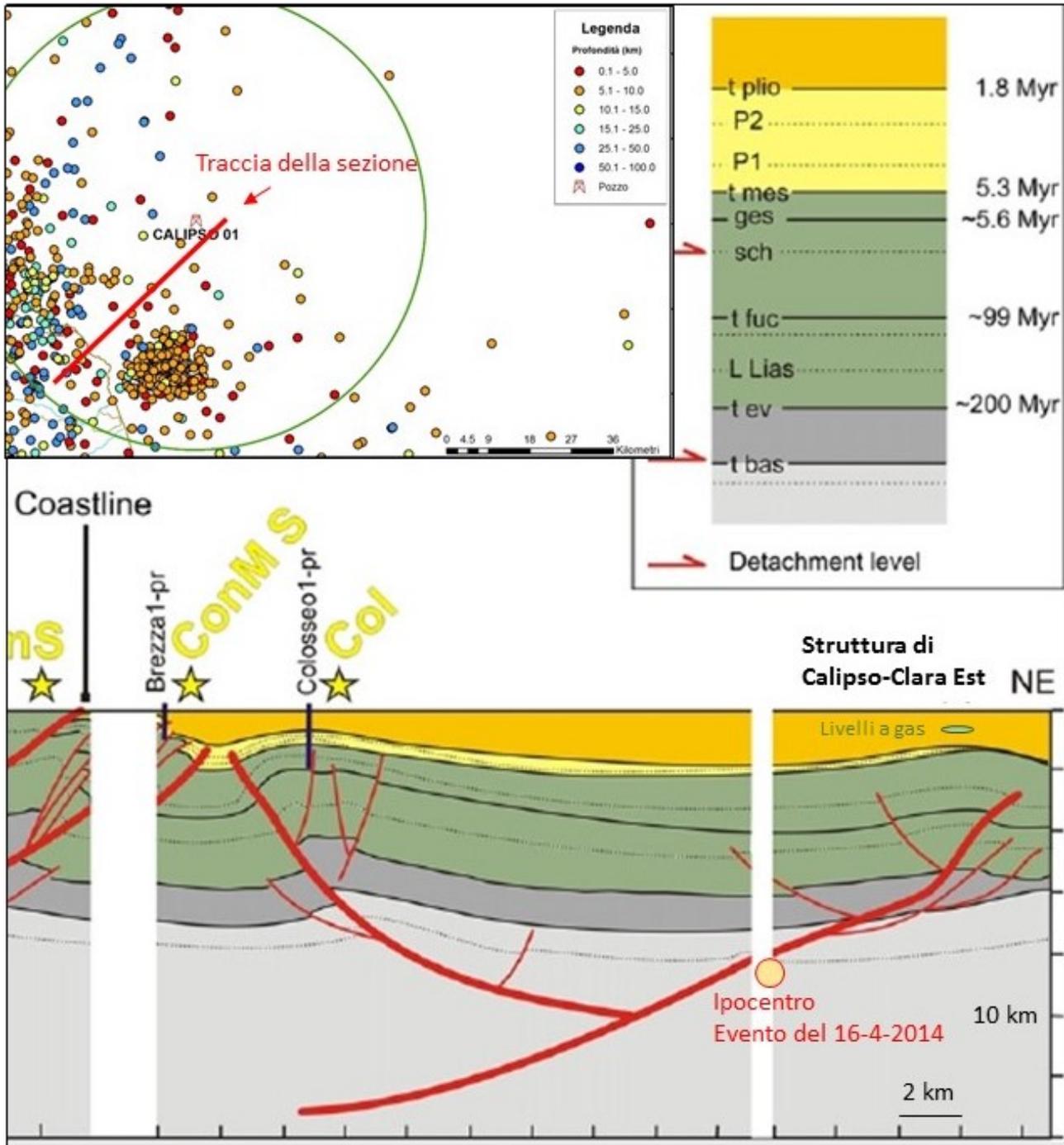


Fig. 25: sezione geologica regionale, tra Ancona e Calipso, con ubicazione del sisma del 16-4-2014 (ML 2.2) (modificata da Maesano et al., 2013).

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO "STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 51 DI 55

5.4.3 Iniezione di fluidi e fratturazione idraulica (fracking)

Lo sfruttamento del campo di Calipso non prevede l'iniezione di fluidi o attività di fratturazione idraulica.

5.4.4 Effetti poro-elastici legati all'estrazione di fluidi

Le caratteristiche del campo di Calipso e del pozzo in esame sono profondamente diverse da quelle evidenziate nei campi studiati da Segall e Grasso (vedi paragrafo 5.2.3):

- I risultati relativi al modello previsionale di subsidenza (inserito come Appendice nel SIA) mostrano nell'area del campo un incremento massimo, rispetto allo scenario senza il nuovo pozzo, di circa 27 cm a fine produzione.
- La struttura di Calipso è inserita nella successione silico-clastica pleistocenica dell'Adriatico, che ha litologie solamente argillose e sabbiose e non presenta nel suo intorno formazioni rigide su cui le variazioni poro-elastiche del reservoir possono sviluppare il loro effetto.
- La produzione attesa è di circa 280 M di Sm³, almeno tre ordini di grandezza inferiore ai casi considerati in letteratura (Fig. 26). Tale volume di produzione è molto modesto anche confrontato con i campi già sviluppati in Adriatico.

Per il campo di Calipso sono quindi da considerare estremamente improbabili effetti causati da variazioni poro-elastiche.

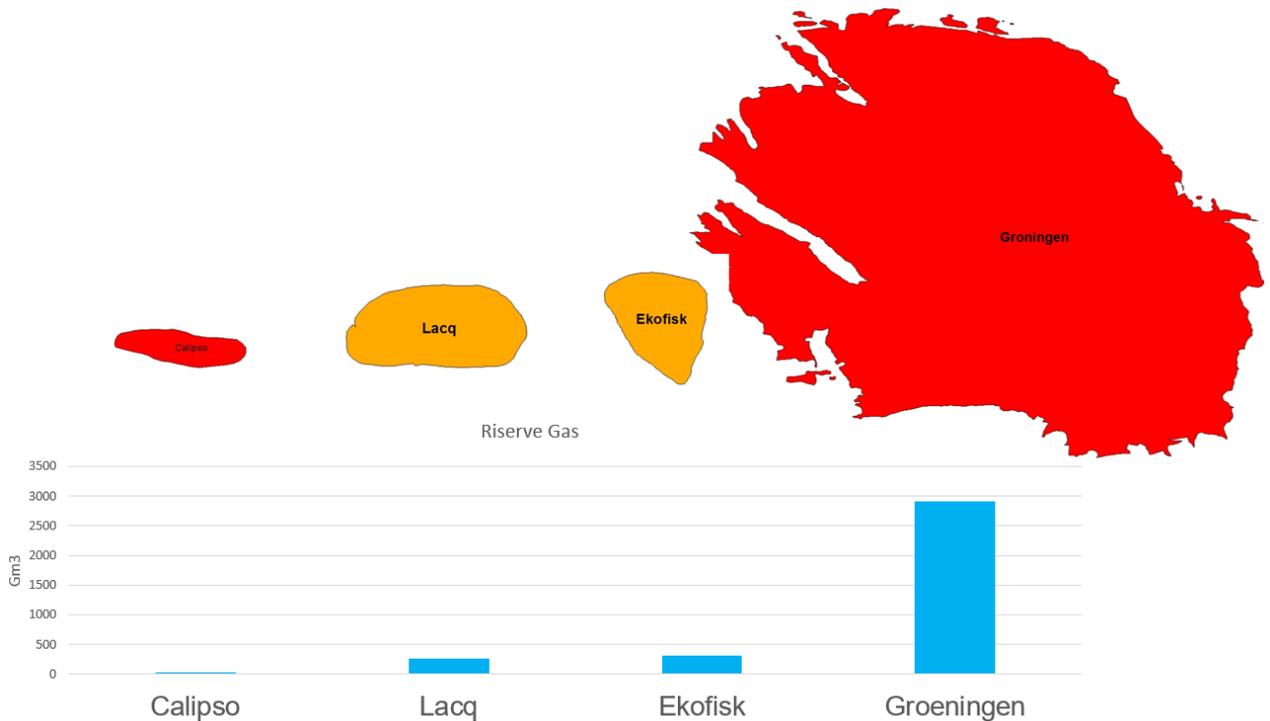


Fig. 26: rappresentazione in scala delle aree di alcuni campi in cui è stata osservata sismicità, confrontati con il campo di Calipso e istogramma delle rispettive produzioni.

5.4.5 Disequilibrio isostatico indotto dalla estrazione di fluidi

Questa teoria è difficilmente applicabile ai campi a gas italiani ed in particolare al caso di Calipso 5 Dir, la cui produzione porterebbe ad una rimozione di massa di 2.00×10^8 kg, valore di tre ordini di grandezza inferiore alle masse considerate nello studio di McGarr (1991). Anche considerando l'intero campo di Calipso, si avrebbe una rimozione di massa inferiore di almeno 2 ordini di grandezza rispetto a quanto indicato da McGarr.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 53 DI 55

6 Bibliografia

Astiz I., J.H.Dieterich, C.Frohlich, B.H. Hager, J.H. Shaw, 2014: *On the Potential for Induced Seismicity at the Cavone Oilfield: Analysis of Geological and Geophysical Data, and Geomechanical Modeling*,

(http://www.assominerariacavone.org/uploads/tappe_lavori/11/attachment/cavonereport_final_v03.pdf).

Dahm, T., Cesca, S., Hainzl, S., Braun, T., Krüger, F. (2015): *Discrimination between induced, triggered, and natural earthquakes close to hydrocarbon reservoirs: A probabilistic approach based on the modeling of depletion-induced stress changes and seismological source parameters*. - Journal of Geophysical Research, 120, 4, p. 2491- 2509.

Decreto Ministeriale (infrastrutture) 17 Gennaio 2018: *Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni* (G.U. n. 42 del 20 Febbraio 2018).

Delibera di Giunta Regionale Marche n. 1046 del 29.07.2003: *Indirizzi generali per la prima applicazione dell'Ord. P.C.M. n. 3274/2003. Individuazione e formazione dell'elenco delle zone sismiche nella Regione Marche* (BUR Marche n.79 del 04.09.2003).

DISS Working Group, 2018. *Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.2.1: A compilation of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy and surrounding areas*. <http://diss.rm.ingv.it/diss/>, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia; DOI:10.6092/INGV.IT-DISS3.2.1".

Grasso, J.R., 1992. *Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons*, Pure Appl. Geophys., 139 (3-4) 507-534.

Hsieh, P. A., and J. S. Bredehoeft (1981). *A reservoir analysis of the Denver earthquakes - a case study of induced seismicity*, J. Geophys. Res. 86, 903–920.

ICHESE, 2014: *Report on the Hydrocarbon Exploration and Seismicity in Emilia Region* (http://mappegis.regione.emiliaromagna.it/gstatico/documenti/ICHESE/ICHESE_Report.pdf).

Juanes, R., B. H. Hager, B. Jha, J. H. Shaw, A. Plesch, L. Astiz, J. H. Dieterich, C. Frohlich (2016). *Were the May 2012 Emilia-Romagna earthquakes induced? A coupled flowgeomechanics modeling assessment*. Geophysical Research Letters, 43(13), 6891-6897.

 Eni S.p.A. Exploration	RAPPORTO TECNICO		
	"STUDIO SISMO-TETTONICO CAMPO DI CALIPSO"		
	DOC. N° GEOM-2019006-MS-RAT-01	REV. 00	PAG. 54 DI 55

Laboratorio Cavone, 2014, *Risultati del programma di prova di interferenza/iniettività*, Giugno 2014, http://labcavone.it/documenti/27/risultati_del_programma_di_prova.pdf

Locati M., Camassi R., Rovida A., Ercolani E., Bernardini F., Castelli V., Caracciolo C.H., Tertulliani A., Rossi A., Azzaro R., D'Amico S., Conte S., Rocchetti E. (2016). *DBMI15, the 2015 version of the Italian Macroseismic Database*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>

Maesano F.E. , Toscani G. , Burrato P. , Mirabella F. , D'Ambrogi C. , Basili R. (2013) *Deriving thrust fault slip rates from geological modeling: examples from the Marche coastal and offshore contraction belt, Northern Apennines, Italy*, Mar. Petr. Geol., 42 , pp. 122-134, [10.1016/j.marpetgeo.2012.10.008](https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.10.008)

Mantovani, E., Viti, M., Babbucci, D., Tamburelli, C. and Vannucchi, A, 2014. *Assetto tettonico e potenzialità sismogenetica dell'Appennino Tosco-Umbro-Marchigiano*, Università di Siena, pp 179

https://www.dsfta.unisi.it/sites/st01/files/allegatiparagrafo/19-06-2014/assetto_tettonico_e_potenzialita_sismogenetica_appennino_tosco_umbro_marchigiano_parte-1.pdf;

https://www.dsfta.unisi.it/sites/st01/files/allegatiparagrafo/19-06-2014/assetto_tettonico_e_potenzialita_sismogenetica_appennino_tosco_umbro_marchigiano_parte-2.pdf

https://www.dsfta.unisi.it/sites/st01/files/allegatiparagrafo/19-06-2014/assetto_tettonico_e_potenzialita_sismogenetica_appennino_tosco_umbro_marchigiano_parte-2.pdf

[no_parte-2.pdf](https://www.dsfta.unisi.it/sites/st01/files/allegatiparagrafo/19-06-2014/assetto_tettonico_e_potenzialita_sismogenetica_appennino_tosco_umbro_marchigiano_parte-2.pdf)

McGarr, A., 1991. *On a possible connection between three major earthquakes in California and oil production*. Bull. Seismol. Soc. Amer., 81 (3): 948-970.

McGarr, A., D. Simpson, and L. Seeber (2002). *Case histories of induced and triggered seismicity*. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, Part A, W.H.K. Lee et al., eds., Academic Press, 647-661.

Mucciarelli M., F. Donda, and G. Valensise, 2015. *Earthquakes and depleted gas reservoirs: which comes first?* Nat. Hazards Earth Sys., 15, 2201-2208.

National Research Council. 2013. *Induced Seismicity Potential in Energy Technologies*. National Academies Press: Washington, DC. DOI: 10.17226/13355. <https://www.nap.edu/catalog/13355/induced-seismicity-potential-in-energy-technologies>

Ordinanza Presidente Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006. *Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle stesse zone*. G.U. n. 108 - 11 maggio 2006



Rovida A., Locati M., Camassi R., Lolli B., Gasperini P. (eds), 2016. *CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. doi:<http://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>

Segall, P., 1985. *Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of the 1983 Coalinga earthquake*, J. Geophys. Res, 90(B8), 6801-6016.

Segall, P., 1989. *Earthquake triggered by fluid extraction*, Geology 17, 942-946.

Segall, P., 1992. *Induced stresses due to the fluid extraction from axisymmetric reservoirs*, Pure Appl. Geophys., 138(3/4): 535-560

Suckale, J. 2009. *Induced seismicity in hydrocarbon fields*, Adv. Geophys., 51, 55-106,

Spallarossa D., Barani S., 2007. *Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε*. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D14, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>



Exploration

Via Emilia, 1 - 20097 San Donato Milanese (MI)

Tel. +39 02520.1

www.eni.it