Workshop

Idrocarburi e sismicità in Italia

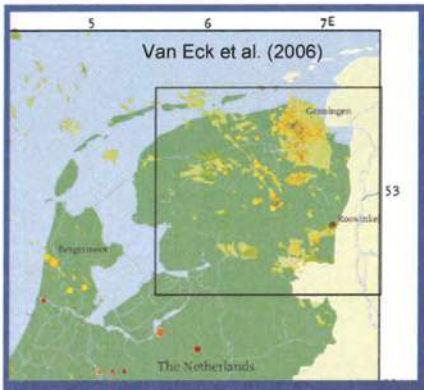
Roma, 12 novembre 2014

Giacimenti di idrocarburi e sismicità stimolata in Appennino settentrionale

Davide Scrocca

Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)



Introduzione

In alcuni contesti e in date condizioni, le operazioni connesse con la produzione di idrocarburi possono «stimolare» sismicità

- Processi capaci di stimolare sismicità in attività connesse con la produzione di idrocarburi
- Caratteristiche giacimenti idrocarburi in Appennino settentrionale
- Revisione critica dei casi si sismicità «stimolata» ipotizzati in Appennino settentrionale vs evidenze da cataloghi sismologici
- Considerazioni conclusive
- Replica con modifiche di precedenti interventi
  - Osservatorio Ambientale della Val d'Agri, Marsico Nuovo: http://www.osservatoriovaldagri.it/convegni/sismicita_indotta/Scrocca_sismicita_indotta.pdf.
  - Sala Consiliare di Ingegneria, Università di Brescia, 7 maggio 2014: http://www.associazionededonato.it/documenti/2014-05-07-rischio-sismico/2014-05-07-scrocca.pdf

Sismicità: Indotta vs Innescata

Definizione Sismicità da McGarr et al. (2002)

- **Sismicità Indotta** ("*Induced Seismicity*"): Le attività antropiche sono responsabili della gran parte delle variazioni del campo di stress che genera la sismicità
- **Sismicità Innescata** ("*Triggered Seismicity*"): 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
- **Sismicità Stimolata** ("Stimulated Seismicity"): Definizione generica che include sia la sismicità indotta che innescata
- In accordo con tale definizione le attività antropiche non sono in grado di "indurre" grandi e disastrosi eventi sismici ma possono invece "innescarli"

- Inoltre è opportuno tenere presente che:
  - Terremoti possono essere innescati da perturbazioni prodotte da varie cause naturali, tra cui anche il trasferimento di stress da terremoti avvenuti in aree contigue (e.g., evento del 29 maggio 2012 in Emilia, Ganas et al., 2012)
  - Strato crostale sismogenetico in uno stato prossimo a rottura quasi ovunque a causa del campo di stress naturale. Stress naturali di origine tettonica giocano un ruolo importante anche nel caso di eventi indotti da attività antropiche

Giacimenti vs Sismicità Stimolata

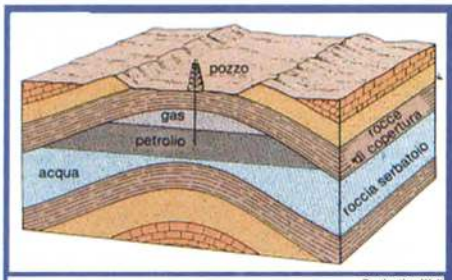
- Per almeno 70 casi è stata dimostrata, o ipotizzata, una relazione tra attività estrattive e sismicità (1 caso in Italia, Caviaga)
- Dataset probabilmente incompleto (da Grasso, 1992; Guha, 2000; Suckale, 2009)
- Casi documentati o ipotizzati sembrano distribuiti in modo non uniforme. Anche all'interno di uno stesso bacino petrolifero non tutti i giacimenti hanno lo stesso comportamento (e.g., Olanda)
- Magnitudo tipicamente ≤ 4.5-5. In alcuni casi (di controversa interpretazione) magnitudo sino a 6-7

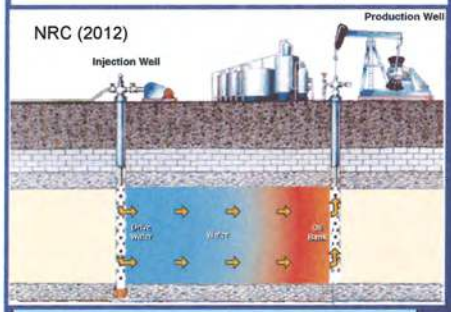
Suckale (2009)

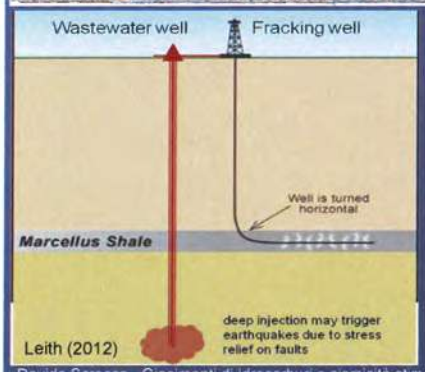
Hydrocarbon field	Country	Potential cause
Snipe Lake	Alberta, Canada	
Strachan	Alberta, Canada	extraction
Gobles	Appalachian, Canada	injection
Eaglehill/Eagle West	British Columbia, Canada	extraction
Shengli	Shandong Province, China	injection
Dan	North Sea, Denmark	extraction
Lacq	Aquitaine, France	extraction
Meillon	Aquitaine, France	extraction ?
Schlingen / Rotenburg	Rotliegendes, Germany	
Caviaga	Po Valley, Italy	
Umm Gudair	Kuwait	burning
Burgan	Kuwait	burning
Groningen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Roswinkel	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Bergermeer	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Hoogld	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Bergen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Annerveen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Appelscha	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Emmen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Dalen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Roden	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
VriesNoord	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Ureterp	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Emmen-Nw. A'Dam	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Schoonebeek	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
VriesCentraal	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Coevorden	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation
Ekofisk	North Sea, Norway	extraction
Valhall	North Sea, Norway	extraction
Visund	North Sea, Norway	various

Hydrocarbon field	Country	Potential cause
Shaahu	Oman	
Romashkino	Volga-Ural, Russia	injection
Novo-Elkhovskoye	Volga-Ural, Russia	
Starogroznenskoye	Russia	
Bavu-Gelyaz-Vishka	Russia	
Gudermes	North Caucasus, Russia	
Grozny	Tchetchny	
Big Escambia Creek	Alabama, USA	extraction ?
Little Rock	Alabama, USA	extraction ?
Starmont Creek	Alabama, USA	extraction ?
Coalinga	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Kettleman	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Montebello	California, USA	extraction/fault reactivation/ isostasy
Oxnard	California, USA	injection
Wilmington	California, USA	extraction
Rangely	Colorado, USA	injection
South Eugene Island	Louisiana, USA	injection
Hunt	Mississippi, USA	injection ?
Sleepy Hollow	Nebraska, USA	injection ?
Cimarex District	Oklahoma, USA	injection ?
Love County	Oklahoma, USA	injection ?
East Durant	Oklahoma, USA	injection ?
Gobles	Ontario, USA	injection
Apollo-Hendrick	Texas, USA	injection ?
Blue Ridge	Texas, USA	extraction/subsidence
Clinton	Texas, USA	extraction/subsidence
Cogdell Canyon Reef	Texas, USA	injection ?
Fashing	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Goose Creek	Texas, USA	extraction/subsidence
Imogene	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Kermit	Texas, USA	injection
Keystone	Texas, USA	
Mykawa	Texas, USA	extraction/subsidence
South-Houston	Texas, USA	extraction/subsidence
War-Wink	Texas, USA	extraction ?
Webster	Texas, USA	extraction/subsidence
Dollarhide	Texas/New Mexico, USA	injection ?
Gazli	Uzbekistan	erratic production/fault reactivation ?
Costa Oriental	Lake Maracaibo, Venezuela	extraction/subsidence

Attività Estrattiva

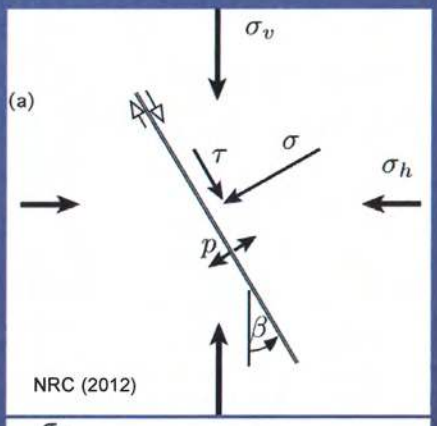


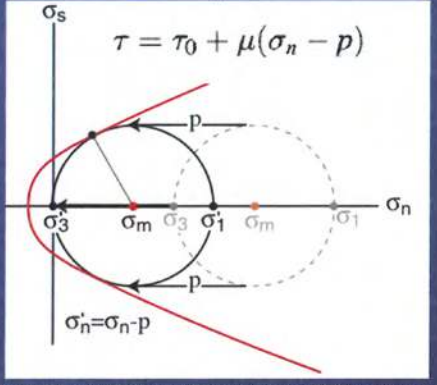




- Lo sfruttamento minerario di un giacimento convenzionale di idrocarburi comporta non solo l'estrazione di petrolio o metano ma anche, in diversi casi, la re-iniezione di fluidi nel sottosuolo
- Smaltimento dell'H2O prodotta insieme agli idrocarburi
- Recupero Secondario e Terziario (Enhanced) per sostenere pressioni nel giacimento e aumentare i fattori di recupero utilizza iniezione di acqua o di gas (e.g., CO2 che riduce inoltre la viscosità degli idrocarburi)
  - Pressioni e volumi di acqua sono solitamente gestiti entro livelli tali da mantenere il regime di pressioni al di sotto dei valori originari del giacimento
- Idro-fratturazione per aumentare le permeabilità della rocce serbatoio. Necessario distinguere:
  - "Fratturazione idraulica ad elevato volume" (fracking s.s. in USA per sfruttamento di Shale Gas, H2O ≥1000 m3 per fase di fratturazione; ≥ 10000 m3 per pozzo) con influenza su centinaia di metri. La sismicità più significativa è associata allo smaltimento in reservoir profondi delle acque utilizzate
  - "Idro-fratturazione convenzionale " (stimolazione tramite fluidi pressurizzati) in manutenzione di pozzi con raggio di azione dei metri (volumi H2O almeno 1 ordine di grandezza inferiori)

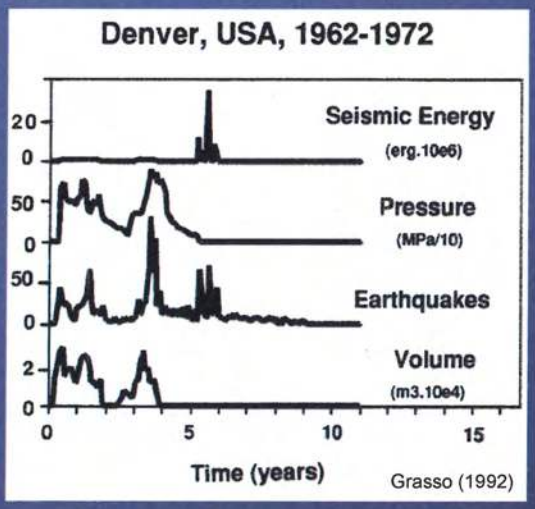
Iniezione di Fluidi





- L'iniezione di fluidi nel sottosuolo genera un aumento della pressione di poro (p) e, di conseguenza, una riduzione dello sforzo normale effettivo sui piani di faglia che vengono a trovarsi quindi in stato critico e si muovono sismicamente
- Esempio tipico Rangely Oil Field, Colorado USA (Raleigh et al.,1972; 1976). esperimento operato presso Rangely Oil Field, Colorado USA (Raleigh et al.,1972; 1976) con iniezione di acqua per progetto di "Secondary recovery" in cui è stato possibile attivare e disattivare sismicità controllando la pressione dei fluidi iniettati.
- In molti altri casi la modulazione dei volumi iniettati e delle pressioni di iniezione non è stata sufficiente per controllare l'evoluzione dei fenomeni sismici stimolati

Iniezione di Fluidi: Rocky Mountain Arsenal



Grasso (1992)

- Rocky Mountain Arsenal (Denver, USA), nel 1961 venne perforato un pozzo per smaltire acque contaminate (c. 30 m3/h).
- Primi 5 anni: buona correlazione tra volumi/pressioni e sismicità.
- Prosecuzione della sequenza sismica e alcuni eventi (con M c. 5-5.5), a distanza maggiore dal pozzo rispetto ai primi eventi, anche dopo l'interruzione dell'iniezione di fluidi (Healy et al., 1968; Grasso, 1992)

Risposta rapida: generalmente piccoli terremoti ($-2 \leq M \leq 3$) collegati con la fratturazione idraulica di ammassi rocciosi

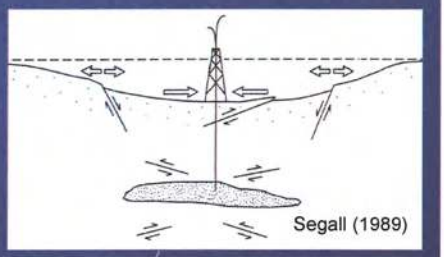
Risposta lenta: terremoti che possono raggiungere magnitudo sino a 5. Spiegati come il risultato della diffusione in profondità dell'onda di pressione generata dall'iniezione dei fluidi che causa lo scivolamento lungo faglie potenzialmente sismogeniche

Estrazione di Fluidi: Effetti Poroelastici

L'estrazione di fluidi causa un decremento della pressione di poro e una conseguente contrazione del reservoir, con relativa subsidenza

Poiché il reservoir è accoppiato elasticamente con le rocce circostanti, tale contrazione genera il trasferimento di stress poroelastico alle regioni adiacenti, inducendo lo sviluppo di terremoti (Segall, 1989; 1992)

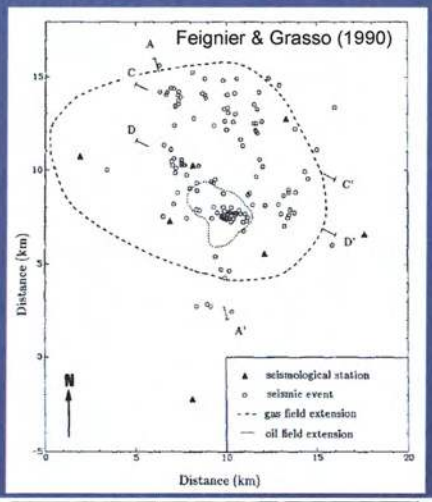
Sismicità tende a svilupparsi nella zona del giacimento (entro c. 5 km), sopra e sotto il reservoir, con $M \leq 5$ e con un ritardo temporale rispetto all'inizio dell'estrazione


Segall (1989)

Area or Field Country — Grasso (1992)	Strachan[a] Alberta	Fashing[a] Texas	Lacq[b] France	Grozny[c] Tchecheny	Assen[d] Netherlands	Groningen[d] Netherlands	Ekofisk[e] Norway	Dan[f] Denmark
Reservoir characteristics								
Size (km²)	25	10	150	70	50	900	130	24
Depth (km)	3–5	3.4	3.5	4.0	3.0	2.9	3.0	1.8
T (km)	0.1	0.05	0.25	0.4	0.2	0.15	0.2	0.15
Φ (%)	—	15	3	4	15	18	30	30
φ (mD)	—	13	0.5	—		$0.1–10^3$	$1–10^2$	0.1–1
μ (GPa)	—	—	23	—	10	10	0.07	—
v	—	—	0.25	—	0.25	0.26	0.3	(0.3)
α	—	—	0.25	—	0.9	0.9	1.0	(1.0)
Displacement and pressure histories at the onset of Eqs.								
Onset Prod. (year)	1971	1958	1959	1964	1972	1964	1973	1972
Onset Eqs. (year)	1976	1974	1969	1971	1986	1991	1982	1985
P_{ini} (MPa)	50	35	66	69	37	35	48	26
ΔP (MPa)	25	23	30	25	30	15	24	18
ΔH (m)	—	—	0.05	—	—	0.16	3.5	—
m_1	3.0	3.1	4.0	3.5	2.8	2.5	2.2	4.0
$\Delta\sigma_{max}$ (MPa)	0.25	0.1	0.6	0.7	0.5	0.2	0.4	0.45
m_2	3.4	3.4	4.2	4.1	2.8	2.5	3.4	4.0

Hydromechanical setting of earthquakes triggered by poroelastic stressing caused by hydrocarbon extraction. Average reservoir characteristics are defined as follows: T, thickness; ϕ, porosity; φ, matrix permeability; μ, shear modulus; v Poisson's ratio; α is a coefficient related to the bulk moduli of saturated rock (K) and the grains in the rock (K_s) by $\alpha = 1 - K/K_s$. Displacement and pressure history are defined by: the onset of production and the date of the first induced event; P_{ini}, the initial pressure in the reservoir; ΔP, the pressure drop at the onset of seismicity; pressure values are from the yearly bottom of well measurements, with a few bars of accuracy; ΔH is the maximum depth of the subsidence bowl; m_1 is the magnitude of the first reported induced event and m_2 is the maximum magnitude of induced events. $\Delta\sigma_{max}$, the order of magnitude of the induced stress at the onset of the seismicity, is estimated using the poroelastic stress model

Effetti Poroelastici: Lacq Gas Field



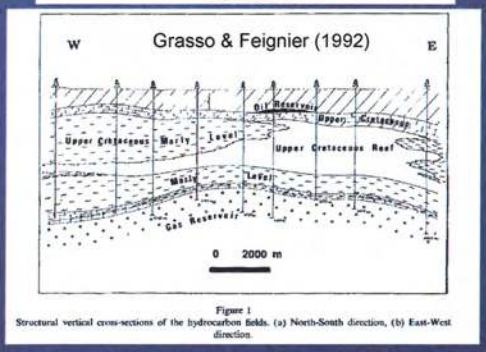
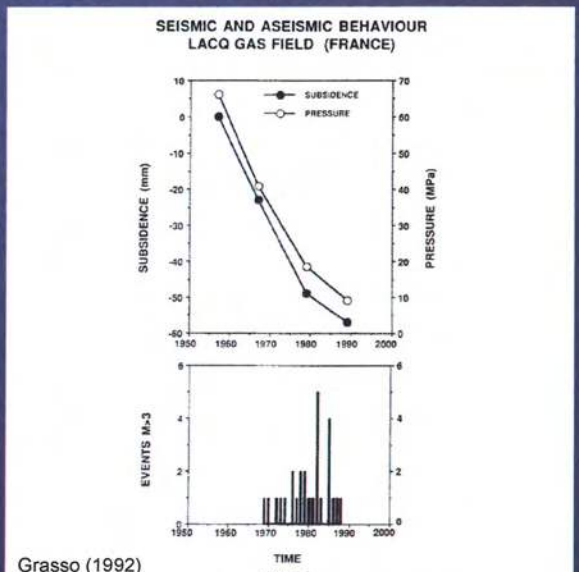


Figure 1
Structural vertical cross-sections of the hydrocarbon fields. (a) North-South direction, (b) East-West direction.

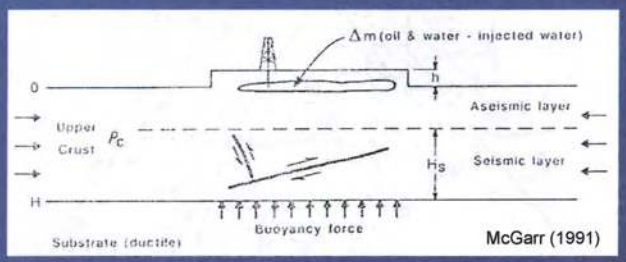
- Lacq Gas Field (Pyrenees, France)
- Sismicità dovuta ad effetti poroelastici sviluppata prevalentemente sopra al reservoir



Grasso (1992)

Figure 6
Seismic and aseismic deformation of the Lacq gas field (Pyrenees, France) as a function of pressure decrease within the gas reservoir.

Estrazione di Fluidi: Disequilibri Isostatici



McGarr (1991)

La produzione di idrocarburi ha l'effetto di rimuovere una massa Δm dalla crosta.

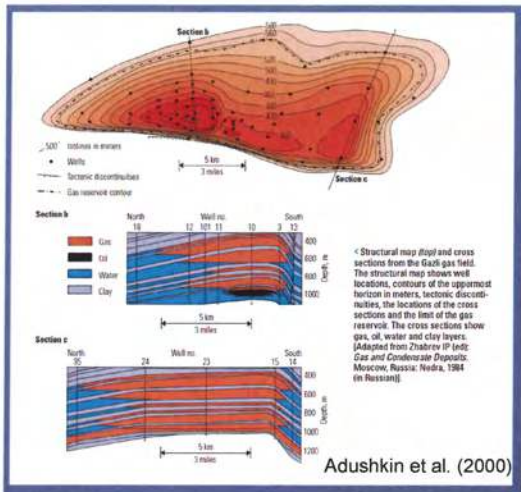
Per ripristinare l'equilibrio verticale delle forze in gioco, la risposta isostatica a questa rimozione di massa induce un ispessimento crostale che può realizzarsi con l'attivazione di sovrascorrimenti anche distanti dalla zona di produzione (McGarr, 1991)

Hydromechanical setting of earthquakes triggered by the unloading of the uppercrust caused by hydrocarbon extraction. Column 3 is the year when extraction began and the date of the first induced event. Column 6 is the maximum magnitude of induced events. Mass deficit is reported on column 5. Assuming that mass withdrawal at these sites is related to the major earthquake, we estimate the induced stress, augmenting failure by multiplying the seismic stress drop by the ratio of stiffness of the loading system (the vertical force change) to the stiffness of the circular crack model according to McGarr (1991)

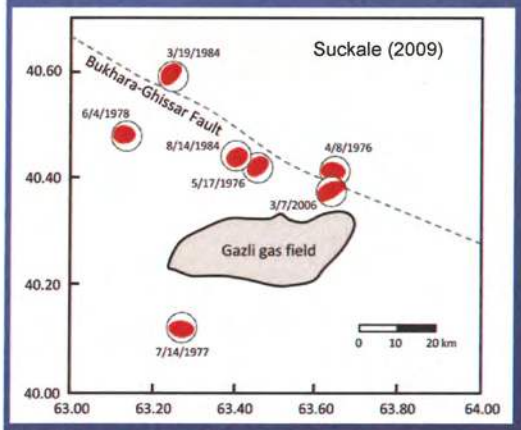
Area or Field	Reservoir Depth	Onset of Prod. – Eqs.	Initial Pressure	Mass Removal	Maximum Magnitude	Induced Stress
Coalinga field[a] California, USA	2 km	1940–1983	25 MPa	2.7×10^{11} kg	$M = 6.5$	~0.01 MPa
Kettleman field[a] California, USA	1.5 km	19??–1985	—	1.2×10^{11} kg	$M = 6.1$	~0.01 MPa
Montebello field[a] California, USA	1.5 km	1924–1987	—	1.3×10^{11} kg	$M = 5.9$	~0.01 MPa
Gazli field[b] Kyzyl-Koum, Uzbekistan	1.5 km	1962–1976	10 MPa	2×10^{11} kg	$M \approx 7.0$	~0.04 MPa
Gazli field[b] Kyzyl-Koum, Uzbekistan	1.5 km	1976–1984	3 MPa	2×10^{11} kg	$M \approx 7.0$	~0.05 MPa

Grasso (1992)

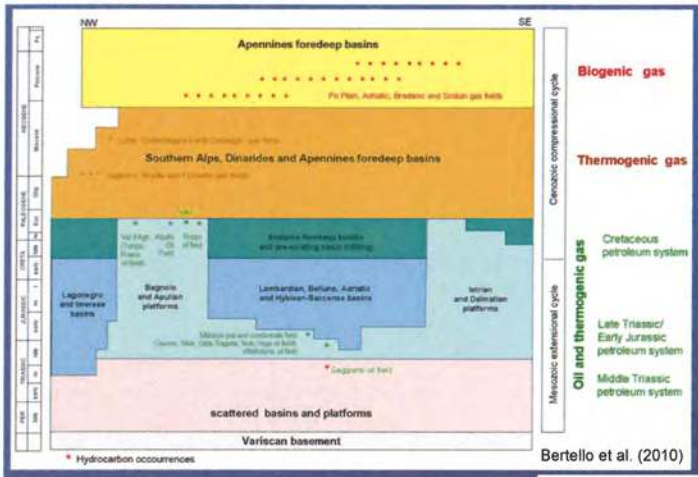
Casi Controversi: Gazli



Adushkin et al. (2000)



- Gazli: giacimento a gas scoperto in Uzbekistan nel 1956 con riserve stimate in 456 GSm3
- Inizio produzione nel 1962 seguita da significative iniezioni di acqua nel sottosuolo
- 12 terremoti nel periodo 1975-1994 con $4.2 \leq M \leq 7$ (con una sequenza considerata anomala)
- Correlazione tra estrazione e terremoti (Simpson & Leith, 1985; McGarr, 1991; Grasso 1992; Adushkin, 2000)
  - Assenza di terremoti con M> 6.5 dal 1208 e sequenza sismica anomala
  - Interpretato come innesco dovuto a disequilibrio isostatico
- Origine tettonica (Bossu, 1996)
  - Escludono effetto isostatico perché estrazione di gas e iniezione di acqua si bilanciano
  - Sottolineano la migrazione della sismicità verso NE dal 1976 al 1984 per oltre 90 km che interpretano come la manifestazione di una zona di faglia "immatura"



Bertello et al. (2010)

Giacimenti Italia

	Campi Gas (Terra)	Regione	Produzione Cum (GSm3)	Status
1	Dosso Angeli	Emilia Romagna	31.8	In produzione
2	Ravenna	Emilia Romagna	22.5	In produzione
3	Candela	Puglia	22.4	In produzione
4	S.Salvo-Cupello	Abruzzo	19.2	Stoccaggio
5	Cortemaggiore	Emilia Romagna	15.1	Stoccaggio
6	Minerbio	Emilia Romagna	13.4	Stoccaggio
7	Caviaga	Lombardia	12.2	In esaurimento
8	Spilamberto	Emilia Romagna	11.5	In produzione
9	Gagliano	Sicilia	11.3	In produzione
10	Ferrandina	Basilicata	9.0	Esaurito

Giacimenti più grandi nel mondo possono arrivare alle migliaia di GSm^3
2 ordini di grandezza

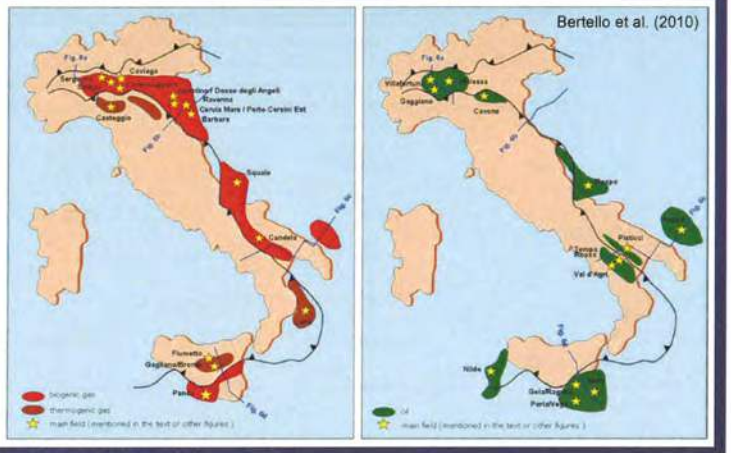
Giacimenti petrolio Italiani più grandi: riserve valutabili in genere nell'ordine dei 100-200 Mbo

Val d'Agri: riserve stimate c. 480 Mbo
(produzione attuale è di circa 85mila b/d, potrebbe arrivare a 104000 b/d)

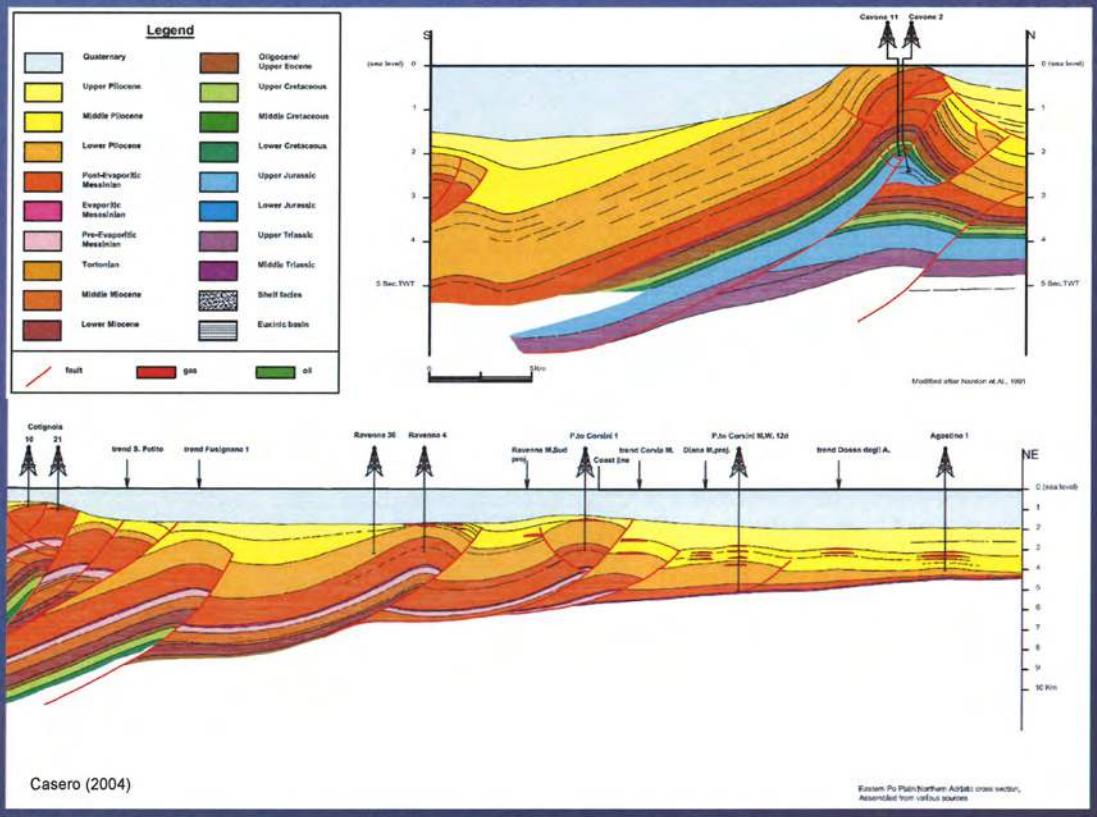
Tempa Rossa: riserve stimate c. 420 Mbo

Cavone: produzione cumulata di c. 20 Mbo

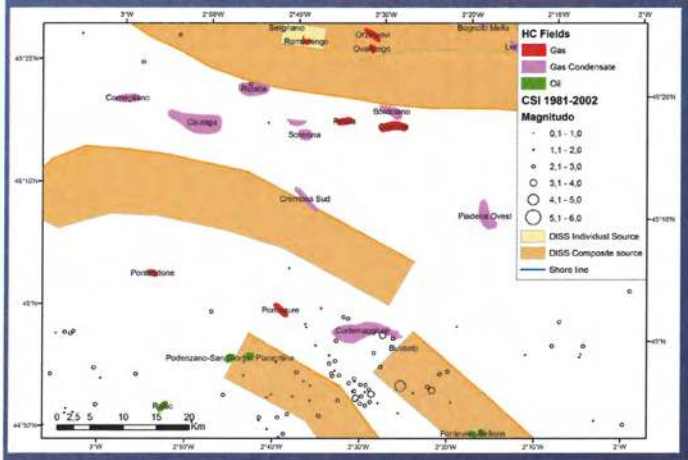
Giacimenti più grandi nel mondo: arrivano alle decine di migliaia di Mbo (e.g., Ghawar in Arabia Saudita c. 83000 Mbo)
2 ordini di grandezza



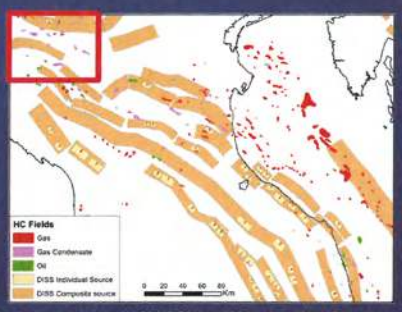
Sezioni Geologiche



Sismicità Giacimenti: 1

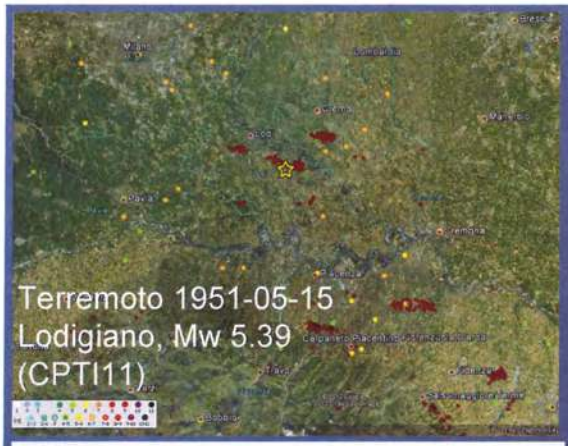


- Caviaga (giacimento a gas condensati in esaurimento): nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISIDe
- Cortemaggiore (uno dei più grandi giacimenti di gas condensati ora adibito a stoccaggio): qualche piccolo evento su CSI 1.1, nessuna evidenza su ISIDe



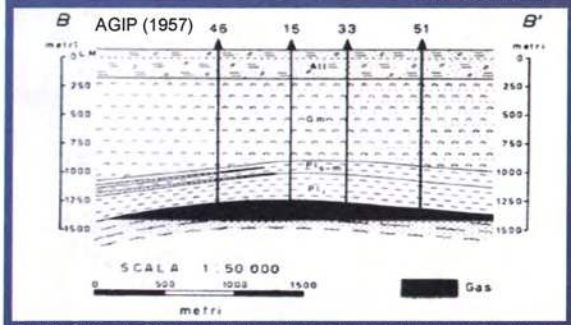
Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISIDe (2005-2013)
Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
Giacimenti da IHS

Terremoto Caviaga



con asse fortemente inclinato verso NW. La singolarità del meccanismo secondo cui la scossa si è determinata, il fatto che la zona interessata è notoriamente asismica e che in essa, da parecchi anni, è in corso un'abbondante estrazione di gas metano, ha fatto ritenere non del tutto improbabile che le scosse in esame siano comunque collegate all'enorme decompressione in atto negli strati profondi, di dove il gas scaturisce con pressioni superiori ai 100 kg/cm².

Caloi et al. (1956)



Terremoto del Lodigiano: 1951-05-15, Mw 5.39 (CPTI11)

Caloi et al. (1956), stimata la profondità a 5 km

- considerato "il fatto che la zona interessata è notoriamente asismica"
- ritengono "non del tutto improbabile" un suo collegamento con le attività estrattive in corso a Caviaga

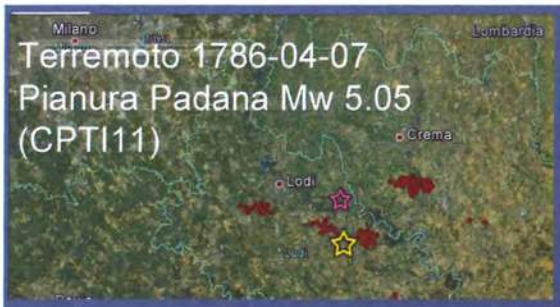
Successivamente riportato in tutti i principali cataloghi come esempio di terremoto indotto da attività estrattive (e.g. Grasso 1992; Guha, 2000; Suckale, 2009)

Caviaga: Giacimento a condensati in arenarie del Piocene inf. (top reservoir c. -1200 m ssl)

Produzione complessiva oltre 12 GSm3 (UNMIG). Prima grande scoperta di gas in Europa (1944). "Giant" anche per gli standard odierni. Attualmente in esaurimento (c. 4 MSm3 nel 2012)

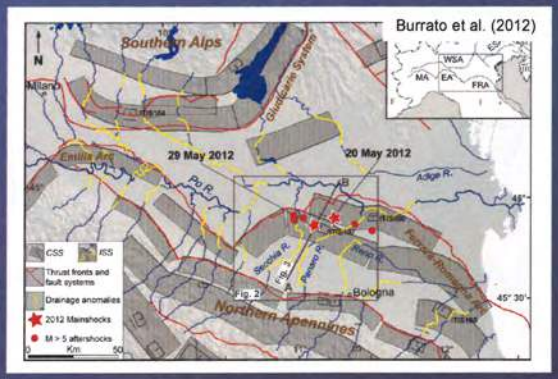
Interessato da un disastroso blow-out nel 1949-50

"Zona Notoriamente Asismica"?



In realtà, zona chiaramente interessata da tettonica attiva

Potrebbe essersi trattato di un fenomeno di sismicità innescata?



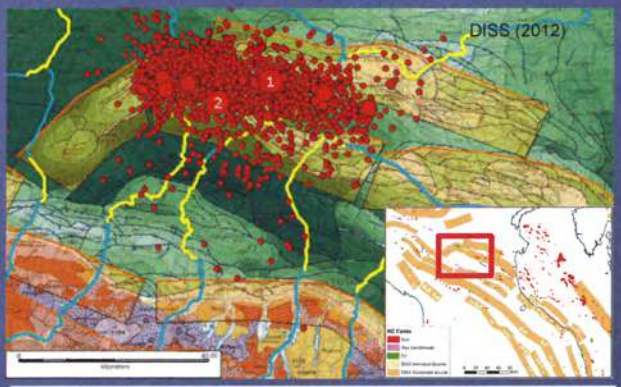
PRODUZIONE: AGIP (1957)

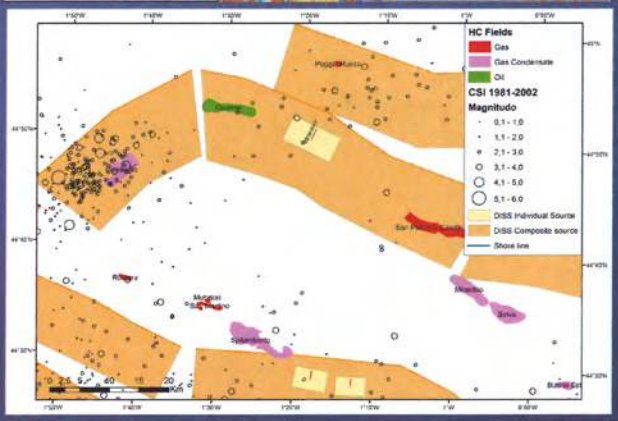
Anno	N. pozzi in prod.	Gas nat. (*) Annuale	Gas nat. (*) Progressivo	Gasolina nat. Annuale	Gasolina nat. Progr.	Acqua nat. Annuale	Acqua nat. Progr.
1944	1	788.418	788.418	—	—	—	—
1945	1	2.398.935	3.187.353	—	—	—	—
1946	1	2.726.323	5.913.676	—	—	—	—
1947	3	10.447.203	16.360.879	5	5	25	25
1948	6	21.262.143	37.623.022	86	91	51	76
1949	8	83.529.845	121.152.867	276	367	301	377
1950	11	195.105.137	316.256.004	473	840	471	749
1951	21	385.087.284	701.343.288	984	1.824	927	1.676
1952	19	441.214.570	1.142.557.858	1.163	2.987	1.061	2.737
1953	24	584.625.560	1.727.183.418	1.333	4.320	1.340	4.077
1954	33	1.158.671.485	2.885.854.903	2.335	6.655	4.263	8.340
1955	35	1.257.380.679	4.143.344.582	1.850	8.605	12.008	20.348
1956	36	1.280.505.284	5.423.749.866	2.286	10.891	11.194	31.742

Al 15/05/1951 era stato estratto dal giacimento un volume di idrocarburi compreso tra 316 e 701 MSm3; cioè c. 4% del volume estratto a fine 2012

Se sismicità è innescata da estrazione (e.g, come conseguenza di stress poroelastici, poiché i piccoli volumi estratti al 1951 rendono poco plausibile effetti isostatici) perché non si è più registrata sismicità nell'area con l'aumentare dei volumi estratti?

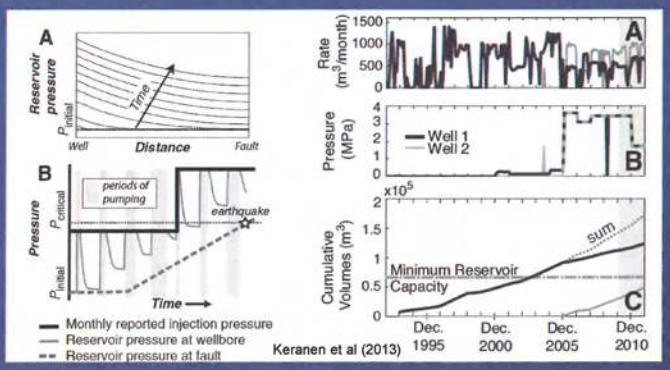
Sismicità Giacimenti: 2

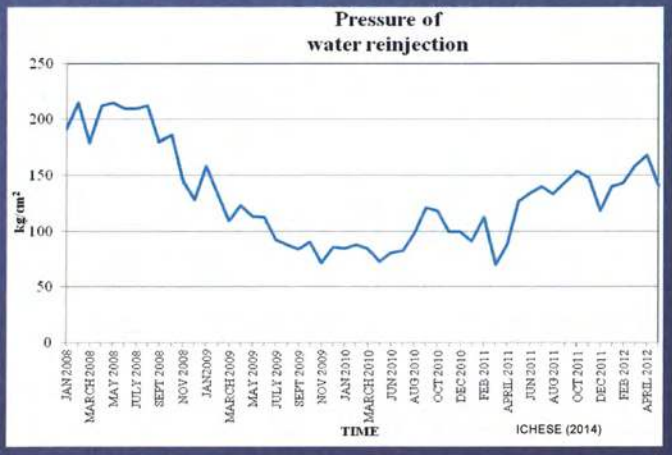




- Scarse evidenze di sismicità precedente il terremoto dell'Emilia del maggio 2012 nella zona di Cavone (Catalogo CSI)
- Nella zona di Correggio si rileva una sequenza associata al terremoto di Reggio Emilia dell'ottobre 1996 (Mw 5.4, Selvaggi et al., 2001)
- Assenza di giacimenti vicini alle zone epicentrali (a meno di 20 km) a parte Cavone
- Cavone: piccolo giacimento con reservoir costituito da rocce carbonatiche fratturate
  - Volumi estratti c. 20 Mbo (vs 480 Mbo di riserve della Val d'Agri)
  - Produzione attuale c. 517 bo/d (30000 m3/a, UNMIG), iniziale c. 3500 b/d (200000 m3/a, UNMIG), vs 85000 b/d Val d'Agri
- Un analisi di alcuni osservabili geologici e geofisici rendeva poco plausibili le ipotesi su un su un eventuale innesco del terremoto dell'Emila del maggio 2012 a causa delle operazioni connesse con la coltivazione del giacimento di Cavone

Pressioni di Reiniezione



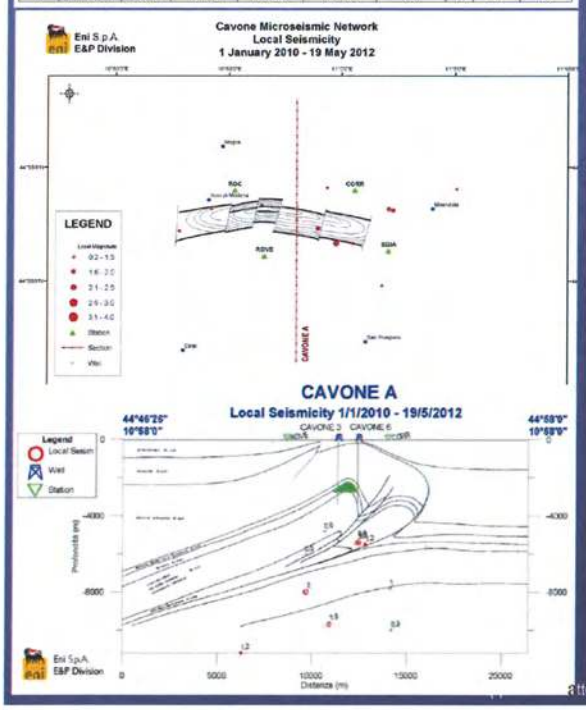


- Terremoto Oklahoma del novembre 2011 (Mw 5.7, Keranen et al., 2013)
  - Reservoir compartimentalizzato con iniezione in vecchio giacimento di volumi di «waste water» (probabilmente derivati da operazioni di fracking per produzione di shale gas in altri pozzi) tali da superare i volumi già estratti di petrolio e da generare significative sovrappressioni.
- A Cavone i volumi iniettati sono minori di quelli prodotti e non si hanno significative sovrappressioni
  - Estratti in totale 3.2 Mm3 di fluidi
  - Reiniettati 2.85 Mm3 di H20 (1993-2012) con pressioni c. idrostatiche

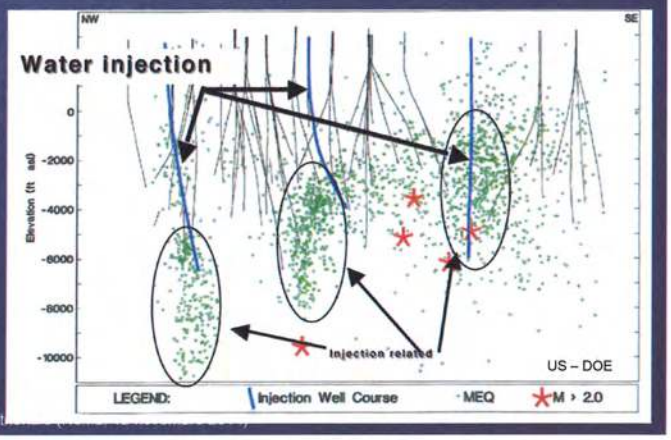
Microsismicità

Table IV.2 Local microseismic events recorded from January 2010 to May 19, 2012.

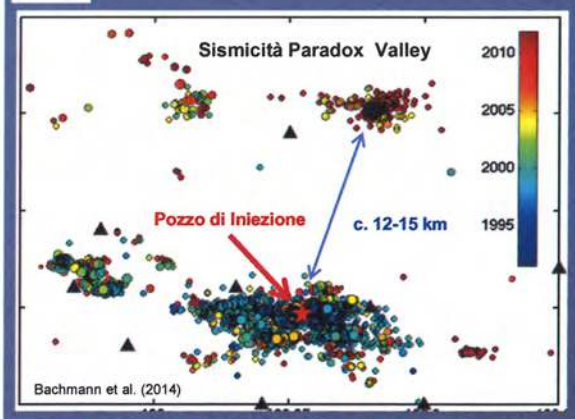
Event	Date	Time (UTC)	Epicenter	Latitude_N	Longitude_E	Err. Epicenter (km)	M_L	Depth (km)	Err. Depth (km)
1	02/01/2010	07:43	Mirandola	44°52.32'	10°58.94'	1.5	1.9	9.8	0.7
2	09/02/2010	00:03	Novi di Modena	44°53.17'	10°54.21'	0.3	0.5	5.3	0.1
3	10/02/2010	12:43	Novi di Modena	44°53.35'	10°56.43'	0.9	1.2	5.5	1.5
4	01/10/2010	02:34	Mirandola	44°54.10'	10°59.35'	4.5	0.2	10.0	5.0
5	11/05/2011	08:11	Mirandola	44°51.65'	11° 0.46'	0.3	0.5	6.0	0.5
6	06/04/2011	00:44	Novi di Modena	44°52.28'	10°52.84'	0.9	0.4	4.9	0.2
7	23/10/2011	10:11	Mirandola	44°51.65'	10°59.75'	0.9	2.0	8.0	1.0
8	11/12/2011	21:52	S.Prospero	44°50.06	11°02.1'	0.3	1.2	11.2	0.3
9	21/03/2012	22:41	Mirandola	44°53.16'	11° 2.08'	0.7	1.8	5.4	0.1
10	22/03/2012	01:06	Mirandola	44°53.16'	11° 2.08'	0.8	1.7	5.4	0.2
11	13/04/2012	23:54	S.Felice al Panaro	44°54.05'	11° 5.66'	0.5	1.0	7.9	0.6



- Nel caso di sismicità innescata di solito si hanno comunque anche eventi indotti (se esistono reti locali di monitoraggio capaci di rilevarli)
- Cavone dotato di rete sismica capace di rilevare eventi locali anche di piccola magnitudo (M 0.2-0.5)
- Assenza di significativa sismicità indotta (11 eventi nel periodo 01/01/2010-19/05/2012)



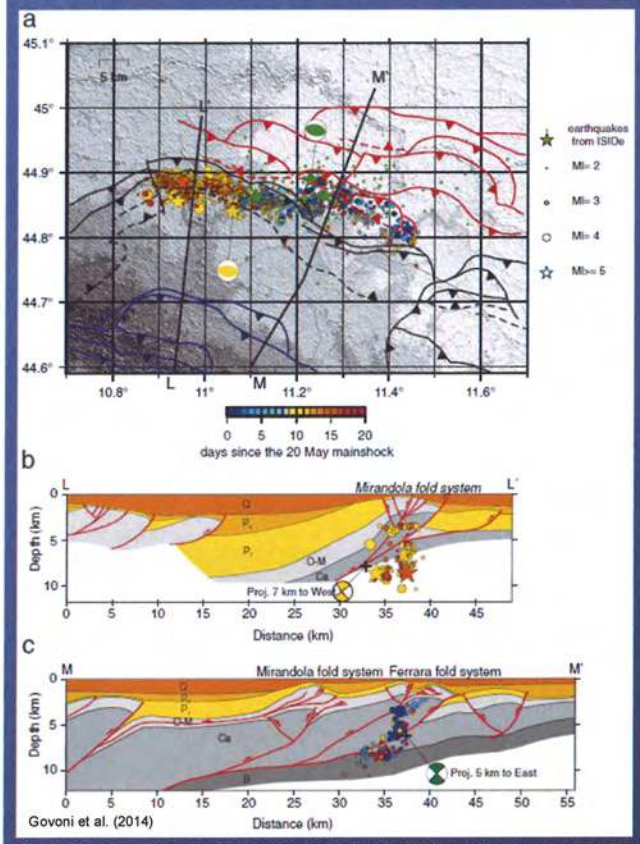
Sismicità Emilia



- Paradox Valley. Dal 1996, iniezione in calcari dolomitici fratturati a 4.3 km di profondità di acqua ricca in sali prelevata da acquifero superficiale
- Registrati da rete locale più di 1500 eventi sismici con M≥1 (sino a M 4.3) con chiara propagazione nel tempo a distanza progressivamente maggiori

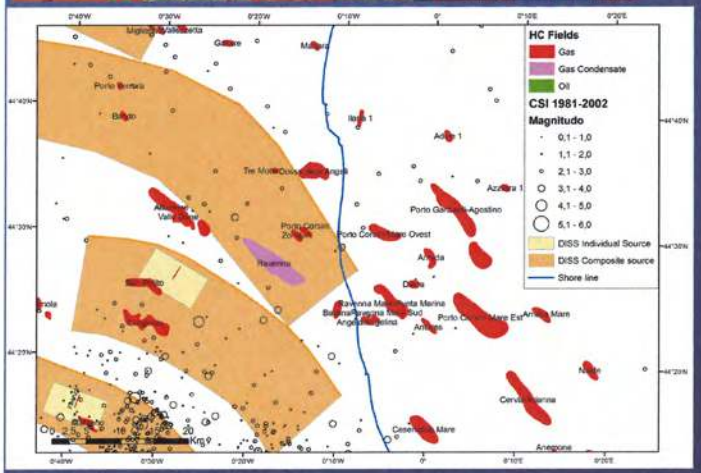
- Cavone. Reiniezione dal 1993 con rara sismicità nella zona di Cavone ed assenza di fenomeni di propagazione progressiva della sismicità a seguito di un'ipotetica migrazione della fronte dell'onda di pressione
- Correlazione tra incremento pressioni/volumi e sismicità nel 2011 è relativa a sequenza di Sermide del luglio 2011 posta a distanze molto elevate (c. 30 km)

Evoluzione Sequenza

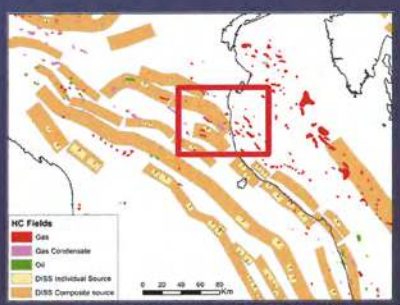


- Eventi e sequenza del maggio 2012 associati a riattivazione rampe sovrascorrimenti in zona in cui era stata già documentata presenza di strutture simogenetiche attive
- Due eventi principali:
  - 20/05/14 (Ml 5.9) si sviluppa sulla struttura di Ferrara (più esterna),
  - 29/05/14 (Ml 5.8) sul quella di Cavone-Mirandola (più interna).
- Assenza di strutture che possono permettere una migrazione diretta della perturbazione da Cavone alla struttura innescata il 20 maggio senza interessare la faglia attivata il 29 maggio
- Se la struttura del 29 era già in uno stato prossimo alla rottura (tanto da essere attivata dall'evento del 20) è difficile comprendere come la perturbazione generata a Cavone possa averla attraversata senza innescarla per prima

Sismicità Giacimenti: 3

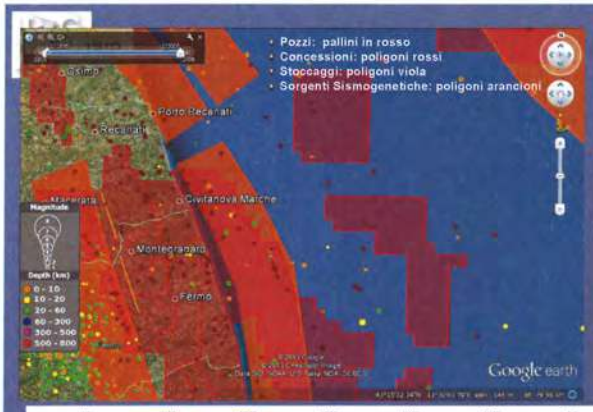


- Dosso degli Angeli e Ravenna (i due giacimenti di gas e gas condensati on-shore più grandi in Italia):
- Nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISIDe
- In generale scarse evidenze in tutto il settore sia on-shore che off-shore

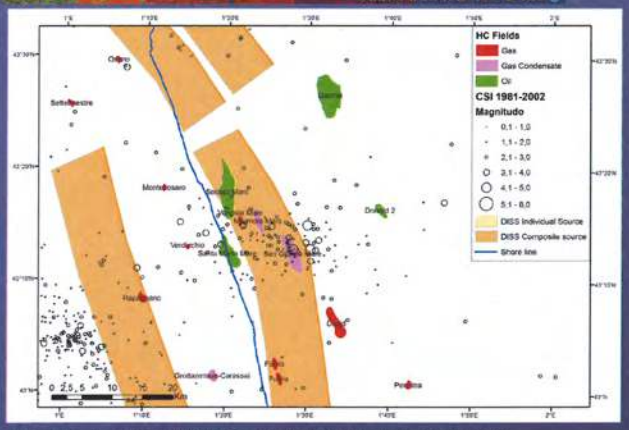


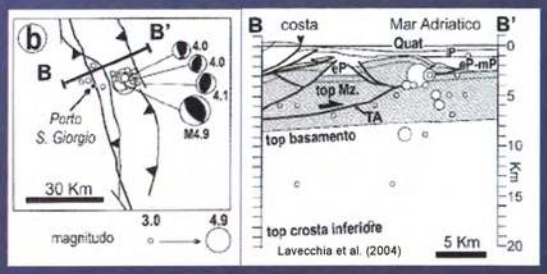
Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISIDe (2005-2013)
Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
Giacimenti da IHS

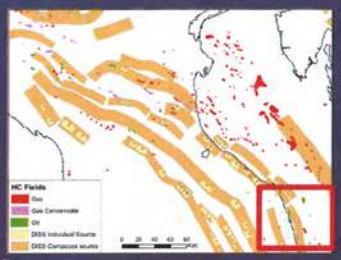
Sismicità Giacimenti: 4



- San Giorgio Mare (importante giacimento off-shore di gas condensati scoperto nel 1968 e in produzione dagli anni '70):
- CSI sequenza di Porto San Giorgio del 1987 (con M_d max 4.9 e $Z \leq 10$ km), qualche evidenza in ISIDe
- Al 1987 prodotto c. 3.2 GSm3 (attualmente in coda produzione con cumulata a c. 3.4 GSm3)

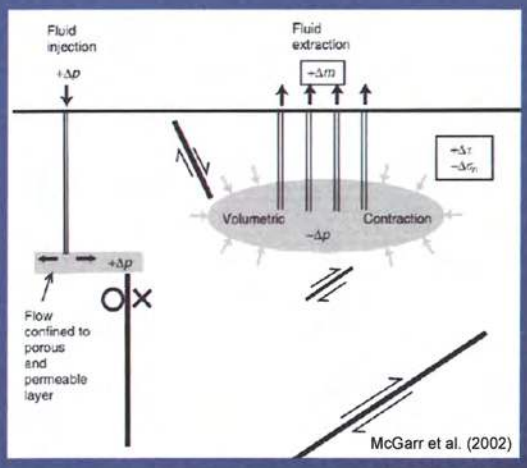






Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISIDe (2005-2013)
Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
Giacimenti da IHS

Conclusioni1/3: Processi Generali



- Strato crostale sismogenetico in uno stato di stress prossimo a rottura quasi ovunque. Piccole perturbazioni (e.g., 0.01 Mpa) possono innescare sismicità
- I diversi fenomeni che possono indurre sismicità in giacimenti di idrocarburi spesso interagiscono (e.g., estrazione di idrocarburi può essere associata ad iniziezione di fluidi).
- Con l'esclusione di pochi chiari casi, la determinazione dei rapporti di causa-effetto è sempre molto complessa (in particolare per i casi di ipotizzato innesco)

1. Riduzione della resistenza a taglio causata dall'aumento della pressione di poro conseguente all'immissione di fluidi nel sottosuolo
   - Fratturazione idraulica (generalmente con ML ≤ 2 principalmente all'interno del reservoir)
   - Recupero secondario (ML sino ad oltre 5 per innesco di strutture sismogenetiche)
2. Effetti Poroelastici dovuti ad estrazione di fluidi con ML ≤ 5 sviluppati sopra e sotto il reservoir a distanze contenute dal giacimento
3. Per alcuni eventi con ML ≥ 6 (e.g., Gasli e Coalinga) di controversa interpretazione è stata proposta quale possibile causa per un effetto di innesco il disequilibrio isostatico indotto da estrazione di ingenti quantità di fluidi

Conclusioni 2/3: Analisi Database

I giacimenti in cui è stata registrata una sismicità correlabile con l'attività estrattiva sono solo una minima frazione dei giacimenti sfruttati

A scala globale solo 70 casi sospettati (database certamente incompleto) rispetto ad un totale di oltre 65000 giacimenti di idrocarburi (Li Guoyu, 2011):

- 0.1% di casi

Statistiche negli USA (dove esiste forse il database più completo - NRC, 2013):

- Estrazione idrocarburi: 0.33% (campi)
- Smaltimento H2O: 0.03%
- Recupero secondario: 0.02% (pozzi)

Table 3.4 Summary Information about Historical Felt Induced Seismic Caused by or Likely Related to[a] Related to Energy Technology Development in the United States

NRC (2013)

Energy technology	Number of Projects	Number of Felt Induced Events	Maximum Magnitude of Felt Event	Number of Events M≥4.0[d]	Net Reservoir Pressure Change	Mechanism for Induced Seismicity
Vapor-dominated geothermal	1	300-400 per year since 2005	4.6	1 to 3 per year	Attempt to maintain balance	Temperature change between injectate and reservoir
Liquid-dominated geothermal	23	10-40 per year	4.1[b]	Possibly one	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase
Enhanced geothermal systems	~8 pilot projects	2-10 per year	2.6	0	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase and cooling
Secondary oil and gas recovery (waterflooding)	~108,000 (wells)	One or more felt events at 18 sites across the country	4.9	3	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase
Tertiary oil and gas recovery (EOR)	~13,000	None known	None known	0	Attempt to maintain balance	Pore pressure increase (likely mechanism)
Hydraulic fracturing for shale gas production	35,000 wells total	1	2.8	0	Initial positive; then withdraw	Pore pressure increase
Hydrocarbon withdrawal	~6,000 fields	20 sites	6.5	5	Withdrawal	Pore pressure decrease
Waste water disposal wells	~30,000	8	4.8[c]	7	Addition	Pore pressure increase
Carbon capture and storage, small scale	1	None known	None known	0	Addition	Pore pressure increase
Carbon capture and storage, large scale	0	None	None	0	Addition	Pore pressure increase

[a]Note that that in several cases the causal relationship between the technology and the event was suspected but not confirmed. Determining whether a particular earthquake was caused by human activity is often very difficult. The references for the events in this table and the way in which causality may be determined are discussed in the report. **Also important is the fact that the well numbers are those wells in operation today, while the numbers of events listed extend over a total period of decades.**

Conclusioni 3/3: Giacimenti Italiani

- Terremoto del Lodigiano (Caviaga) del 1951 è con tutta probabilità un terremoto di origine naturale
- Il modello accoppiato fluidodinamico/geomeccanico (Astiz et al., 2014) documenta l'assenza di ragioni fisiche per ritenere che le attività di produzione e reiniezione del campo Cavone abbiano innescato la sequenza sismica del maggio 2012 in Emilia
- Nei limiti dell'errore nelle localizzazioni epicentrali e della completezza dei database sismologici, per i principali giacimenti italiani si hanno scarse evidenze di sismicità stimolata chiaramente attribuibile alle attività estrattive. Sovrapponibilità tra ubicazione dei giacimenti ed epicentri con $M \geq 4$ si osserva solo in alcune zone (interessate da note sorgenti sismogenetiche) ubicate sia off-shore che nella zona di Correggio
  - Assenza di applicazioni di fracking *s.s.* per assenza di significavi spessori di "shale gas". Recupero secondario con iniezione di grandi volumi di acqua molto raro
  - In Italia in genere giacimenti medio piccoli. Per sviluppo di significativi effetti dovuti a disequilibrio isostatico necessario avere giacimenti di dimensioni significative
  - Per sviluppo di effetti poroelastici necessario avere reservoir di porosità elevata e compattabile, eventualmente associato a presenza di faglie pre-esistenti, con presenza in strati sopra o sottostanti di formazioni rigide.Tali condizioni sono generalmente assenti nei principali reservoir italiani
- In generale, è necessario estendere/migliorare le reti di monitoraggio ed approfondire gli studi, con un'attenzione particolare ai maggiori giacimenti (e.g., Val d'Agri) e ai progetti che prevedono la re-iniezione di fluidi nel sottosuolo

"From a scientific perspective, the liability aspect of induced or triggered earthquakes largely entails disadvantages to anyone trying to understand these earthquakes in contrast to someone seeking to assign blame for them"…

(McGarr et al., 2002)