



Giornata di studio

RICERCA DI IDROCARBURI E GESTIONE DEL GAS METANO IN PIANURA PADANA:
ASPETTI DI RISCHIO SISMICO E CRITICITÀ ENERGETICHE E AMMINISTRATIVE

Brescia, 7 maggio 2014

Giacimenti di idrocarburi e sismicità stimolata in Appennino centro-settentrionale

Davide Scrocca

Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Sismicità:

Indotta vs Innescata

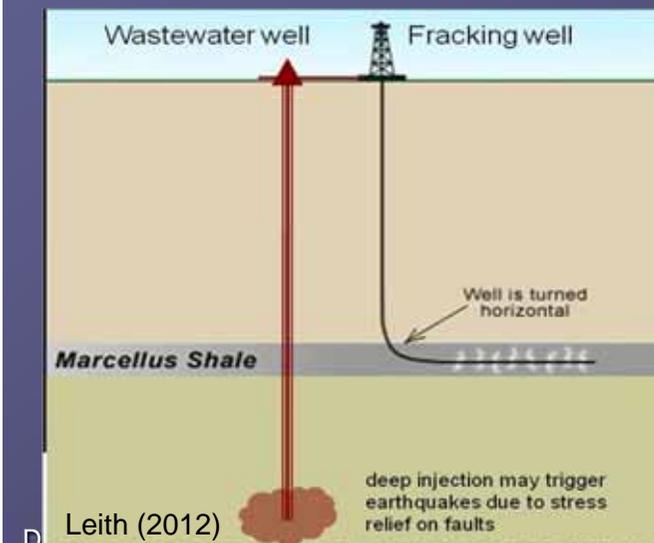
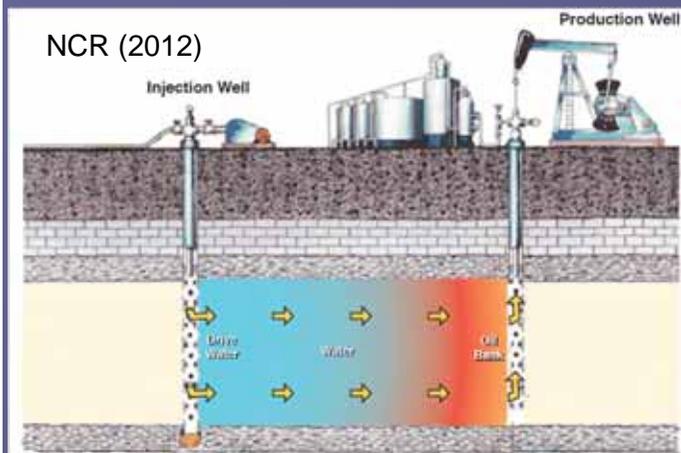
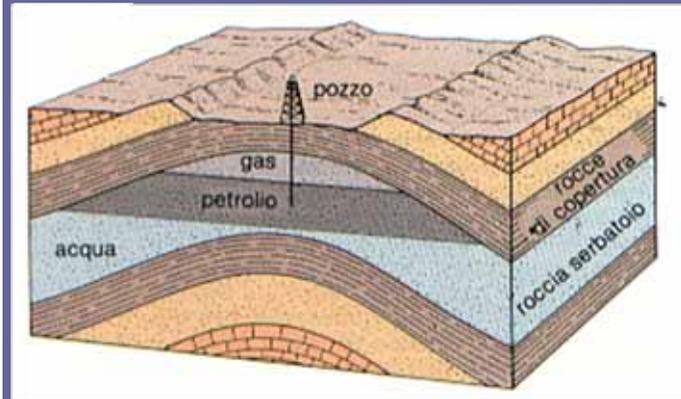


Attività antropiche possono «stimolare» sismicità

*“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)*

- **Sismicità Stimolata** (“Stimulated Seismicity”): Definizione generica che include sia la sismicità indotta che innescata
- **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
- Le attività antropiche non sono in grado di “indurre” grandi e disastrosi eventi sismici ma possono invece “innescarli”

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 roccia serbatoio. Opportuno distinguere "mini-frack" (utilizzato in operazione di manutenzione di pozzi, con raggio di azione dei metri) da "fracking" in senso stretto (utilizzato nello sfruttamento di "Shale gas" o per fratturare vasti ammassi rocciosi con influenza su centinaia di metri) in cui la sismicità più significativa è associata allo smaltimento in reservoir profondi delle acque utilizzate

Giacimenti vs Sismicità Stimolata

Suckale (2009)

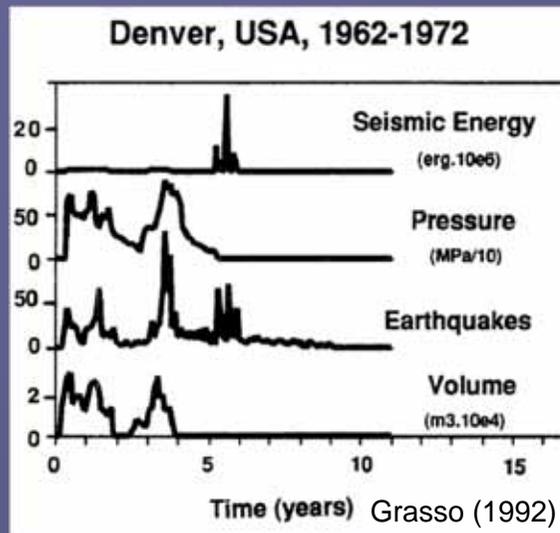
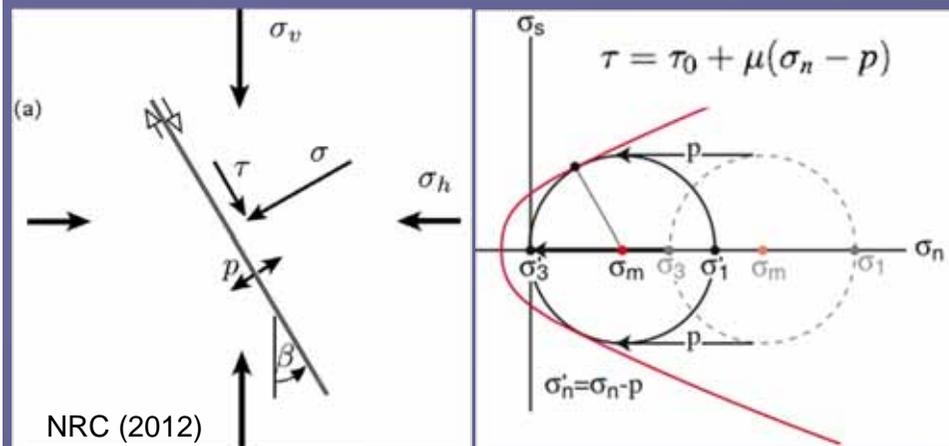
- Per almeno 70 casi è stata dimostrata, o ipotizzata, una relazione tra attività estrattive e sismicità (1 caso in Italia, Caviaga)
- Dataset probabilmente incompleto (da Grasso, 1992; Guha, 2000; Suckale, 2009)
- Casi documentati o ipotizzati sembrano distribuiti in modo non uniforme. Anche all'interno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



Hydrocarbon field	Country	Potential cause	Hydrocarbon field	Country	Potential cause
Sajpe Lake	Alberta, Canada		Shuiba	Oman	
Serchan	Alberta, Canada	extraction	Romashkino	Volgo-Ural, Russia	injection
Gobles	Appalachian, Canada	injection	Novo-Elkovskoye	Volgo-Ural, Russia	
Eagle/Eagle West	British Columbia, Canada	extraction	Starogrudninskoye	Russia	
Shergh	Shandong Province, China	injection	Bura-Gelmas-Vishka	Russia	
Dan	North Sea, Denmark	extraction	Gudrinov	North Caucasus, Russia	
Laizy	Aquitain, France	extraction	Grassy	Tchetchay	
Mellon	Aquitain, France	extraction ?	Big Escambia Creek	Alabama, USA	extraction ?
Sohlagen / Rosenburg	Rotliegendes, Germany		Little Rock	Alabama, USA	extraction ?
Caviaga	Di Valley, Italy		Simscoe Creek	Alabama, USA	extraction ?
Umm Gadhir	Kuwait	burning	Coolidge	California, USA	extraction/fault reactivation/loosening
Burgan	Kuwait	burning	Kettleman	California, USA	extraction/fault reactivation/loosening
Groningen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Montebello	California, USA	extraction/fault reactivation/loosening
Rossvinkel	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Orcutt	California, USA	injection
Bergermeer	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Wilmington	California, USA	extraction
Elveld	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Rangely	Colorado, USA	injection
Bergen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	South Eugene Island	Louisiana, USA	injection
Amrsven	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Hunt	Mississippi, USA	injection ?
Appelscha	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Sleepy Hollow	Nebraska, USA	injection ?
Emmen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Canoas District	Oklahoma, USA	injection ?
Dalen	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Love County	Oklahoma, USA	injection ?
Rodin	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Fair Dutton	Oklahoma, USA	injection ?
Vino Noord	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Gobles	Ontario, USA	injection
Uivert	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Apello-Hendrick	Texas, USA	injection ?
Emmen-Nw A'Dam	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Blue Ridge	Texas, USA	extraction/subsidence
Schoonebeek	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Clinton	Texas, USA	extraction/subsidence
ViesCentraal	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Goghil Canyon Reef	Texas, USA	injection ?
Goevanden	Rotliegendes, Netherlands	extraction/fault reactivation	Fishing	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Eklafik	North Sea, Norway	extraction	Goose Creek	Texas, USA	extraction/subsidence
Vihall	North Sea, Norway	extraction	Imogene	Texas, USA	extraction/fault reactivation
Vismud	North Sea, Norway	various	Kerrit	Texas, USA	injection
			Keystone	Texas, USA	
			Mylkows	Texas, USA	extraction/subsidence
			South-Houston	Texas, USA	extraction/subsidence
			War-Wark	Texas, USA	extraction ?
			Webster	Texas, USA	extraction/subsidence
			Dollarhide	Texas/New Mexico, USA	injection ?
			Garh	Uzbekistan	erotic production/fault reactivation ?
			Costa Oriental	Lake Maracaibo, Venezuela	extraction/subsidence

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). 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

Rocky Mountain Arsenal (Denver, USA), pozzo per smaltimento acque contaminate (c. 30 m³/h). Primi 5 anni buona correlazione tra volumi/pressioni e sismicità. Dopo interruzione dell'iniezione di fluidi, prosecuzione sequenza sismica (eventi con M c. 5-5.5), a distanza maggiore dal pozzo (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

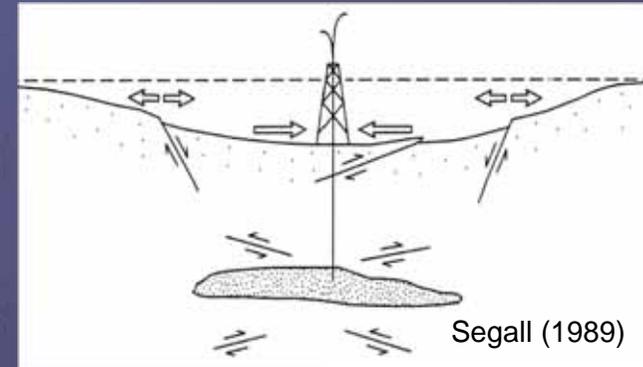
Estrazione di Fluidi: Effetti Poroelastici

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

Esempi classici: Giacimenti a gas di Groningen (Olanda) e Lacq (Pyrenees, France)

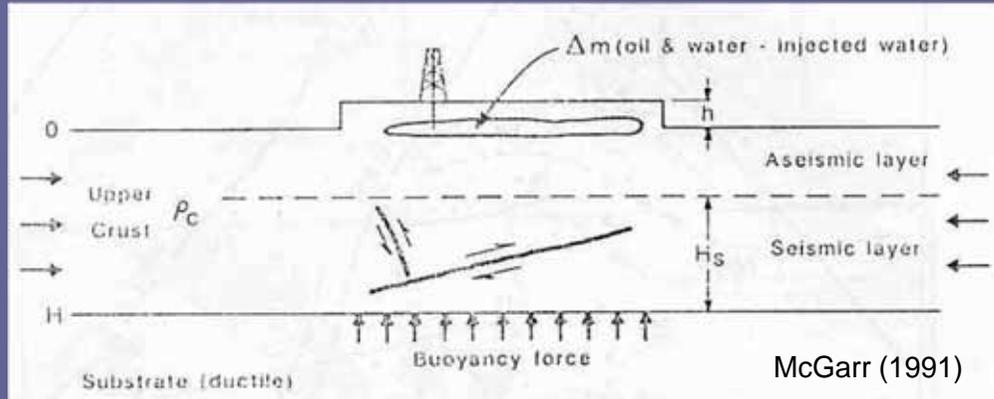


Segall (1989)

Area or Field Country	Grasso (1992)	Strachan ^a Alberta	Fashion ^a Texas	Lacq ^b France	Grozny ^c Tchecheny	Assen ^d	Groningen ^d Netherlands	Ekofisk ^e Norway	Dan ^f Denmark
Reservoir characteristics									
Size (km ²)		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	—
ν		—	—	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 _{init} (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
Δσ _{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; ν 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_{init}, 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; m₁ is the magnitude of the first reported induced event and m₂ is the maximum magnitude of induced events. Δσ_{max}, the order of magnitude of the induced stress at the onset of the seismicity, is estimated using the poroelastic stress model

Estrazione di Fluidi: Disequilibri Isostatici



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)

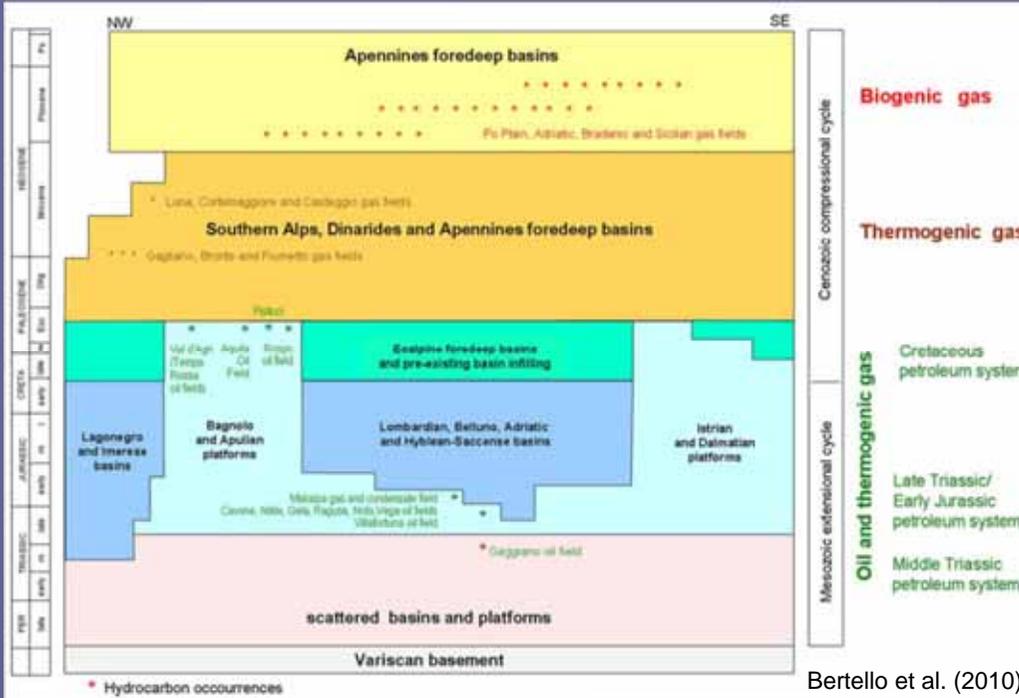
- Esempio controverso: Gazli (Uzbekistan, 1956, riserve gas 456 GSm³): Inizio produzione nel 1962 seguita da significative iniezioni di acqua nel sottosuolo, 12 terremoti nel periodo 1975-1994 con $4.2 \leq M \leq 7$

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)

Giacimenti Italia



Campi Gas (Terra)	Regione	Produzione Cum (GSm ³)	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 GSm³
2 ordini di grandezza

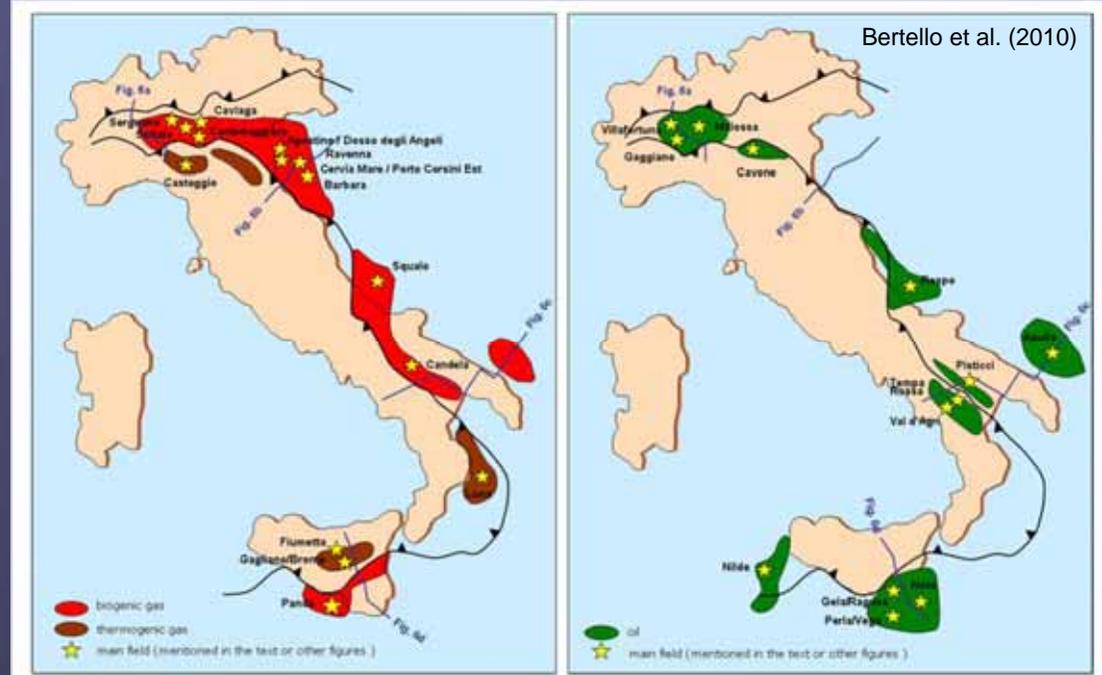
Giacimenti petrolio Italiani più grandi: riserve valutabili in genere nell'ordine dei 100-200 Mbo

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



Terremoto Caviaga

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

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

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.

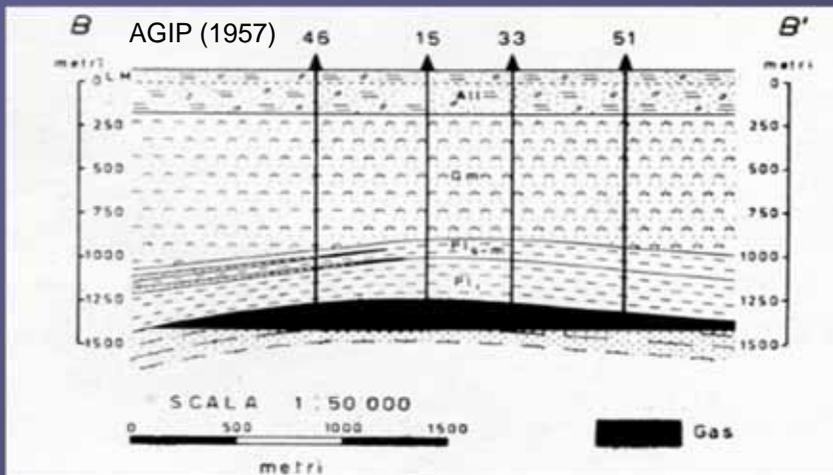
Caloi et al. (1956)

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)

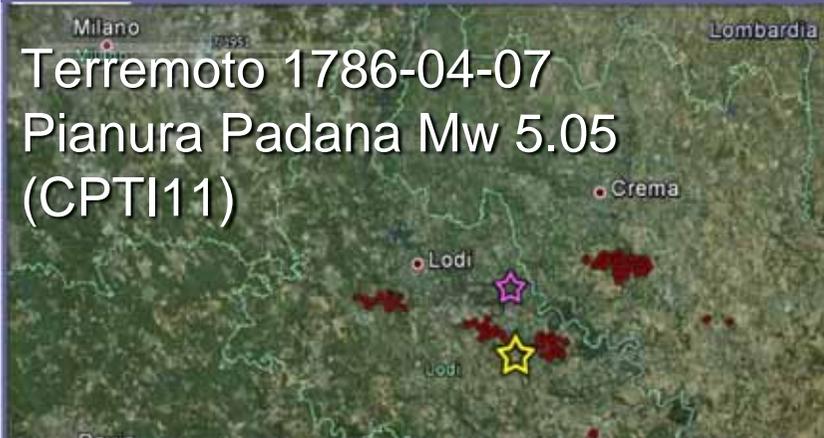
Produzione complessiva oltre 12 GSm³ (UNMIG).
Prima grande scoperta di gas in Europa (1944).
“Giant” anche per gli standard odierni.
Attualmente in esaurimento (c. 4 MSm³ nel 2012)

Interessato da un disastroso blow-out nel 1949-50



Davide Scrocca - Giacimenti di idrocarburi e sismicità stimolata in Appennino centro-settentrionale (Brescia, 7 maggio 2014)

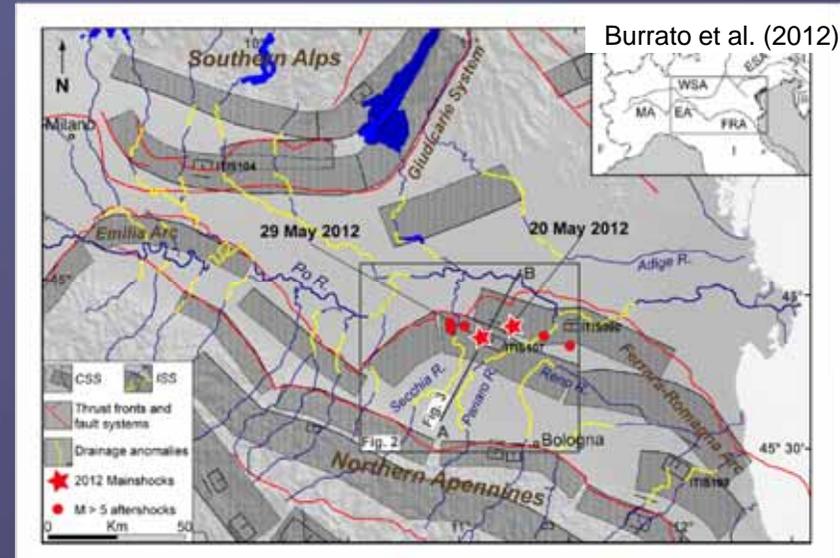
Terremoto 1786-04-07
Pianura Padana Mw 5.05
(CPTI11)



“Zona Notoriamente Asismica”?

In realtà, zona chiaramente interessata da tettonica attiva

Potrebbe essersi trattato di un fenomeno di sismicità innescata?

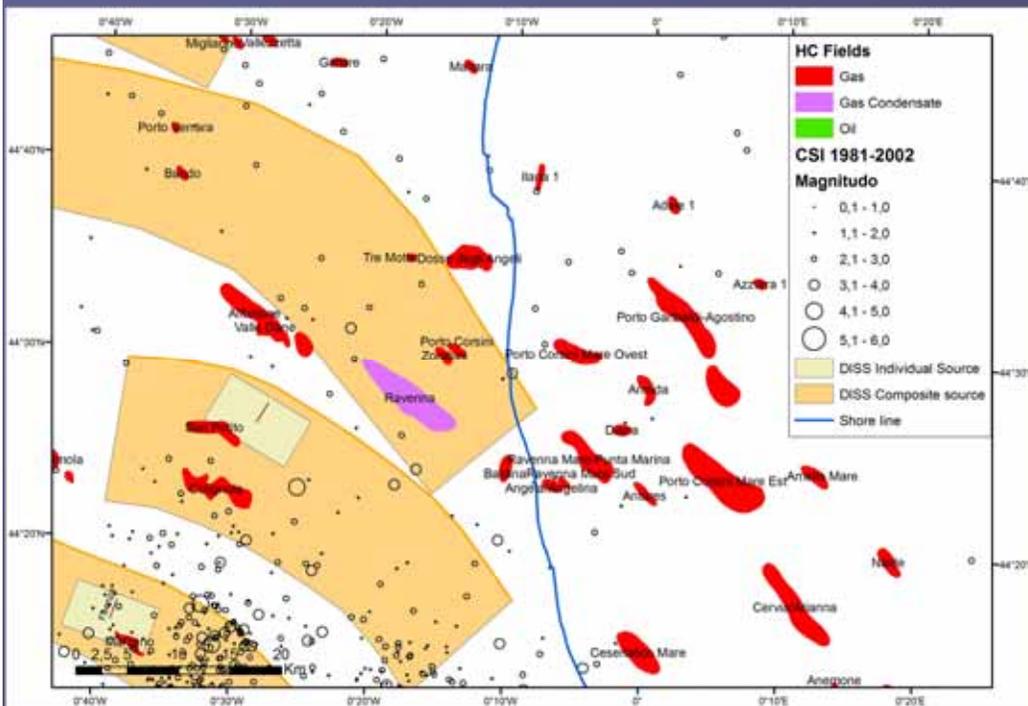
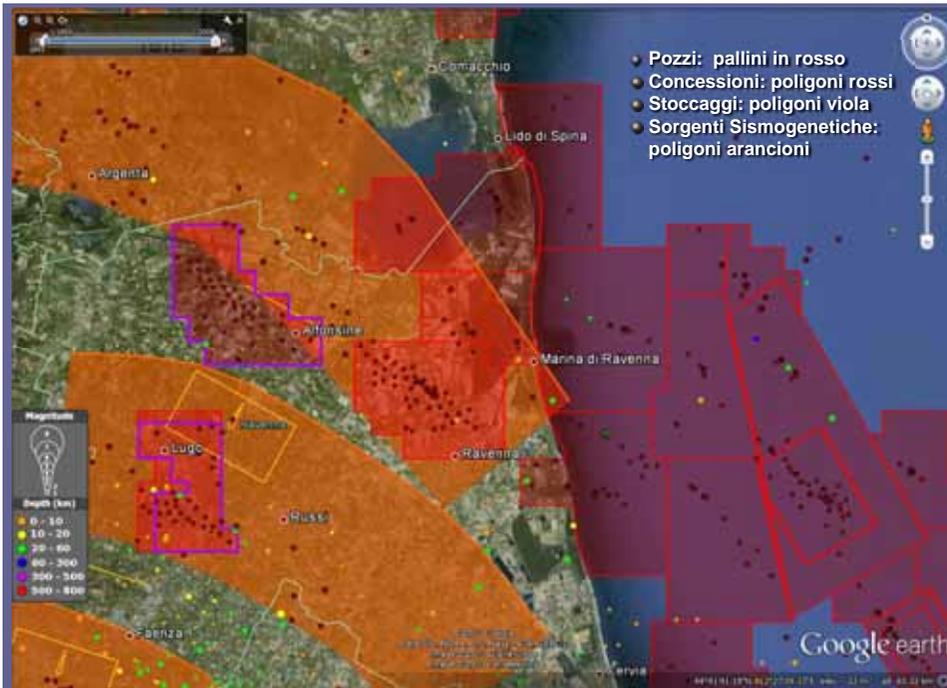


AGIP (1957)

PRODUZIONE:							
Anno	N. pozzi in prod.	Gas mc. (*)		Gasolina mc.		Acqua mc.	
		Annuale	Progressivo	Annuale	Progr.	Annuale	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	83.529.843	121.152.867	276	367	201	277
1950	11	195.103.137	316.256.004	473	840	472	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	1.233	4.220	1.340	4.077
1954	33	1.158.671.483	2.885.854.903	2.535	6.755	4.263	8.540
1955	35	1.257.389.679	4.143.244.582	1.850	8.605	12.008	20.548
1956	36	1.280.505.284	5.423.749.866	2.286	10.891	11.194	31.742

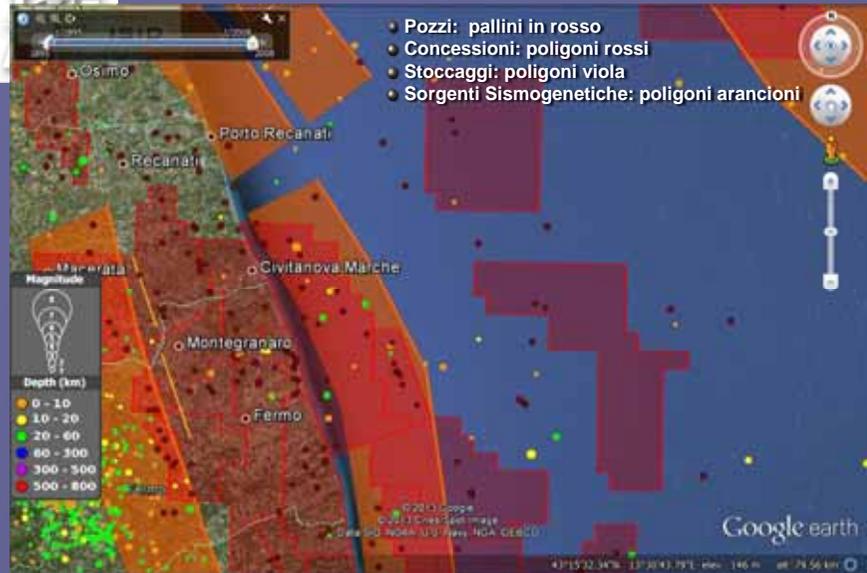
Al 15/05/1951 era stato estratto dal giacimento un volume di idrocarburi compreso tra 316 e 701 MSm³; cioè c. 4% del volume estratto a fine 2012. Se sismicità è innescata da estrazione (e.g, come conseguenza di stress poroelastici, poiché i piccoli volumi estratti al 1951 rendono poco plausibile effetti isostatici) perché non si è più registrata sismicità nell’area con l’aumentare dei volumi estratti?

Analisi Sismicità Giacimenti: 2

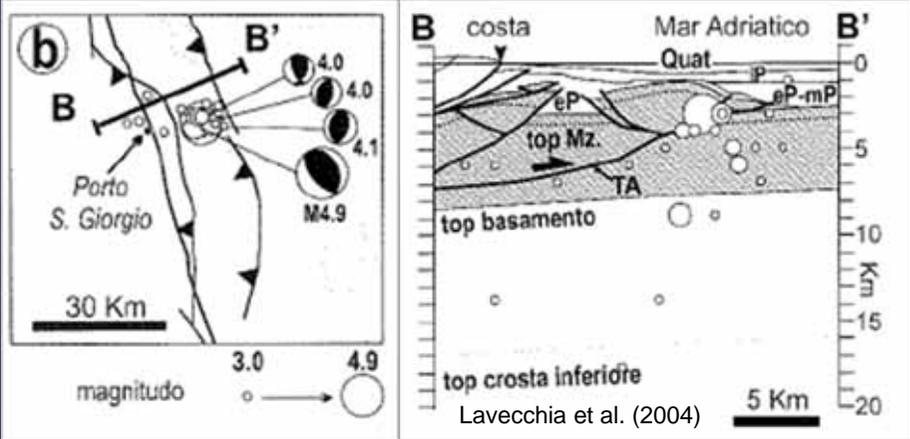
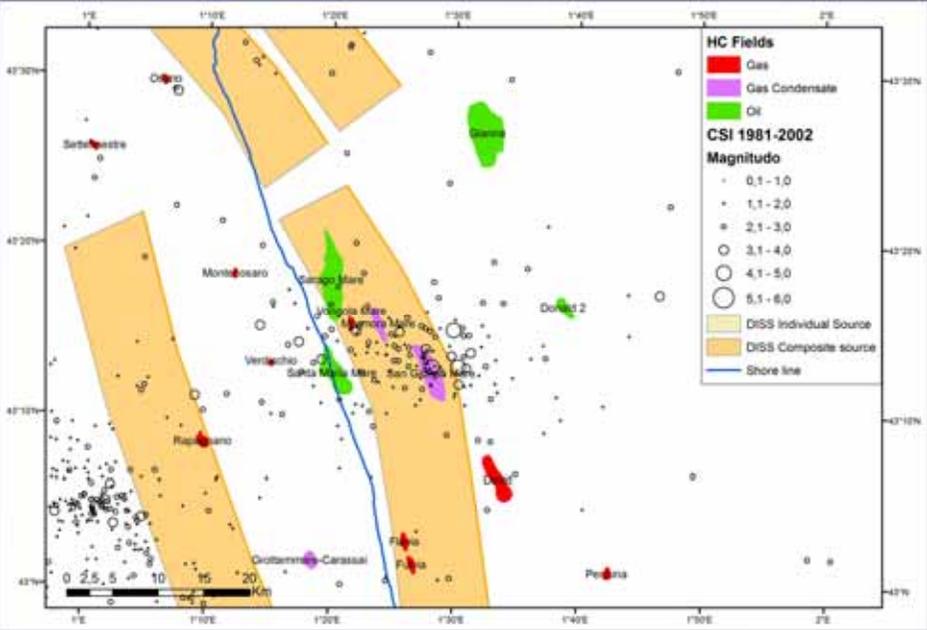


- Dosso degli Angeli e Ravenna (i due giacimenti di gas e gas condensati on-shore più grandi in Italia): nessuna evidenza sia su CSI 1.1 che ISIDe
- In generale scarse evidenze in tutto il settore sia on-shore che off-shore
- Sismicità da database INGV CSI 1.1 (1981-2002) e ISIDe (2005-2013)
- Sorgenti Sismogenetiche da database INGV DISS 3.1.1
- Titoli Minerari e Pozzi da Progetto Videpi - UNMIG
- Giacimenti da IHS

Analisi Sismicità Giacimenti: 3



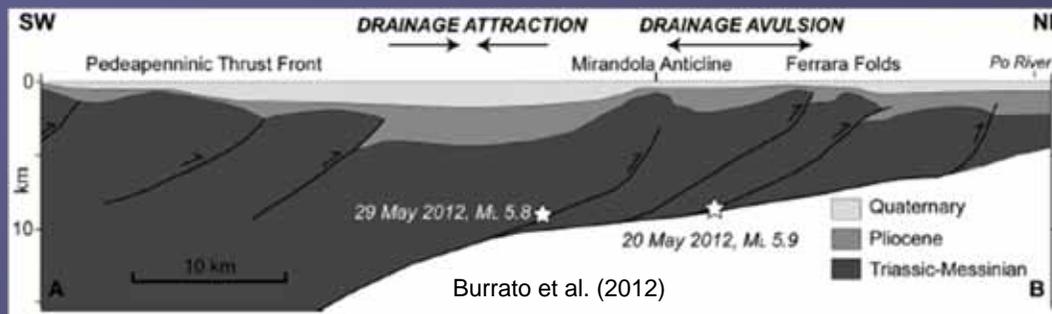
- San Giorgio Mare (importante giacimento off-shore di gas condensati scoperto nel 1969 e in produzione dagli anni '70):
- CSI sequenza di Porto San Giorgio del 1987 (con M_d max 4.9 e $Z \leq 10$ km), qualche evidenza in ISIDE
- Al 1987 prodotto c. 3.2 GSm³ (attualmente in coda produzione con cumulata 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

Terremoto Emilia 2012: ...Innescato?

- Eventi e sequenza del maggio 2012 associati a riattivazione rampe sovrascorrimenti in zona in cui era stata già documentata presenza di strutture simogenetiche attive



Quesiti [International Commission on Hydrocarbon Exploration and Seismicity in the Emilia Region \(ICHESE\)](#)

1. È possibile che la crisi sismica emiliana sia stata innescata dalle ricerche sul sito di Rivara effettuate in tempi recenti, in particolare nel caso siano state effettuate delle indagini conoscitive invasive, quali perforazioni profonde, immissioni di fluidi, ecc.?
 - «No»
2. È possibile che la crisi sismica emiliana sia stata innescata da attività di sfruttamento o di utilizzo di reservoir, in tempi recenti e nelle immediate vicinanze della sequenza sismica del 2012?
 - «... esiste una correlazione statistica tra l'aumento della sismicità prima del 20 maggio 2012 e l'aumento dei parametri di produzione da aprile/maggio 2011. Quindi non può essere escluso che le azioni combinate di estrazione ed iniezione di fluidi in una regione tettonicamente attiva possano aver contribuito, aggiungendo un piccolissimo carico, alla attivazione di un sistema di faglie che aveva già accumulato un sensibile carico tettonico e che stava per raggiungere le condizioni necessarie a produrre un terremoto.»
 - «L'attuale stato delle conoscenze e l'interpretazione di tutte le informazioni raccolte ed elaborate non permettono di escludere, ma neanche di provare, la possibilità che le azioni inerenti lo sfruttamento di idrocarburi nella concessione di Mirandola possano aver contribuito a "innescare" l'attività sismica del 2012 in Emilia.»



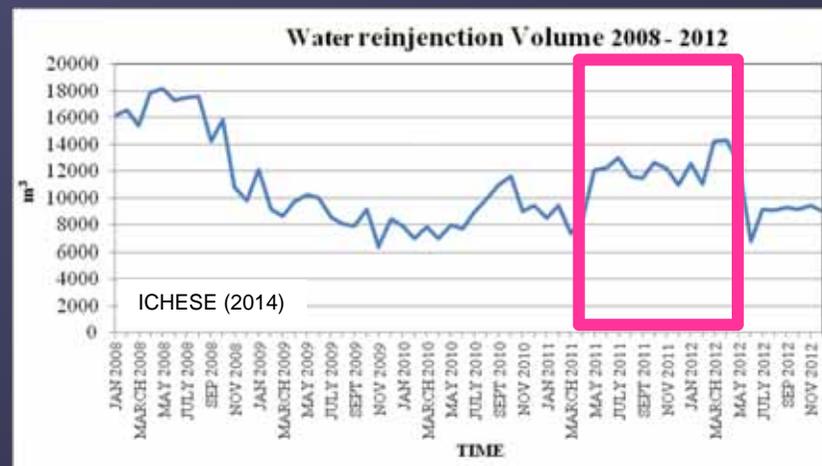
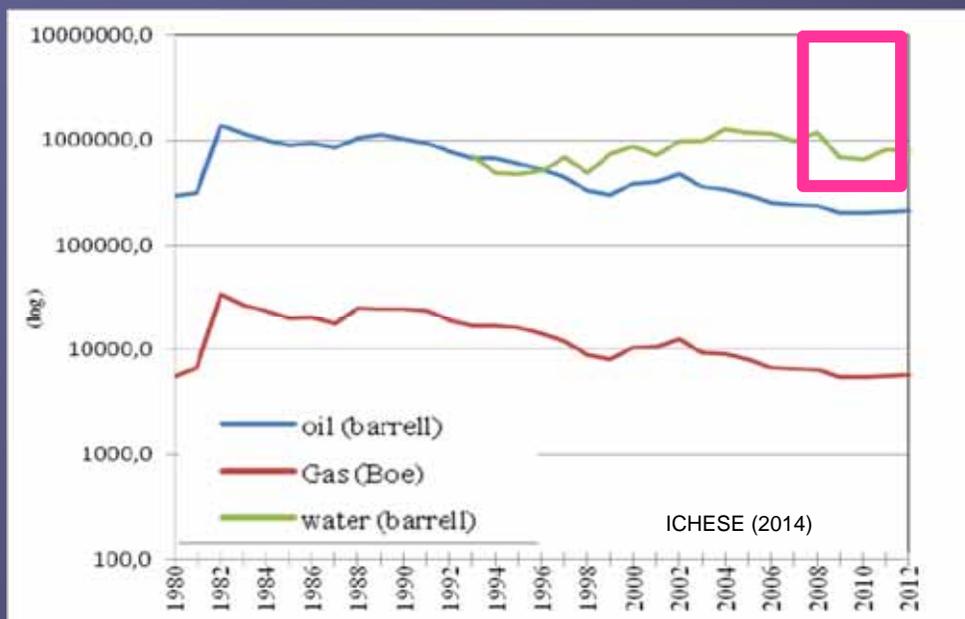
Cavone: Dati Produzione-Iniezione

Cavone è un giacimento molto piccolo con reservoir costituito da rocce carbonatiche fratturate

- Estratti c. 20 Mbo (vs 480 Mbo riserve Val d'Agri) - Produzione attuale 517 b/d, iniziale 3500 b/d (vs 85000 b/d Val d'Agri)

Estratti in totale 3.2 Mm³ di fluidi, reiniettati 2.85 Mm³ di H₂O (1993-2012) pressioni c. idrostatiche

ICHESE: "Nell'aprile-maggio 2011 c'è stato una repentina variazione di tendenza, da decrescente a crescente, di tutti i parametri di produzione, che risulta correlata statisticamente con un aumento della sismicità, sia in numero di eventi che in energia."

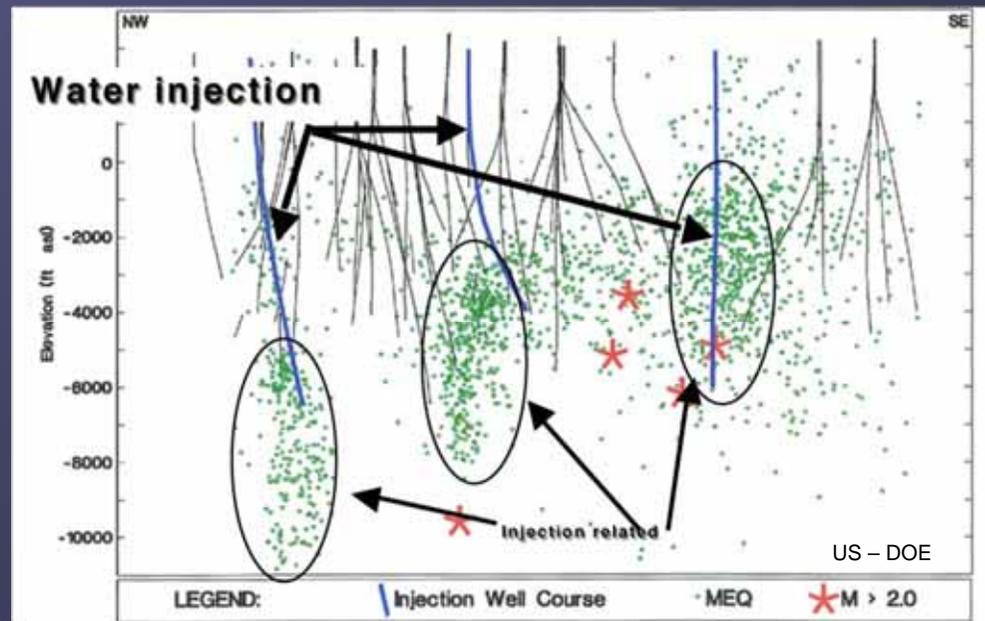
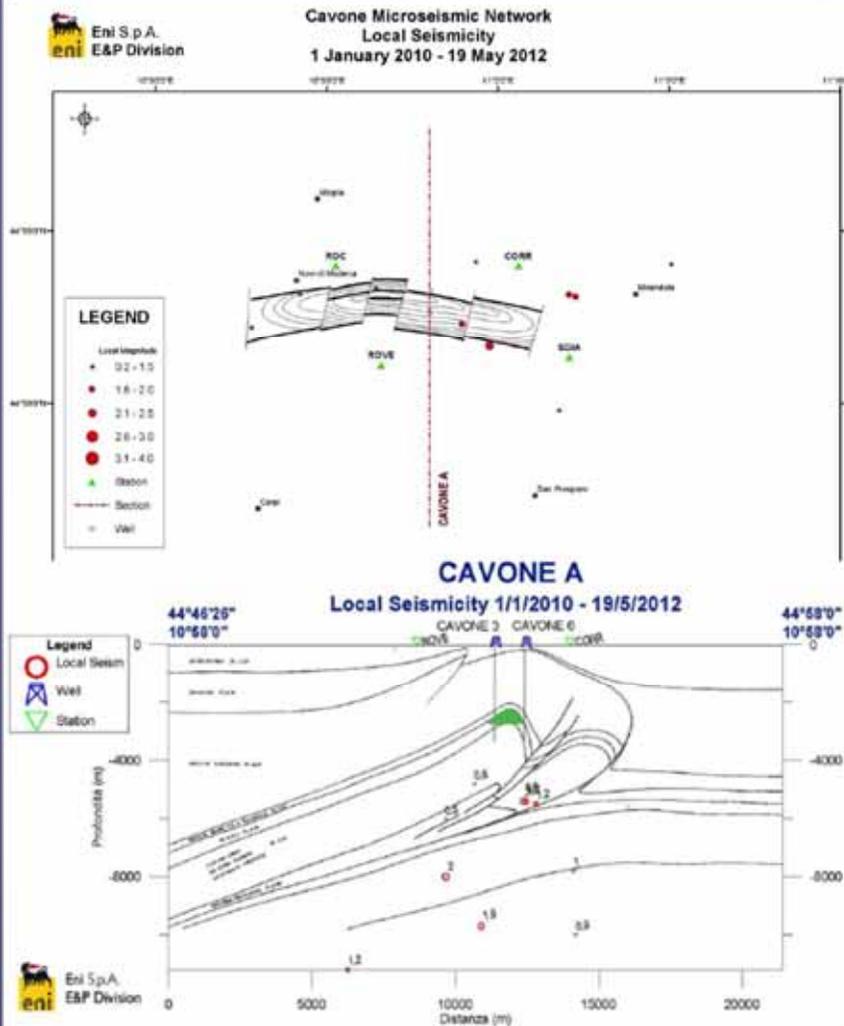


Microsismicità

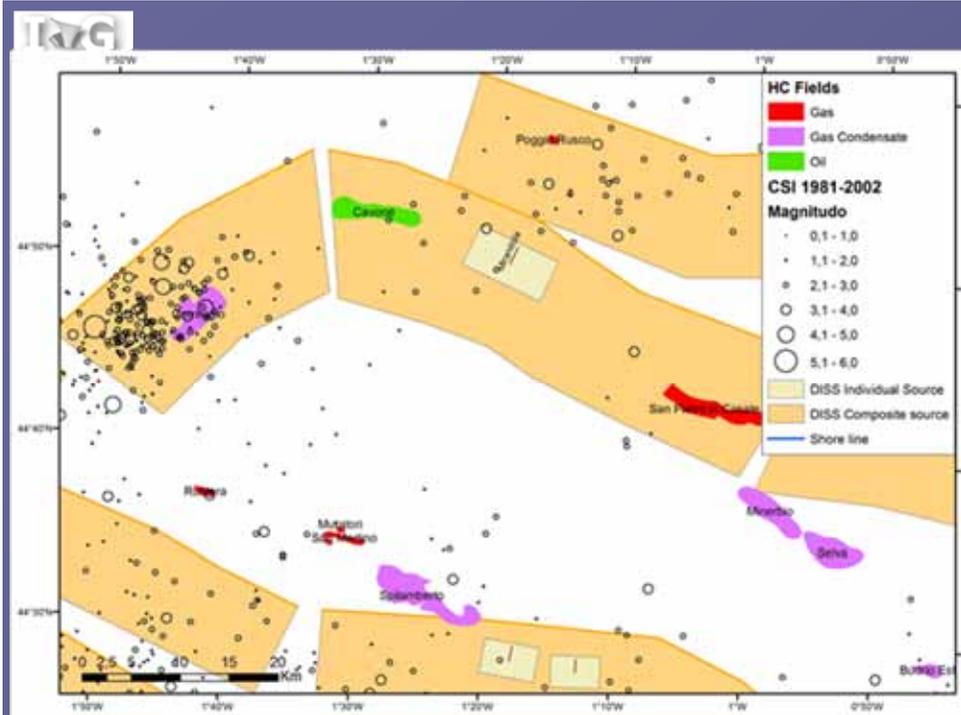
Table IV.2 Local microseismic events recorded from January 2010 to May 19, 2012.

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	11/03/2011	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° 5'06"	0.5	1.0	7.9	0.6

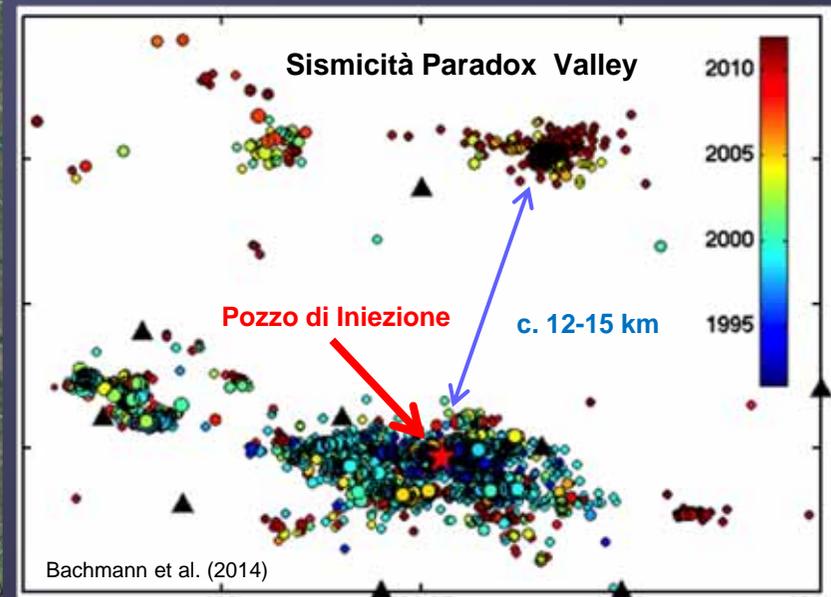
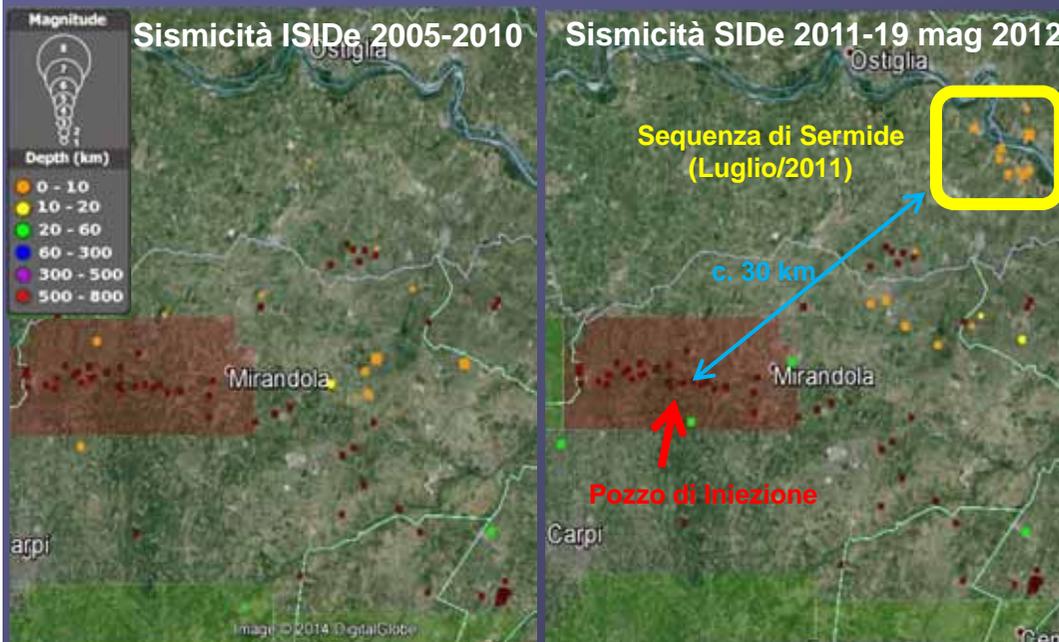
- Nel caso di sismicità innescata di solito si hanno comunque eventi indotti (se esistono reti capaci di rilevarli)
- Cavone dotato di rete sismica capace di rilevare eventi locali anche di piccola magnitudo (0.2-0.5)
- Assenza di significativa sismicità indotta (11 eventi nel periodo 01/01/2010-19/05/2012)



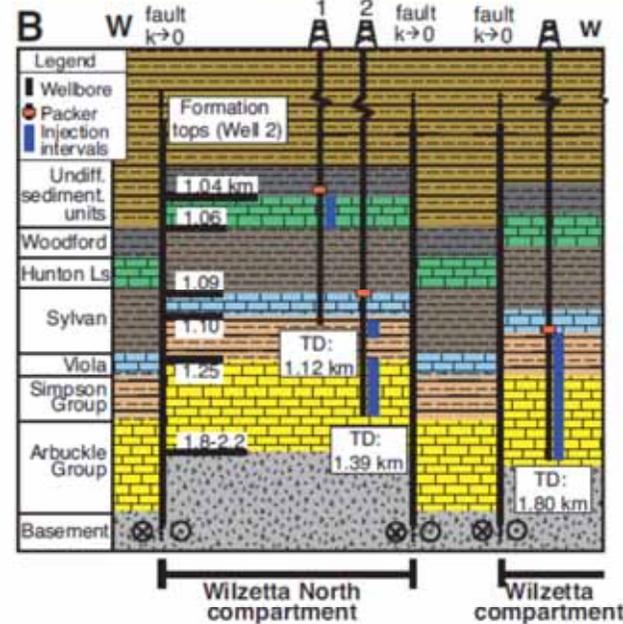
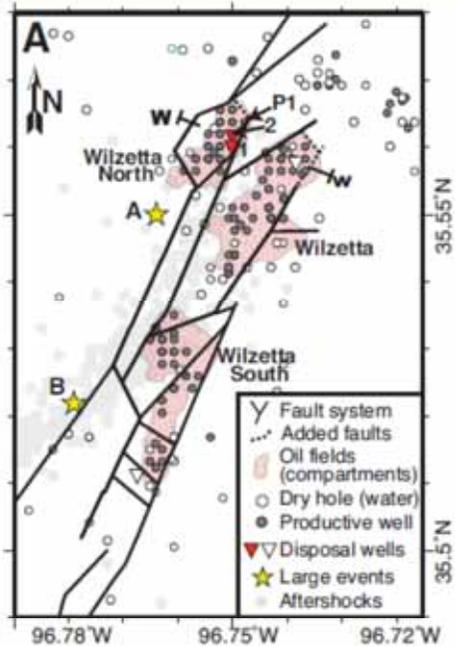
Sismicità Emilia



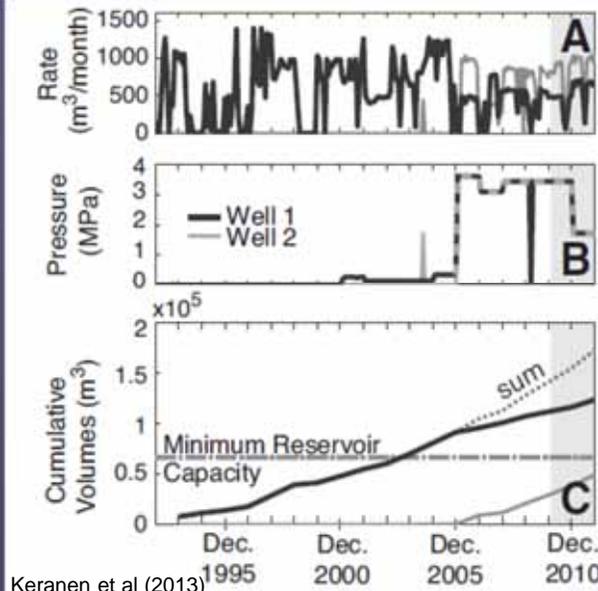
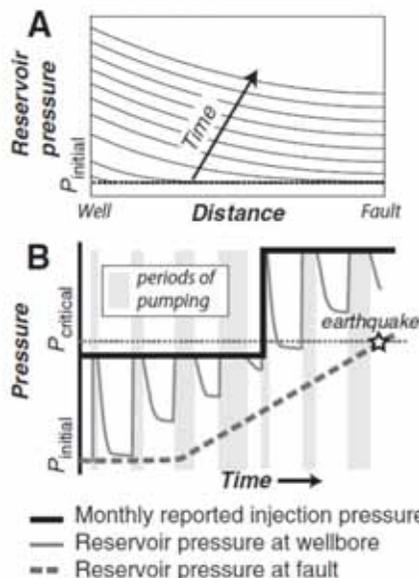
- Area analizzata da ICHESE molto ampia (4000 km²)
- Correlazione tra incremento pressioni/volumi e sismicità nel 2011 è relativa a sequenza di Sermide del luglio 2011 posta a distanze molto elevate (c. 30 km)
- Rara sismicità nella zona di Cavone ed assenza di fenomeni di propagazione progressiva della sismicità a seguito di un'ipotetica migrazione della fronte dell'onda di pressione



Sovrappressioni?



- Caso terremoto Oklahoma del novembre 2011 con Mw 5.7
- Reservoir compartmentalizzato con iniezione in vecchio giacimento di volumi di «waste water» (probabilmente derivati da operazioni di fracking 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 sovrappressioni**

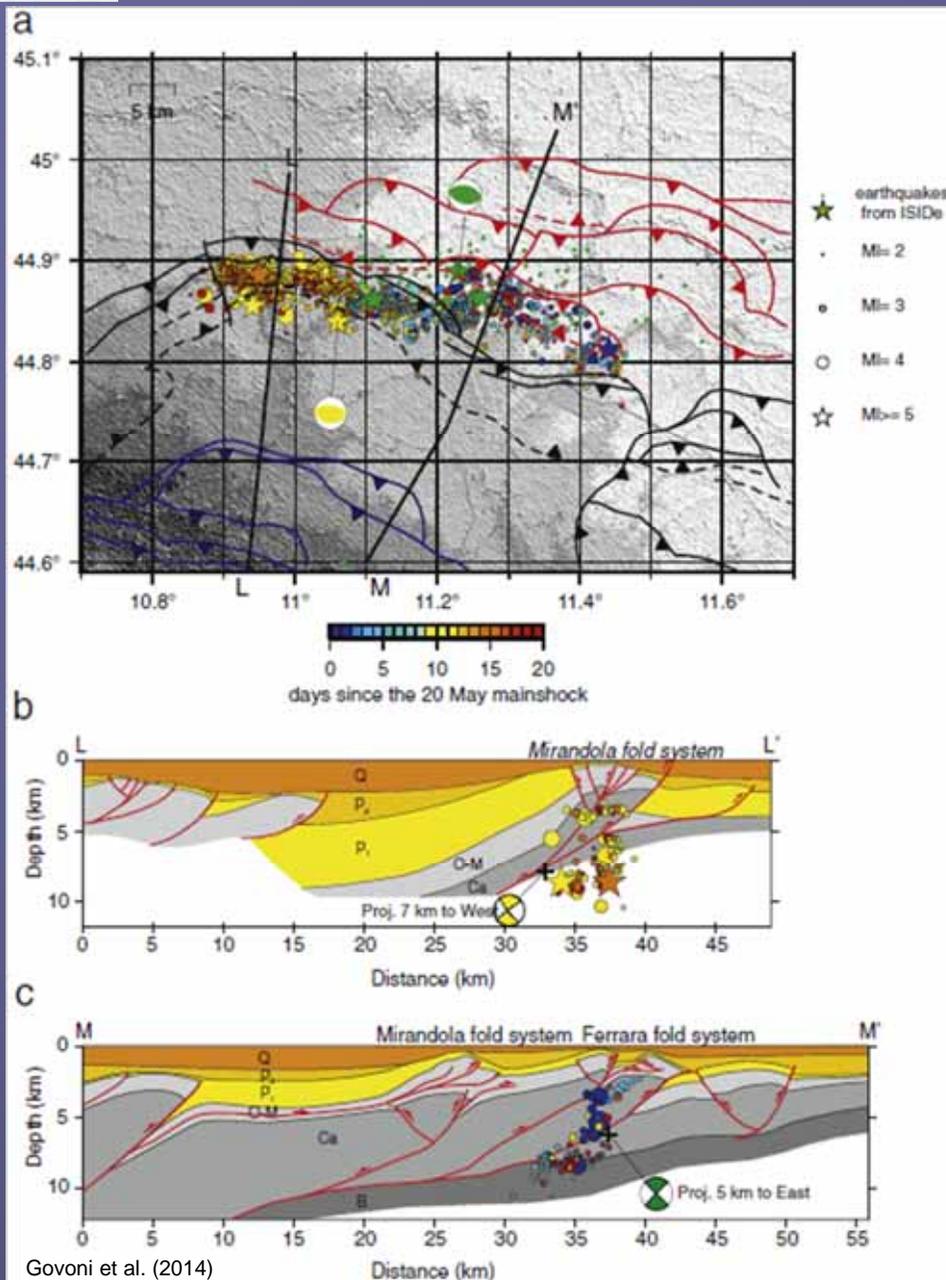


Keranen et al (2013)



ICHESE (2014)

Evoluzione Sequenza



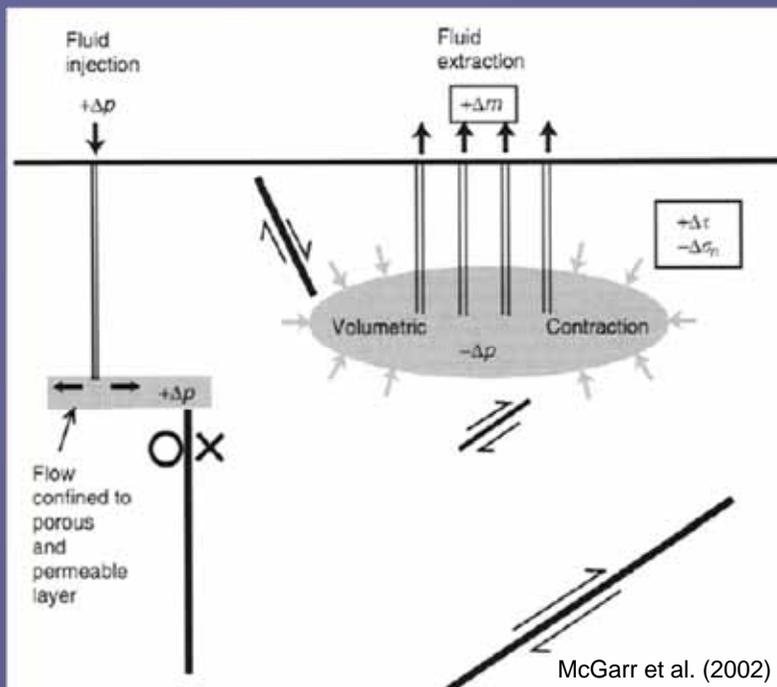
- Due eventi principali:
 - 20/05/14 (MI 5.9) si sviluppa sulla struttura di Ferrara (più esterna),
 - 29/05/14 (MI 5.8) sul quella di Cavone-Mirandola (più interna).
 - La faglia responsabile del secondo evento, secondo ICHESE, attivato dal trasferimento di sforzo (di solo 0.5 Mpa) seguito al primo evento
- 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



Commenti Ipotesi Innesco

- Nonostante i risultati della Commissione ICHESE, le ipotesi su un eventuale innesco del terremoto dell'Emilia del 20 maggio 2012 a causa delle operazioni connesse con la coltivazione del giacimento di Cavone presentano diversi elementi di controversa interpretazione
 - Reservoir in condizioni idrostatiche con acquifero regionale molto esteso caratterizzato da elevate permeabilità ed assenza di sovrappressioni generate dalla reiniezione a Cavone 14
 - Assenza di microsismicità nella zona di Cavone e di evidenze della migrazione progressiva della sismicità causata dall'ipotetica diffusione della perturbazione
 - Due eventi principali: il primo si sviluppa sulla struttura di Ferrara, il secondo su quella di Mirandola. Comportamento poco plausibile nel caso di innesco dovuto alle attività di Cavone
 - Area considerata (4000 km²) ha dimensioni talmente ampie per cui è difficile immaginare processi fisici responsabili della correlazione statistica tra attività a Cavone 14 e eventi posti a 30 km (e.g., Sermide del luglio 2011)
- Come suggerito anche da ICHESE, rimane necessario sviluppare un modello integrato di reservoir (fluidodinamico e geomeccanico) per dimostrare con una simulazione numerica l'ipotesi dell'innesco dell'evento del 20 maggio

Conclusioni 1/3: 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 iniezione 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 $ML \leq 2$ 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 $ML \leq 5$ sviluppati sopra e sotto il reservoir a distanze contenute dal giacimento
3. Per alcuni eventi con $ML \geq 6$ (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, 2012):

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

In Italia riportato un solo caso (Caviaga), affetto da dubbi sulla effettiva interpretazione come terremoto innescato da attività estrattiva, più terremoto Emilia del maggio 2012

Table 3.4 Summary Information about Historical Felt Induced Seismic Caused by or Likely Related to Energy Technology Development in the United States NRC (2012)

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 ^e	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 ^f	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

^dNote 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

- Nei limiti dell'errore nelle localizzazioni epicentrali e della completezza dei database sismologici disponibili, 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 off-shore (interessate da note sorgenti sismogenetiche) e nella zona di Correggio
 - Assenza di applicazioni di fracking s.s. per assenza di significativi 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
- Caviaga e con tutta probabilità un terremoto di origine naturale e, nonostante i risultati della Commissione ICHESE, le ipotesi su un eventuale innesco del terremoto dell'Emilia del 20 maggio 2012 presentano diversi elementi controversi e necessitano comunque di essere dimostrate con un modello integrato (fluidodinamico e geomeccanico) di reservoir
- 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