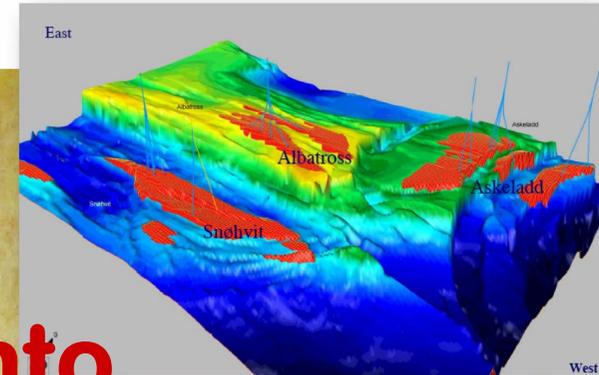
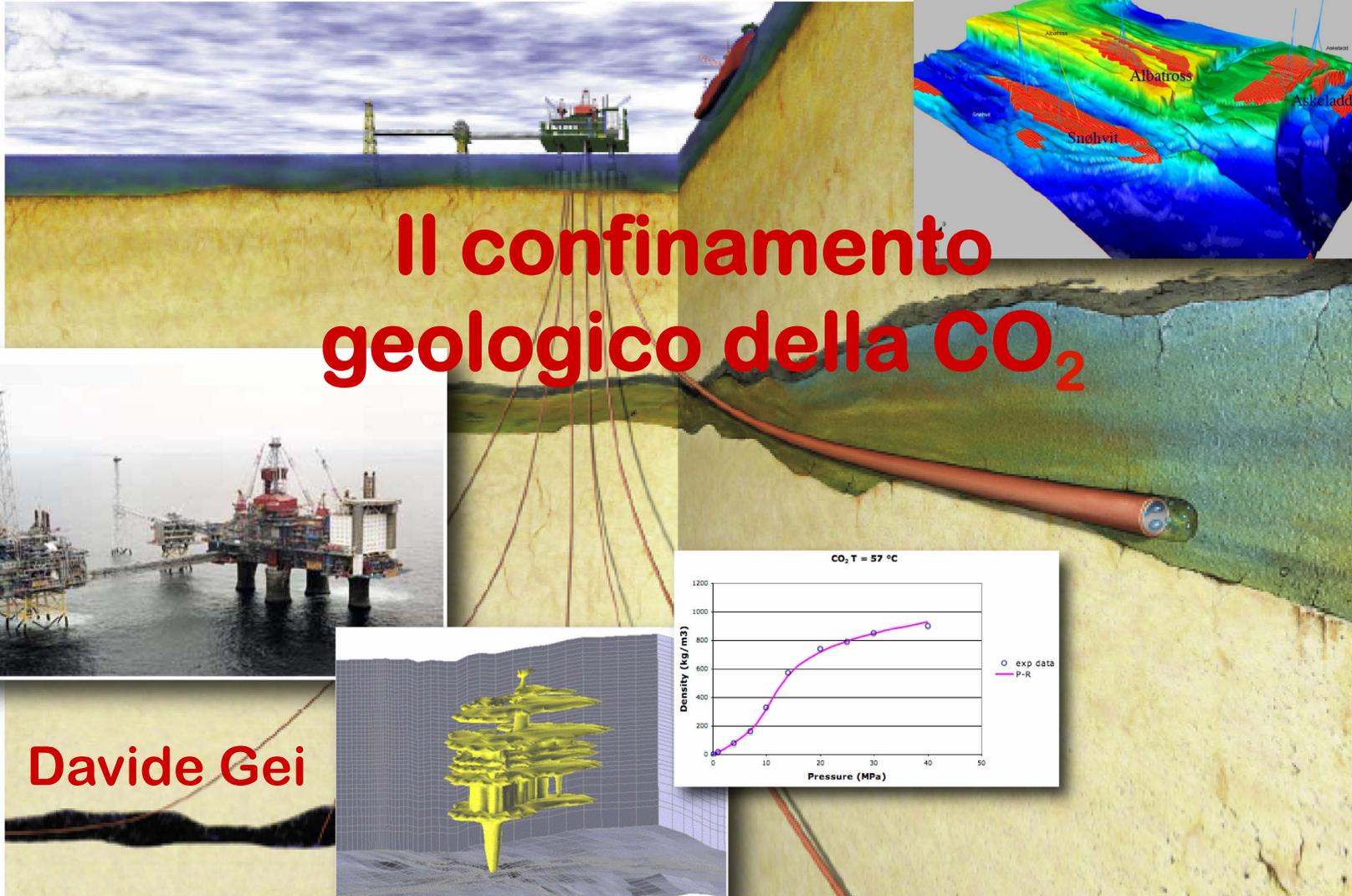
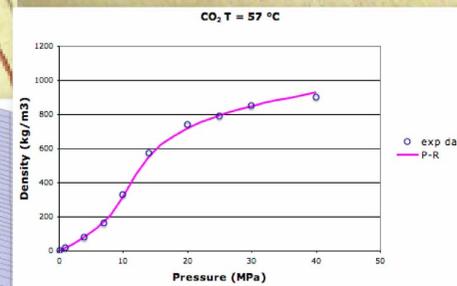
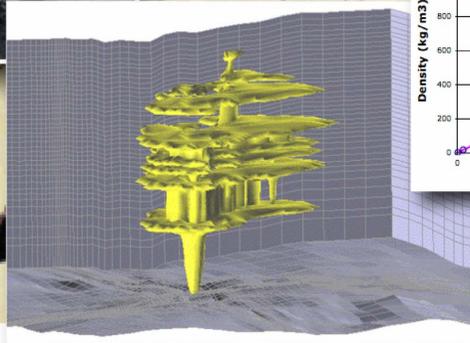


Il confinamento geologico della CO₂



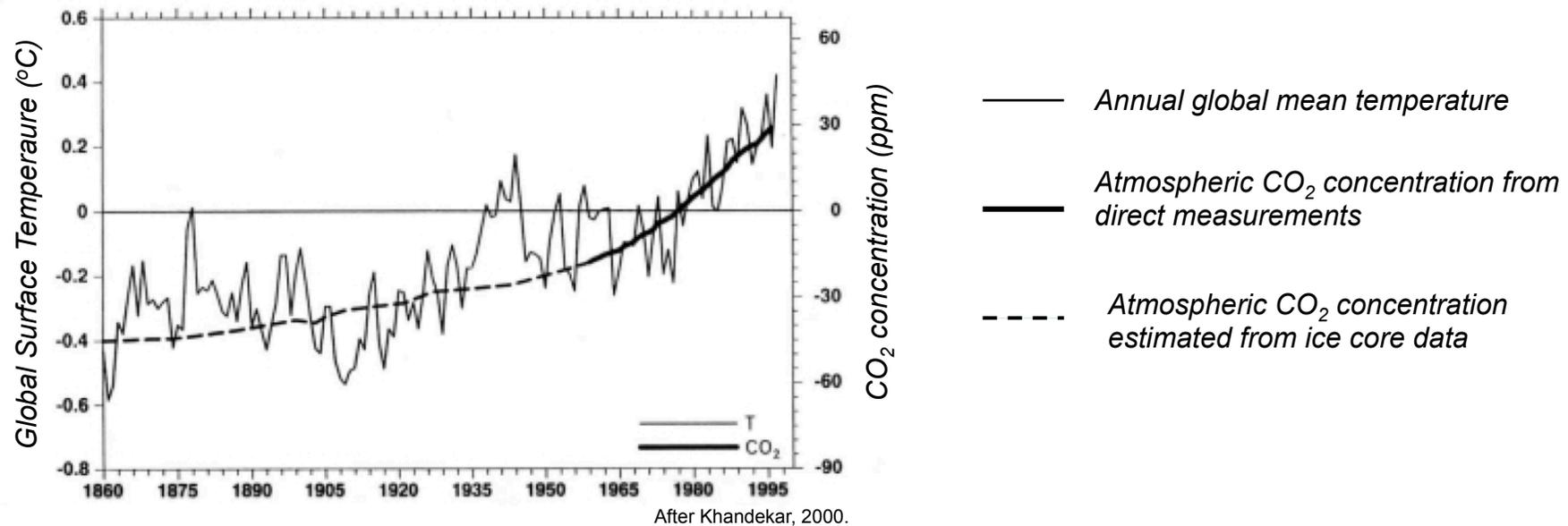
Davide Gei



Pictures from: Chadwick et al., 2008

Perché si parla di CO₂?

La CO₂ é un gas serra, e viene immesso nell'atmosfera in grande quantità a causa dell'attività antropica. In particolare la CO₂ é uno dei prodotti di scarto della combustione degli idocarburi. La concentrazione atmosferica della CO₂ é aumentata da 280 ppm in epoca pre-industriale ai 365 ppm dei giorni nostri (Pruess et al., 2001). L'incremento di anidride carbonica é ritenuto una della cause dei recenti mutamenti climatici a livello globale. Protocollo di Kyoto.

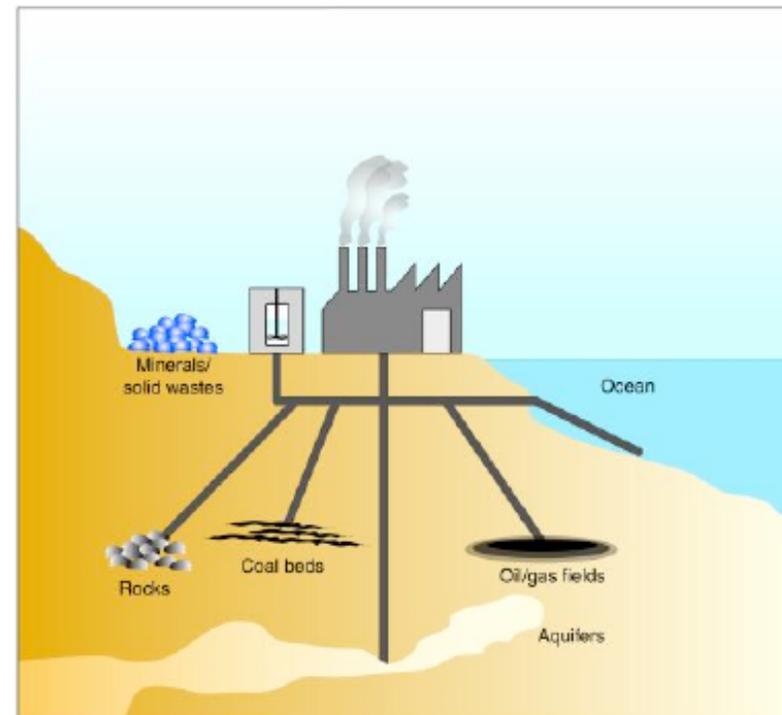


Quali possibili rimedi?

- Riduzione delle emissioni (fonti di energia alternative, risparmio energetico, ecc.)
- Confinamento (storage) di una parte della CO₂ prodotta

Confinamento della CO₂. Dove?

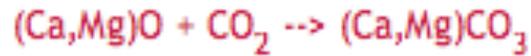
- Nei *minerali*
- Negli oceani
- Nel sottosuolo



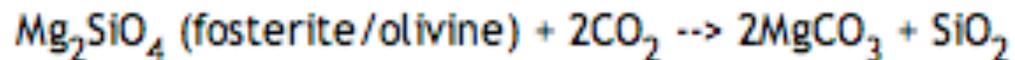
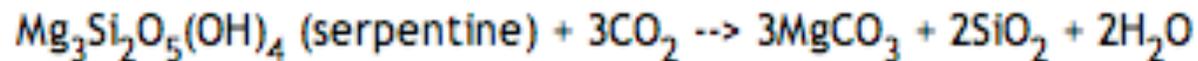
Confinamento della CO₂

Mineral storage

Consiste nel far reagire chimicamente l'anidride carbonica con minerali contenenti Ca e Mg intrappolandola sotto forma di carbonati. È una versione accelerata dei processi atmosferici che in modo naturale hanno ridotto la concentrazione della CO₂ ai livelli attuali dopo la formazione della Terra. I minerali prodotti sono termodinamicamente stabili determinando uno stoccaggio permanente nel tempo.



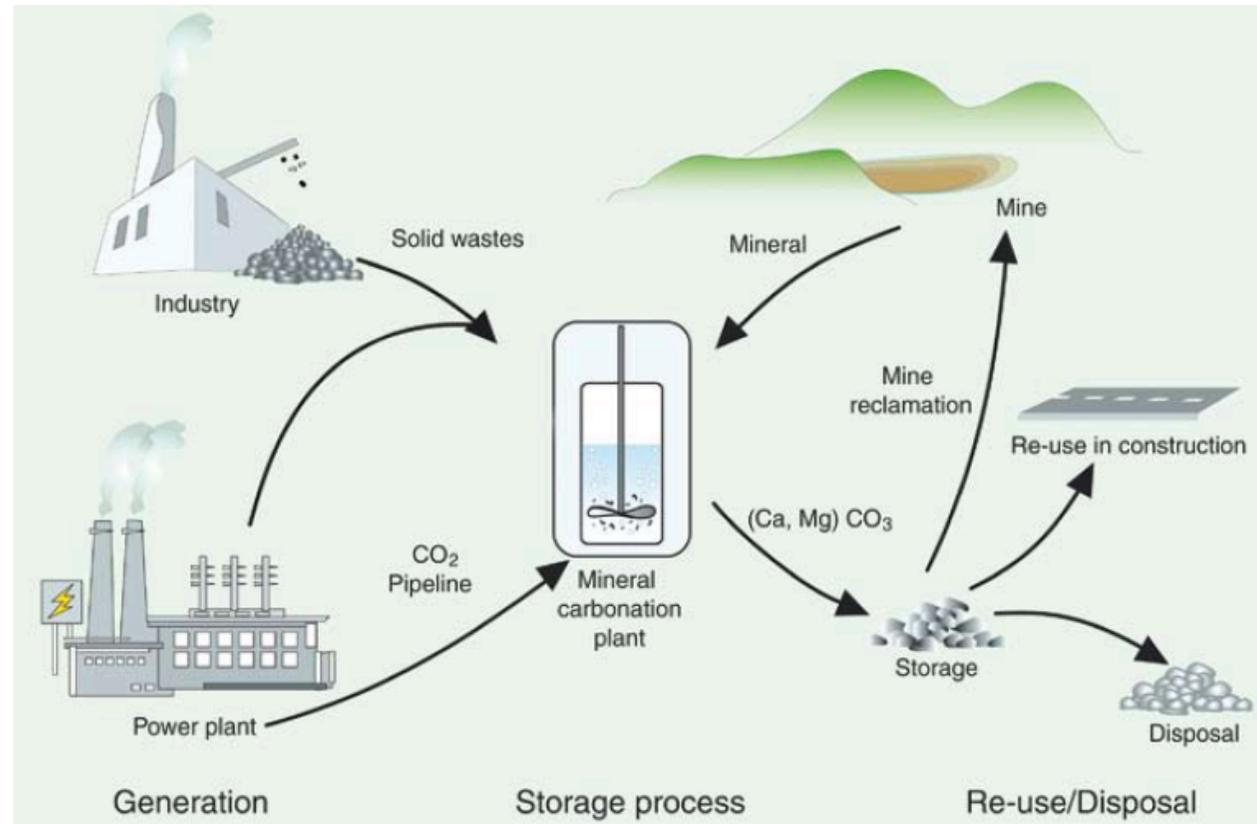
Alcuni minerali utilizzabili per reagire con l'anidride carbonica sono:



Si possono usare anche ossido di Ca e Mg presenti in scarti industriali (industrial wastes).

Confinamento della CO₂

Mineral storage



Una centrale termoelettrica dotata di impianto di carbonatazione richiede un surplus di energia variabile tra il 60 ed il 180% in più rispetto ad una centrale che emette la CO₂ in atmosfera (<http://www.greenfacts.org/en/co2-capture-storage/l-3/7-mineral-carbonation.htm>).

Confinamento della CO₂

Ocean storage

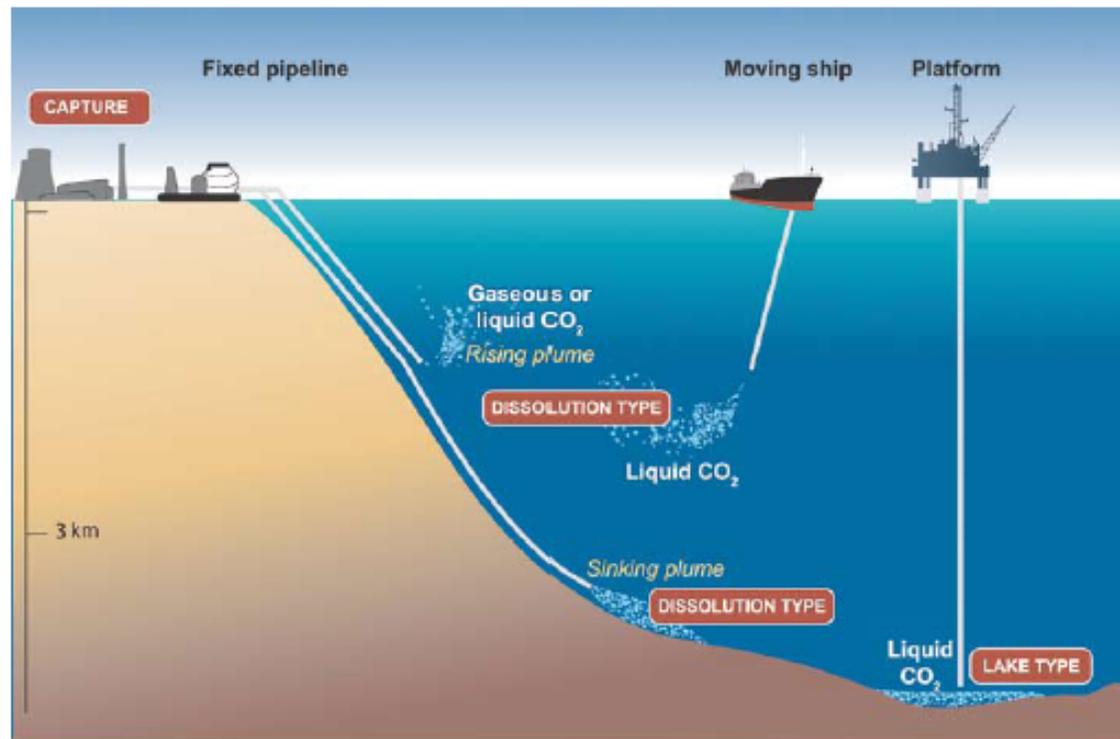
Gli oceani hanno in soluzione enormi quantità di anidride carbonica e potenzialmente possono assorbire tutto l'eccesso fin'ora prodotto dall'attività umana. La dissoluzione naturale attraverso la superficie dell'oceano è molto lenta e determina un picco di concentrazione atmosferica che dura qualche centinaio d'anni. È necessario forzare il processo naturale iniettando l'anidride carbonica nelle profondità oceaniche (> 1000 m) dove, si pensa, possa rimanere isolata dall'atmosfera per secoli.

La CO₂ dissolta negli oceani entra nel ciclo globale del carbonio con tutti i possibili problemi che questo comporta. Ad esempio:

- Tendenza al riequilibrio con la concentrazione atmosferica
- Variazione del PH dell'acqua (l'incremento della CO₂ atmosferica ha già determinato un incremento di 0.1 del PH degli strati oceanici superficiali)
- Interazione con l'ecosistema marino

Confinamento della CO₂

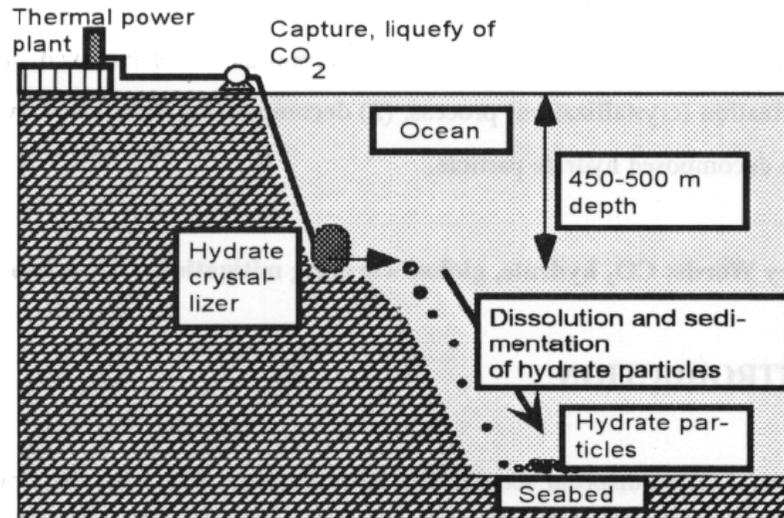
Ocean storage



L'anidride carbonica a profondità > 300 m si trova allo stato liquido ed é piú densa dell'acqua marina. Tende a formare dei *laghi* sui fondali oceanici ritardandone la dissoluzione.

Confinamento della CO₂

Ocean storage - CO₂ hydrate



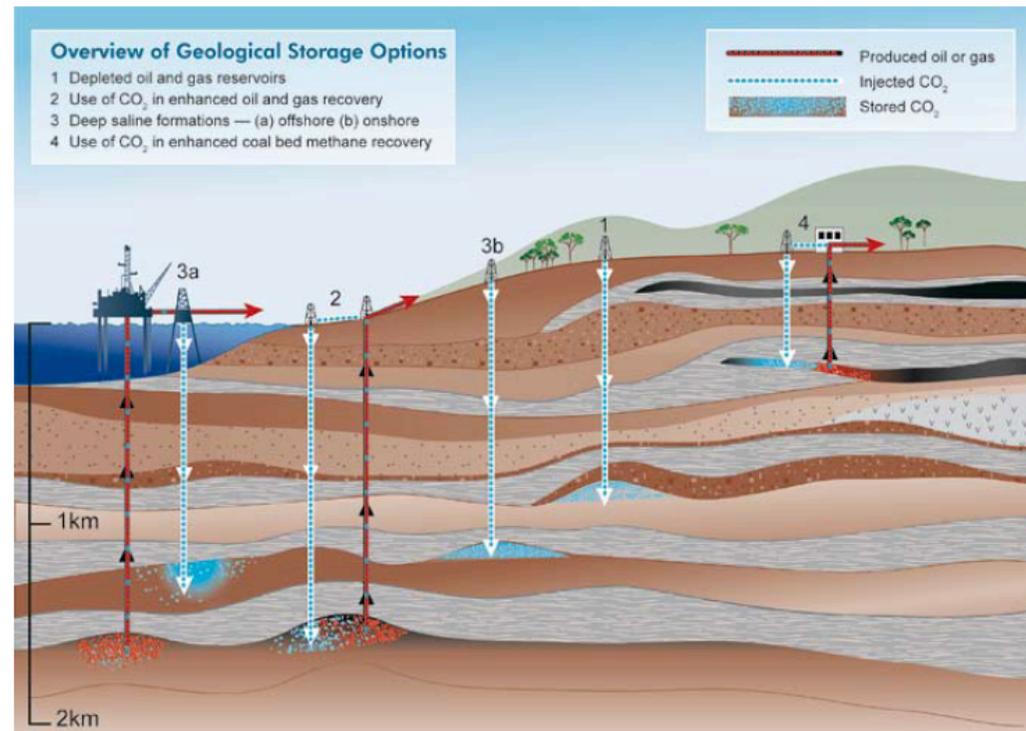
Il gas idrato di CO₂ (solido) ha una densità superiore (8-10%) a quella dell'acqua marina ed affonda. Il gas idrato è stabile in un certo range di P (moderatamente alta) e T (moderatamente bassa) e in acqua marina saturata di anidride carbonica. Gli oceani non sono saturi di CO₂, quindi processo di discesa l'idrato dissocia e libera l'anidride carbonica (ed acqua dolce). Il tasso di dissoluzione è basso e controllabile dal dalla velocità di discesa e dalle dimensioni delle particelle di gas idrato. L'utilizzo degli idrati di CO₂ riduce l'impatto ambientale legato all'immissione "forzata" e rapida di anidride carbonica negli oceani.

Confinamento della CO₂

Confinamento geologico (geological storage)

L' anidride carbonica può essere confinata nel sottosuolo in:

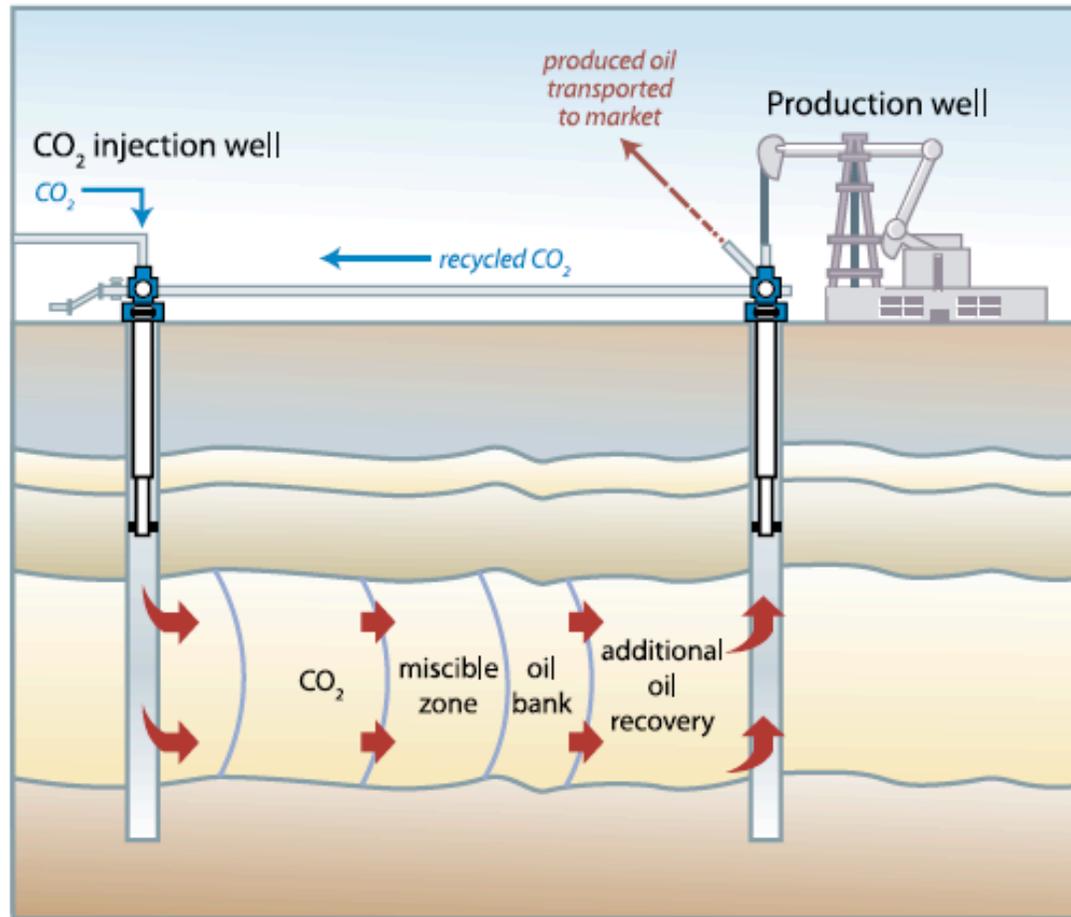
- Giacimenti di gas e/o olio esausti
- Giacimenti di gas e/o olio in produzione (enhanced recovery)
- Acquiferi
- Livelli di carbone economicamente non sfruttabili (enhanced coal beds methane recovery)



After Cook, 1999.

Confinamento della CO₂

Oil and gas enhanced recovery



Cosa si fa oggi e cosa si farà domani?

CCS component	CCS technology	Research phase ¹³	Demonstration phase ⁷	Economically feasible under specific conditions ⁵	Mature market ⁶
Capture	Post-combustion			X	
	Pre-combustion			X	
	Oxyfuel combustion		X		
	Industrial separation (natural gas processing, ammonia production)				X
Transportation	Pipeline				X
	Shipping			X	
Geological storage	Enhanced Oil Recovery (EOR)				X ^a
	Gas or oil fields			X	
	Saline formations			X	
	Enhanced Coal Bed Methane recovery (ECBM)		X		
Ocean storage	Direct injection (dissolution type)	X			
	Direct injection (lake type)	X			
Mineral carbonation	Natural silicate minerals	X			
	Waste materials		X		
Industrial uses of CO ₂					X

Confinamento geologico – meccanismi di stoccaggio

I meccanismi principali per cui la CO₂ viene intrappolata sono:

- Trapping strutturale e stratigrafico per cui la migrazione della CO₂ libera (free CO₂) determinata dalla sua minore densità rispetto alla brine ne determina l'accumulo in trappole.
- Residual saturation trapping determinato da assorbimento (adsorption) di molecole di CO₂ sulle superfici dei minerali o per effetto di forze di capillarità.
- Dissoluzione della CO₂ nella brine (salamoia)
- Trapping geochimico secondo cui la CO₂ disciolta nella brine reagisce con i minerali della roccia e precipita sotto forma di carbonati.

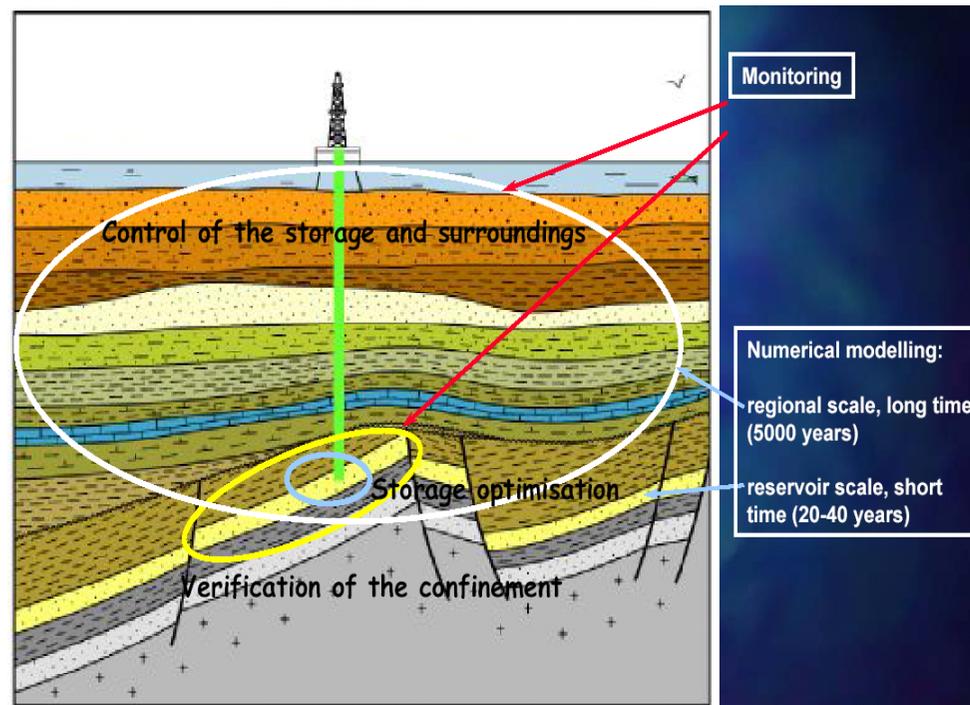
Confinamento geologico - aspetti da valutare

L'immissione di anidride carbonica nel sottosuolo comporta la valutazione di numerosi fattori tra cui:

- Reazione della CO_2 con la roccia di copertura e/o con la roccia serbatoio che determina precipitazione di carbonati riduzione della porosità e permeabilità
- Variazione del PH dei fluidi nei pori della roccia (acidificazione)
- Reazione della CO_2 con il cemento del casing
- Riattivazione di faglie per la variazione del campo degli sforzi delle rocce
- Incremento della produzione di idrocarburi (enhanced recovery)
 - Fluidificazione dell'olio
 - Ripristino delle pressioni in un giacimento a gas
 - Produzione di metano da livelli di carbone economicamente non sfruttabili

Confinamento geologico: cosa fare e quando

PRIMA: Studi integrati che coinvolgono la geologia, la geofisica, la geochemica, la fluidodinamica, la biologia per individuare il sito adatto, e modellare il comportamento a lungo termine della CO₂ e l'interazione con le rocce incassanti (la CO₂ acidifica l'ambiente!!!)



DURANTE E DOPO: monitoraggio integrato geofisico, geochemico, biologico, ecc., per identificare possibili perdite

Venuta a giorno (leakage) della CO₂

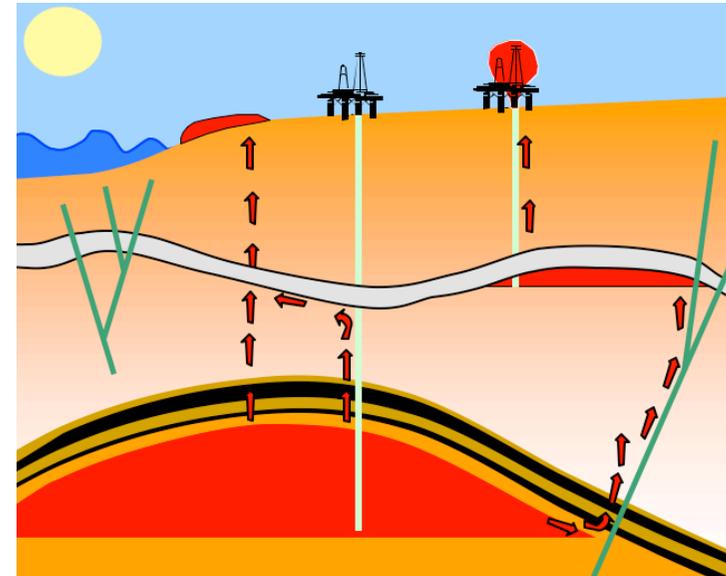
- Risalita lungo faglie
- Risalita attraverso pozzi
- Risalita diffusa per inefficienza della roccia di copertura

Pericoli immediati

L'esposizione ad aria con più del 7-10 % in volume di CO₂ causa la morte o danni alla salute.

Pericoli a lungo termine

Una contaminazione dello strato superficiale del suolo (acidificazione del suolo) potrebbe determinare la morte di piante e di animali che vivono nel sottosuolo e la contaminazione dell'acqua di falda (CO₂ in soluzione determina riduzione del PH e conseguente dissoluzione ed alterazione di minerali con conseguente presa in carico di metalli pesanti).



In ambiente marino: Gruppo BIO OGS

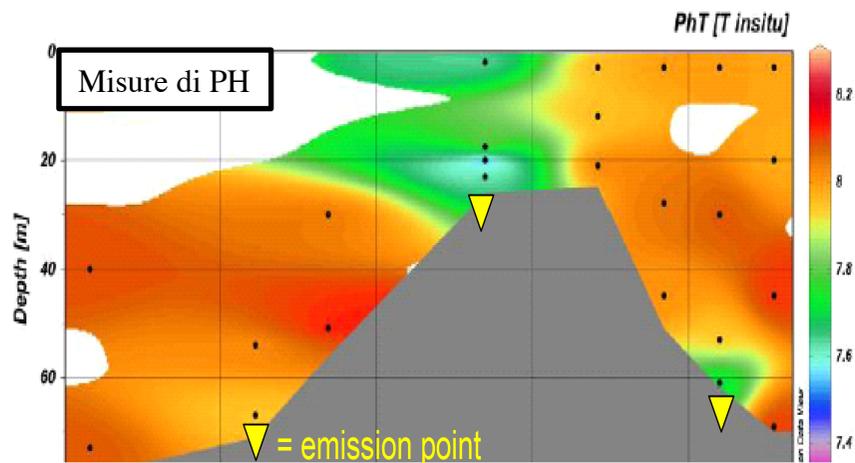
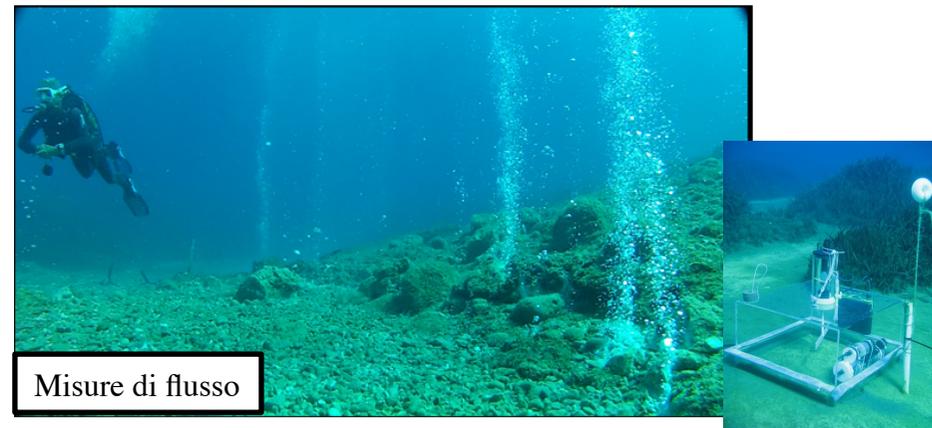
Esperimenti in laboratorio

- Breve termine
- Massimo controllo

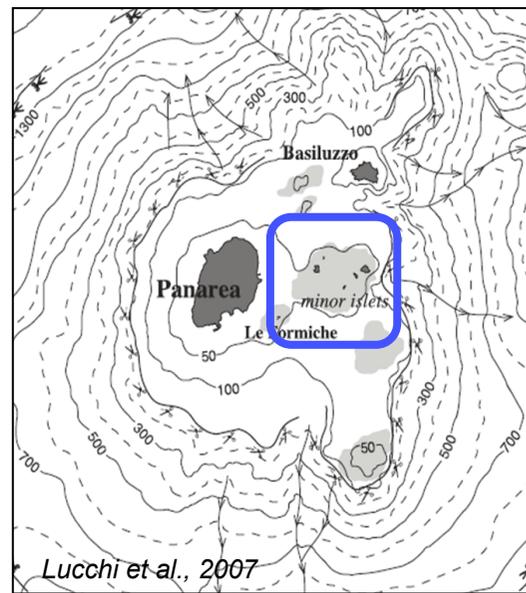
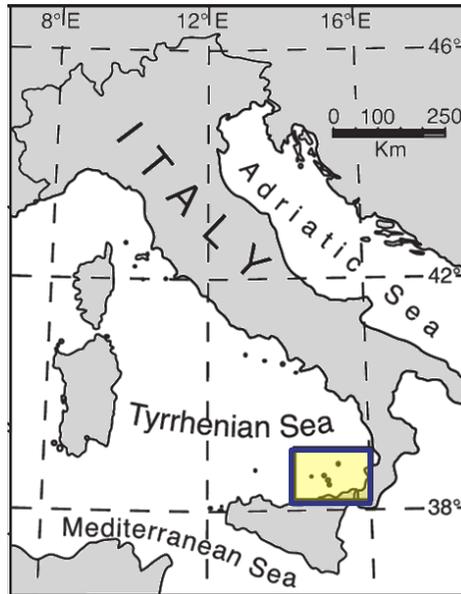


Laboratori naturali (Panarea)

- Lungo termine
- Condizioni naturali

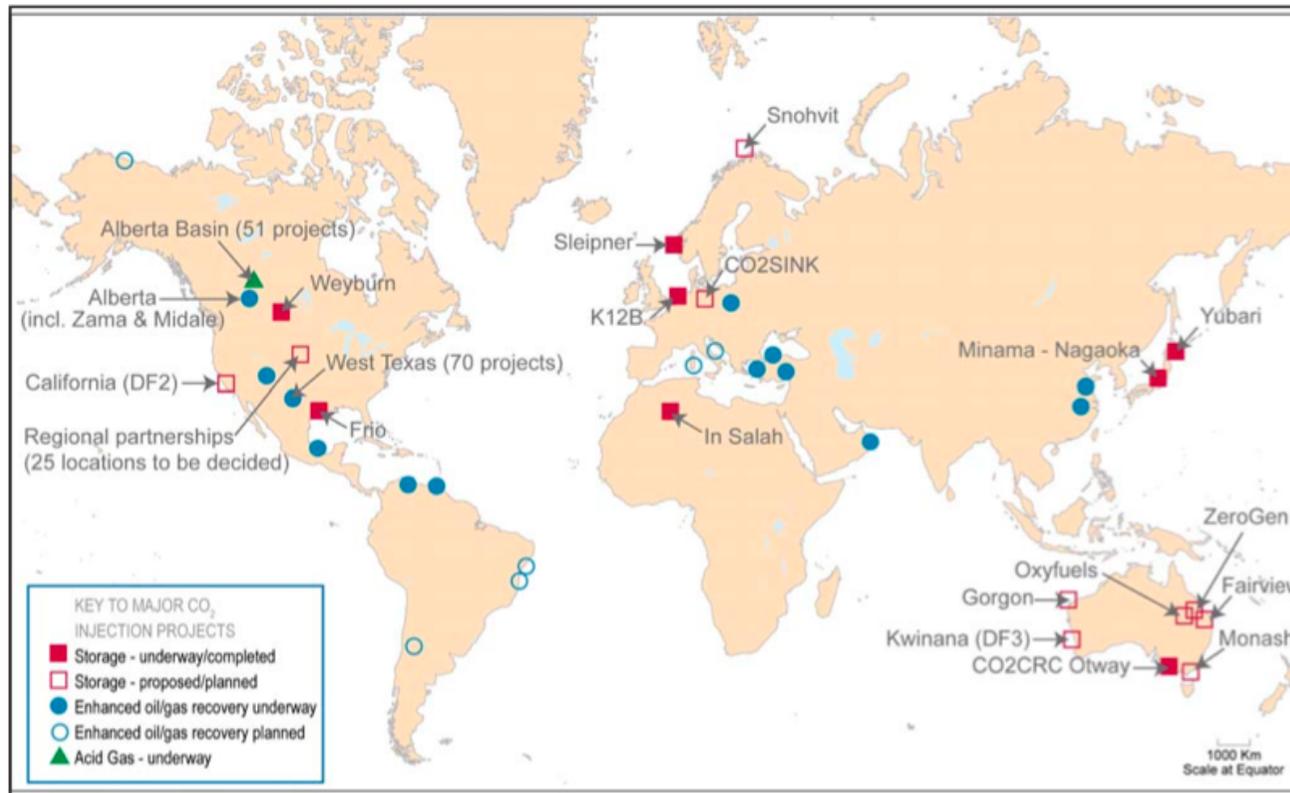


Panarea – NatLab



- *Panarea, located just north of the Island of Sicily, is one of the Aeolian Islands, a series of volcanic islands and seamounts that also includes Stromboli and Vulcano*
- *It is located along NE-SW trending extensional faults*
- *It is the emergent part of a submarine volcano that is 1200 m high and 20 km wide*
- *Although gas leakage occurs in many locations, the most studied are to the east of the island near a series of islets (e.g. Bottaro Island)*

Confinamento geologico - progetti in corso



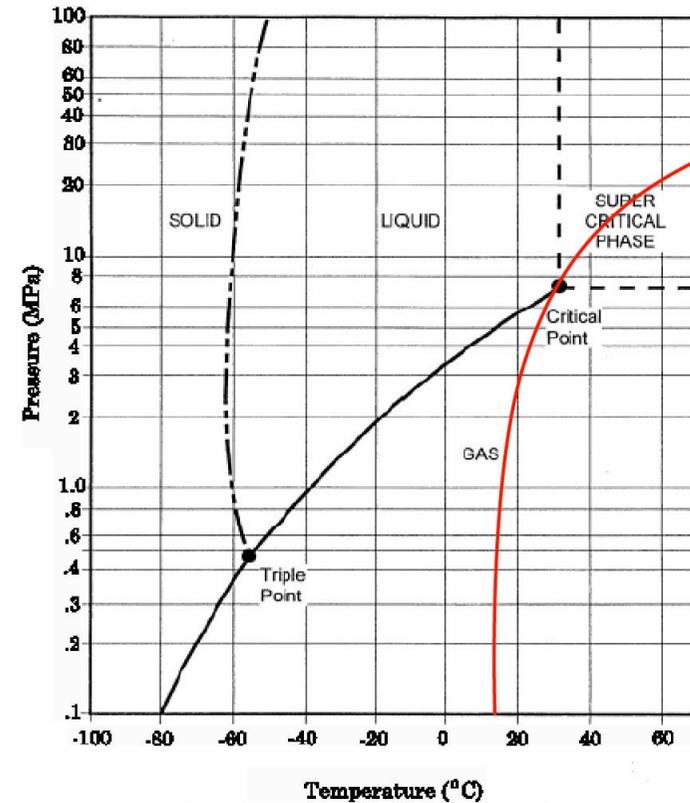
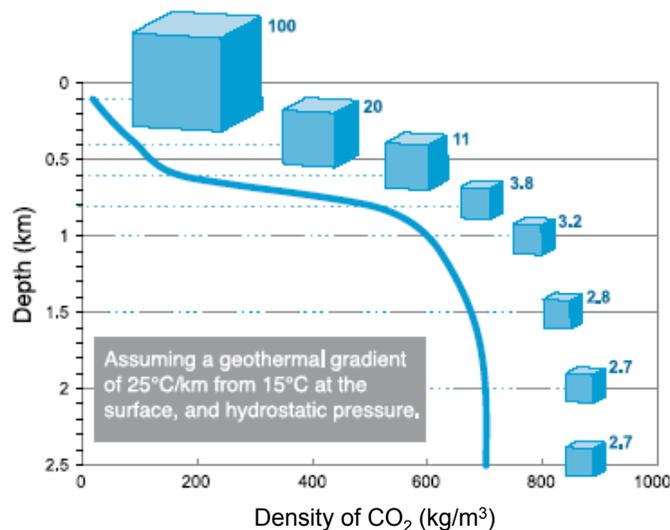
Source Price & Smith, 2008, after CO2CRC www.co2crc.com.au/

Weyburn: > 5 Mt di CO₂ in un giacimento di olio esausto
Sleipner: > 15 Mt di CO₂ in un acquifero (Giugno 2015)

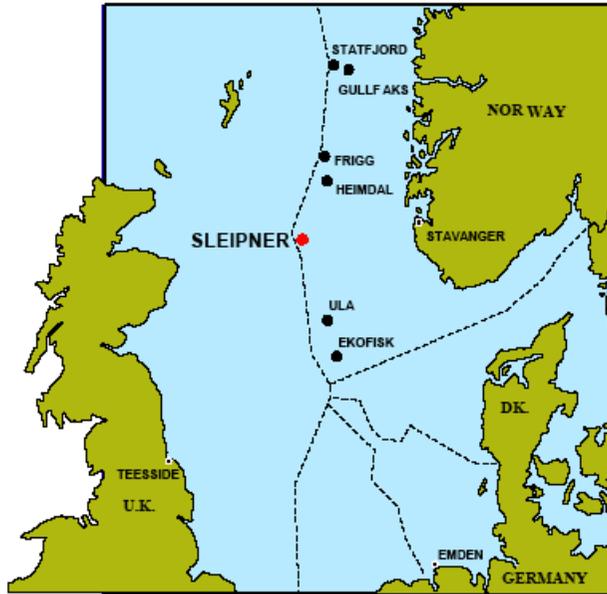
Stato della CO₂

Un incremento di pressione a temperatura costante porta un gas a condensare e quindi a passare allo stato liquido. Per ciascun gas esiste un valore di temperatura al di sopra del quale il gas non può condensare, qualunque sia la pressione applicata. Si dice che il gas si trova in *condizioni supercritiche*, ed ha proprietà (compressibilità, viscosità) proprie dello stato gassoso, ma densità simile a quella di un liquido.

Per la CO₂ temperatura e pressione supercritiche sono, rispettivamente, 31.04 °C e 72.85 atm.



Sleipner



Giacimento ad olio e gas operato da Statoil + partners
(Exxon, Hydro e Total)

Problema:

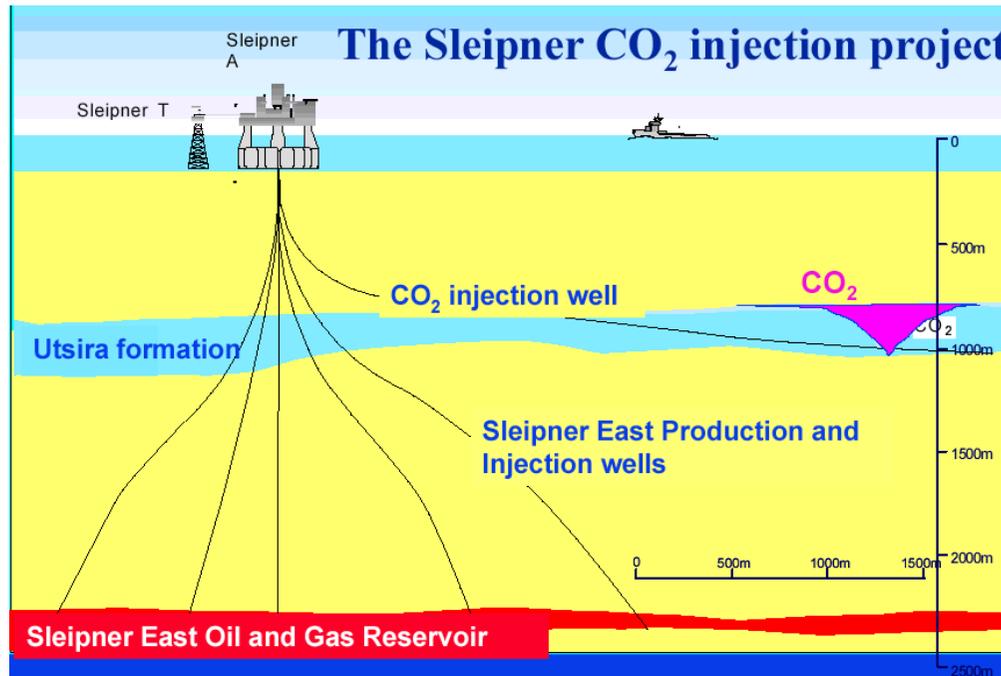
- Elevato contenuto (4-9%) di CO₂ dai fluidi in produzione
- La Norvegia tassa l' emissione di CO₂ nell' atmosfera

Soluzione:

Iniezione della CO₂ prodotta in un acquifero posto a minor profondità rispetto al reservoir

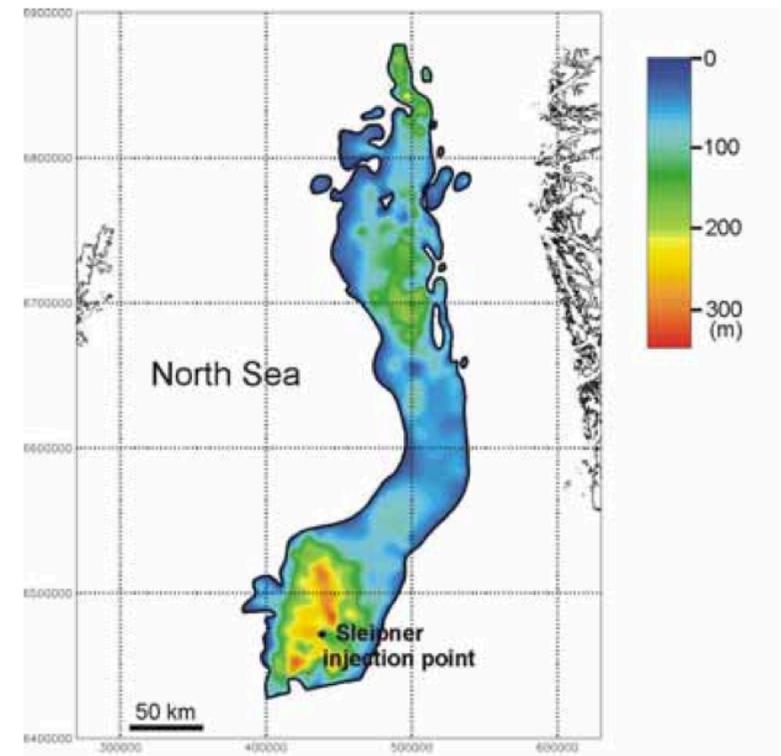
- CO₂ Injection started in 1996
- 1 million tons (Mt) /year
- Total storage (planned) 20 Mt

Le sabbie di Utsira



Estensione delle sabbie di Utsira: 26000 km²
 Profondità dell'aquifero: 800 - 1000 m
 Spessore della formazione al punto di iniezione: 200 m

Sabbie non consolidate con porosità variabile tra 0.30 e 0.42
 Diffuse lenti ricche in argilla di spessore variabile tra 1 e 2 metri,
 in generale non correlabili tra i pozzi. Il caprock è costituito dalla
 formazione Nordland Shale.

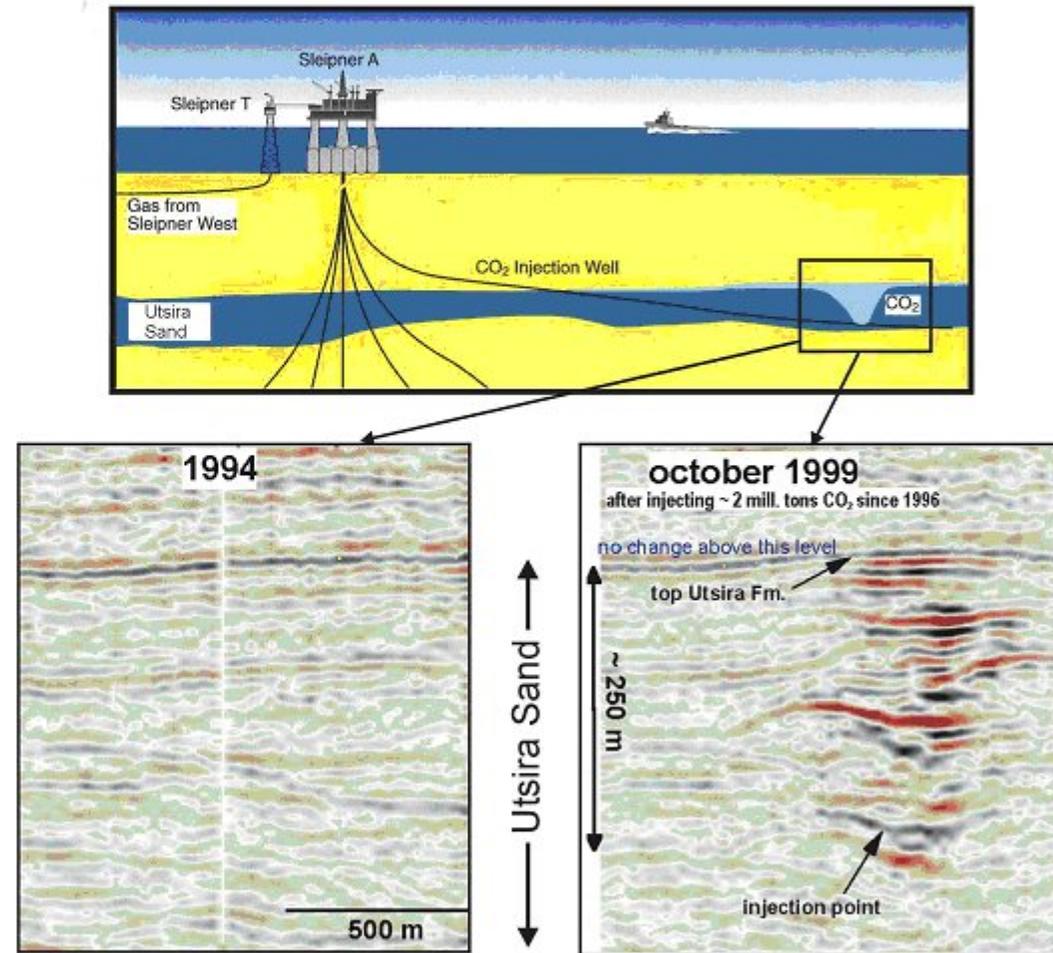


Limiti e spessore delle sabbie di Utsira

Sleipner

La CO_2 in condizioni supercritiche ha una densità compresa tra il 50 e l'80% della densità della brine (acqua salata). L'anidride carbonica tenderà a salire verso il top dell'acquifero. Successivamente la CO_2 entra in soluzione nell'acqua (su una scala temporale variabile tra le decine e le centinaia d'anni). L'acqua con la CO_2 in soluzione è più pesante della brine e quindi tenderà verso la base dell'acquifero, riducendo i rischi di venuta a giorno.

Questo meccanismo, assieme alla deposizione di carbonati per reazione della CO_2 con i minerali delle rocce, viene detto *geochemical trapping*.



Sleipner - monitoraggio sismico 4D (time lapse seismic)

- 1994 (prima dell' iniezione di CO₂)
- 2001 (4.26 Mt - milioni di tonnellate)
- 2004 (6.84 Mt - milioni di tonnellate)
- 2006 (8.40 Mt - milioni di tonnellate)

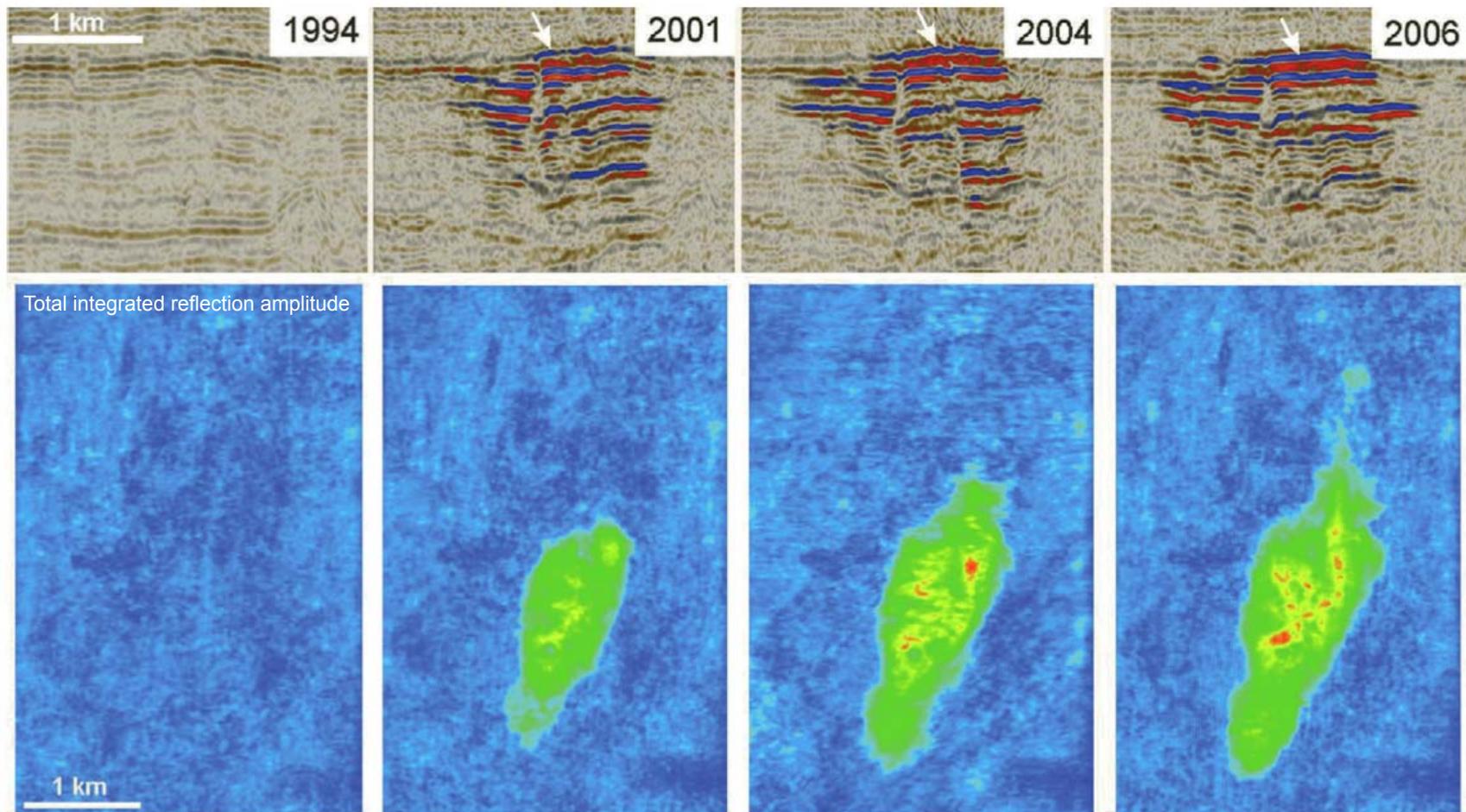
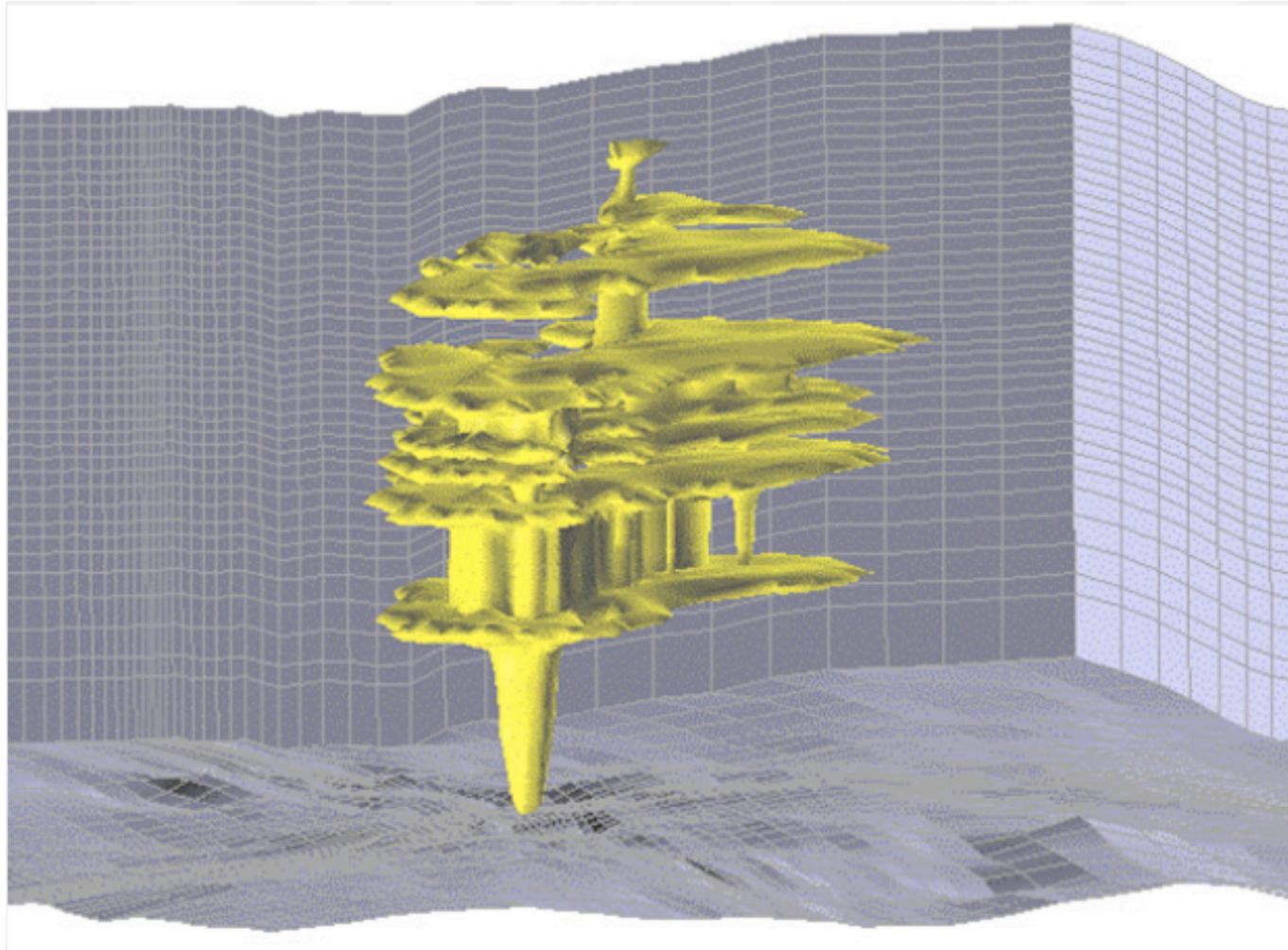


Figure after Chadwick et al., 2009

Sleipner



3D simulated smoothed image of the CO₂ saturation after 3 years of injection
Source: SACS, Best Practice manual 2003

Monitoraggio sismico

Può essere fatto da superficie (molto comune) o da pozzi di osservazione.

Ha lo scopo di fornire una immagine (imaging) del plume di CO₂.

La sua efficacia dipende da molti fattori, e.g.:

- proprietà della roccia che costituisce il reservoir
- spessore del reservoir
- fluidi presenti nel reservoir prima dell'iniezione (e.g. brine, oil, CH₄)
- presenza di altri riflettori in prossimità del top o bottom del reservoir

Studi di fattibilità per un monitoraggio sismico efficace

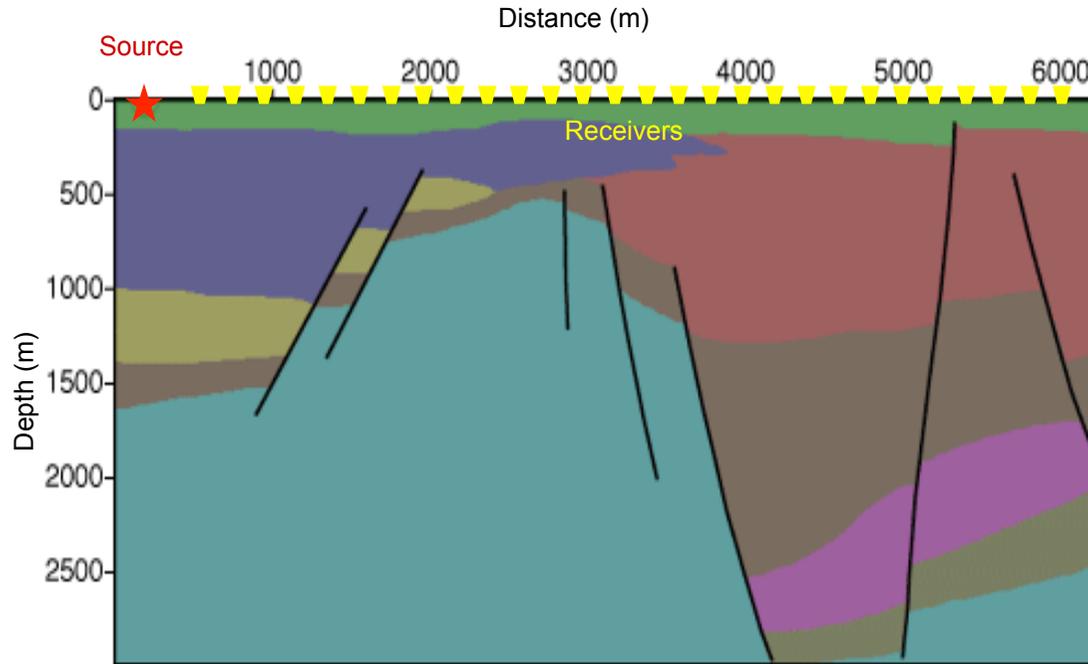
Caratterizzazione sismica dell'overburden (strati superficiali), della roccia di copertura e della roccia serbatoio per ottimizzare i parametri di acquisizione al monitoraggio sismico durante la fase di iniezione di CO₂ e successivamente.

Caratterizzazione sismica = determinazione delle proprietà sismiche (V_p , V_s , ρ) in funzione della concentrazione di CO₂

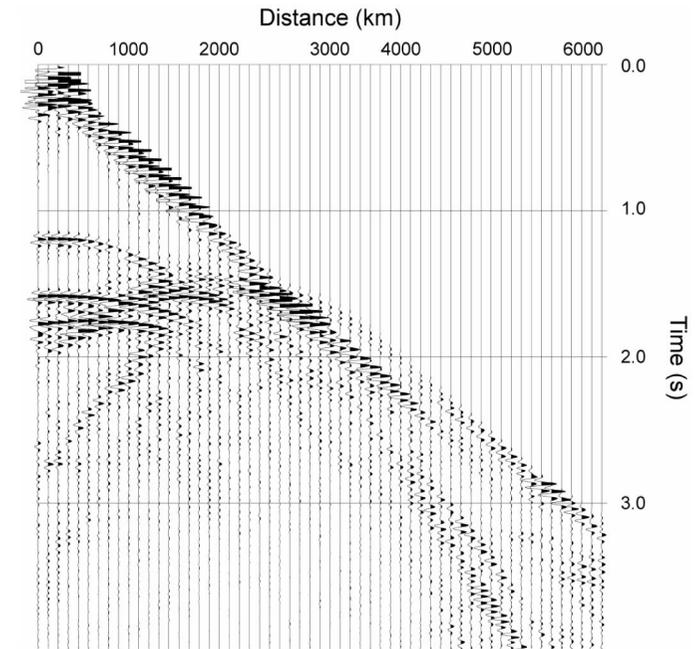
Analisi della sensibilità delle proprietà sismiche e degli algoritmi di processing sismico ed inversione tomografica a piccole variazioni della concentrazione di CO₂ (inietto 5% in volume di CO₂; la vedo con la sismica?)

Generalmente si usano tecniche di seismic numerical modelling, tomografia sismica e fisica delle rocce.

Simulazione numerica della propagazione d' onda (numerical modelling)



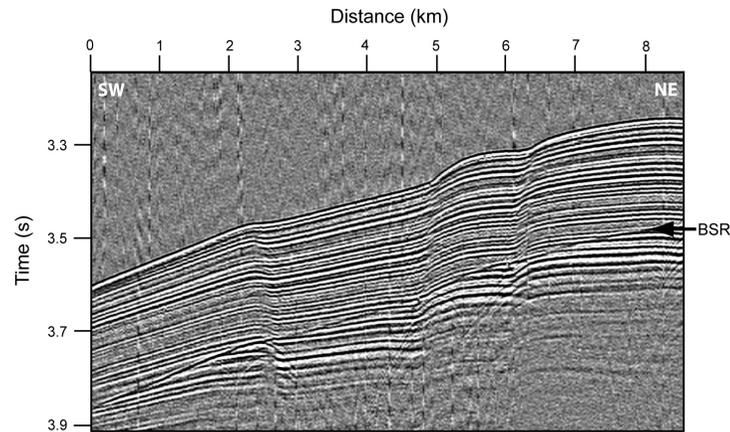
Geological model



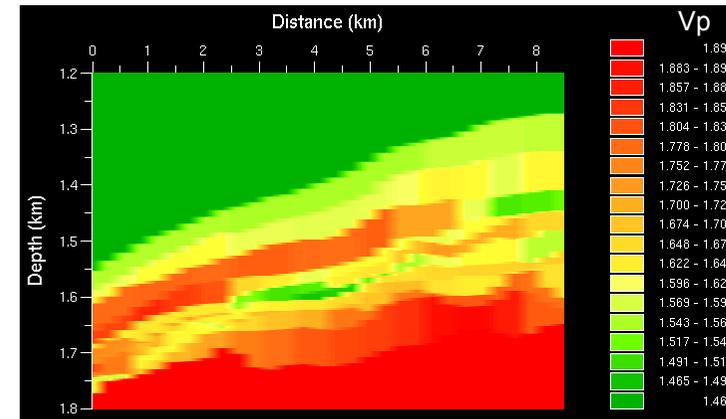
Shot gather
Sismogramma sintetico

Il seismic numerical modelling si basa su algoritmi che simulano la propagazione di onde sismiche nel sottosuolo. Simulano una acquisizione sismica reale. Necessita di conoscere il modello geologico (geometria e proprietà sismiche delle rocce come V_p , V_s , densità, ecc).

La tomografia sismica



Line 1 - Hy 02



Sezione sismica
(distanza-tempo)



Inversione tomografica

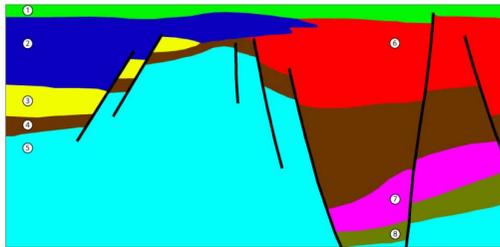
Campo di velocità sismiche V_p o V_s
(distanza-profondità)

La tomografia sismica è una procedura che consente di ricostruire campi di velocità dai dati sismici. Consiste in due fasi:

- Identificazione delle discontinuità acustiche (orizzonti) e determinazione dei traveltimes (picking)
- Determinazione del campo di velocità attraverso procedure iterative.

Studi di fattibilità

Geological model



Geometrical model

Physical properties of rocks
Fluid saturation
Physical properties of fluids



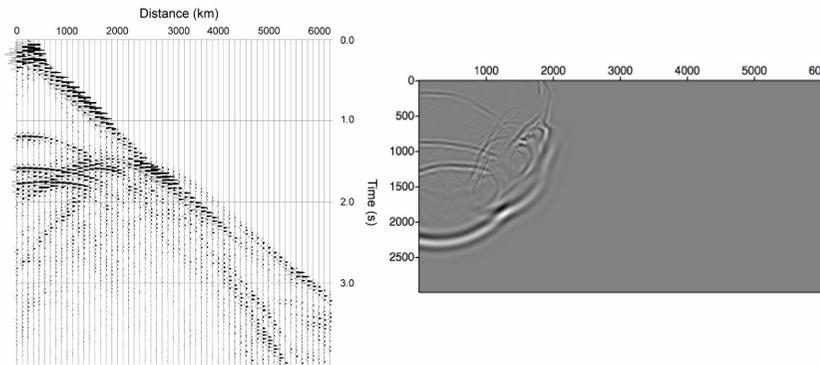
Seismic properties of formations

Optimal acquisition parameters

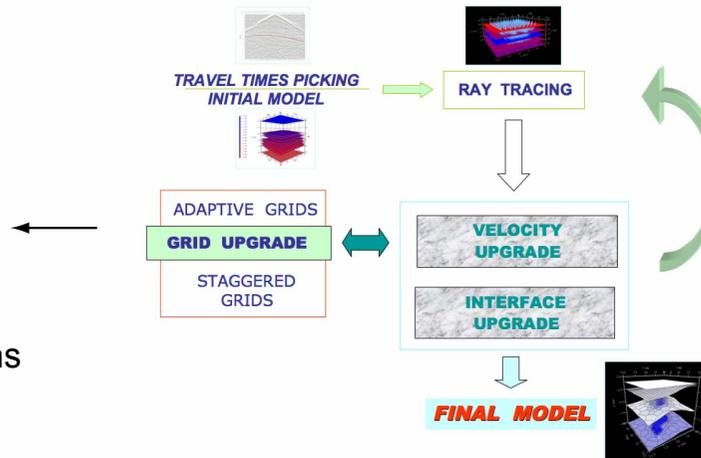
Acquisition pattern
Offset for P-waves
Offset for S-waves

Sensitivity to small CO₂ saturations

Numerical modelling

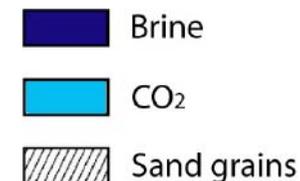
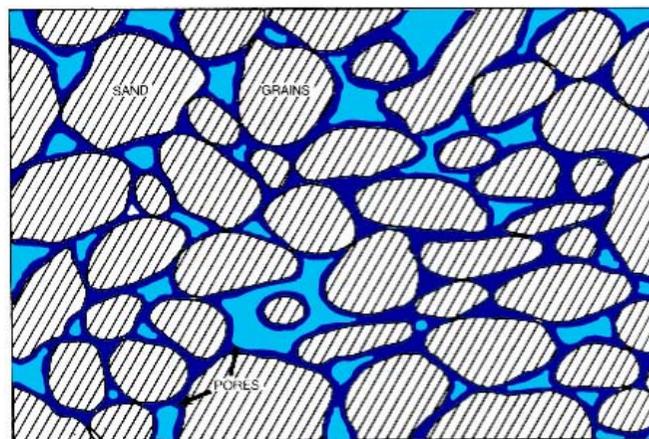
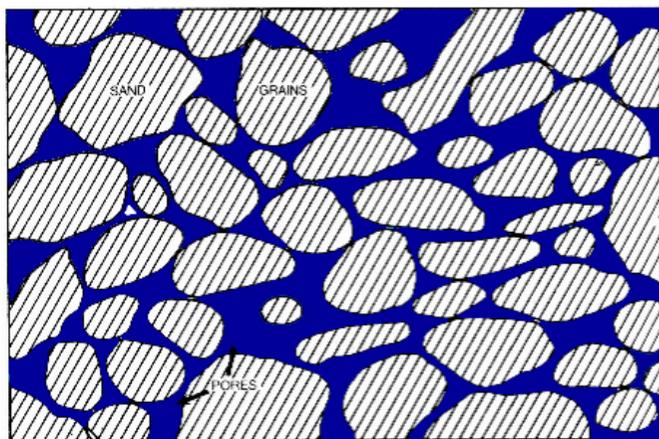


Tomographic analysis



Caratterizzazione del reservoir

Rock = solid components (minerals) + fluids in the porous space



Before CO2 injection

After CO2 injection

Vp (P-wave velocity)
Vs (S-wave velocity)
 ρ (density)
....
....

} Known
(seismic data,
well logs, lab
analyses on
core samples)

Vp (P-wave velocity)
Vs (S-wave velocity)
 ρ (density)
....
....

} ?

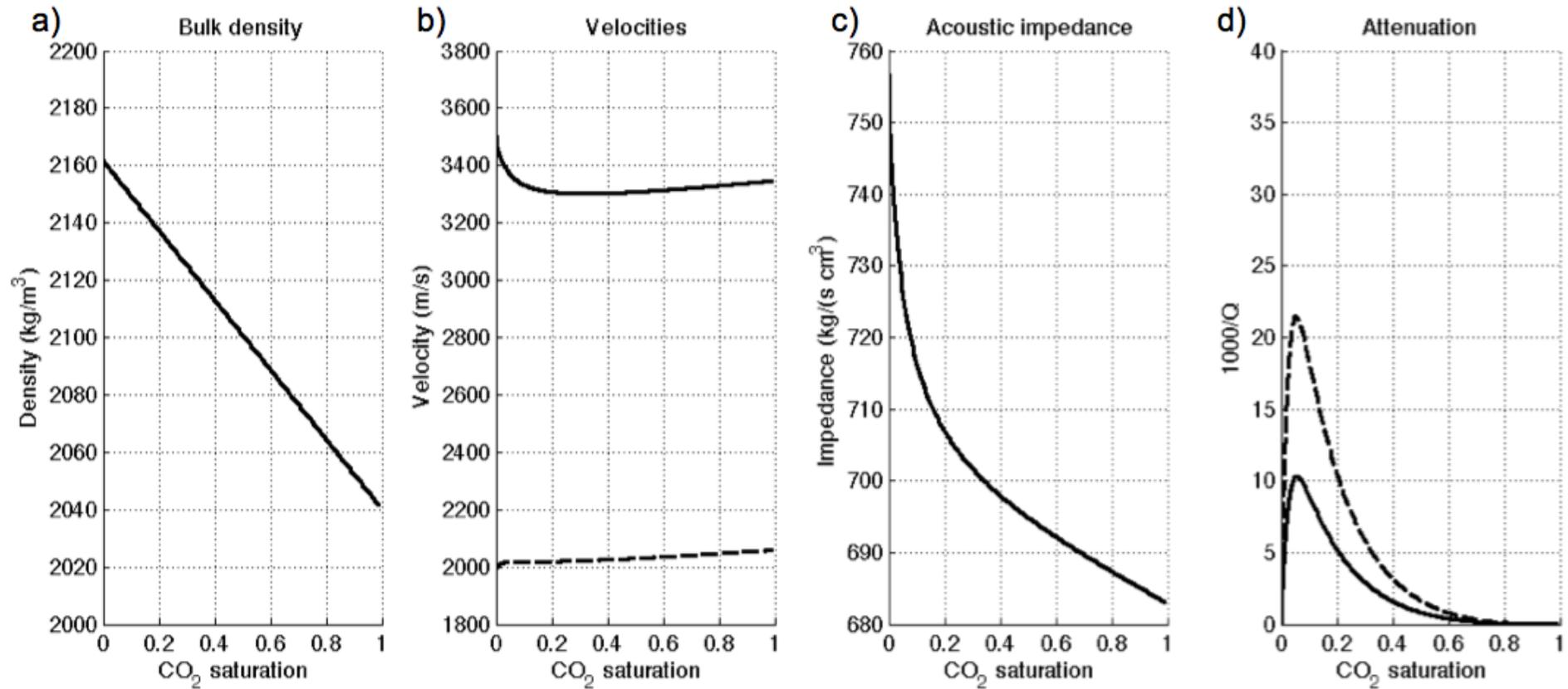
Fluid substitution
- Brine + CO₂

Computed
(rock physics models)



Rock properties vs CO₂ saturation

Sandstone (arenaria) saturata a brine in cui viene iniettata CO₂



a) ρ densità della roccia vs contenuto di CO₂ (saturazione)

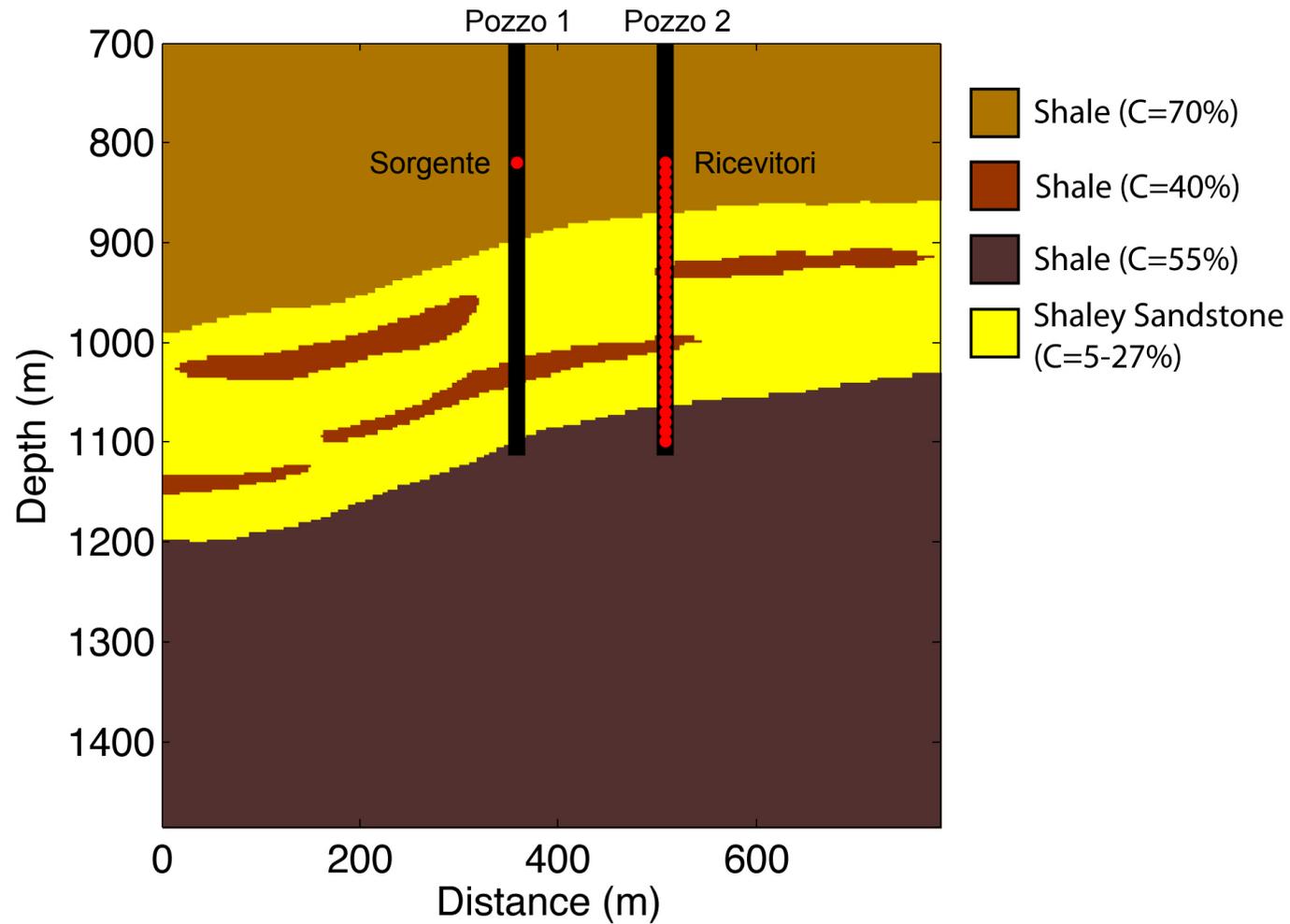
b) V_P (———) e V_S (- - -) vs saturazione di CO₂

c) Impedenza acustica ($V_P * \rho$)

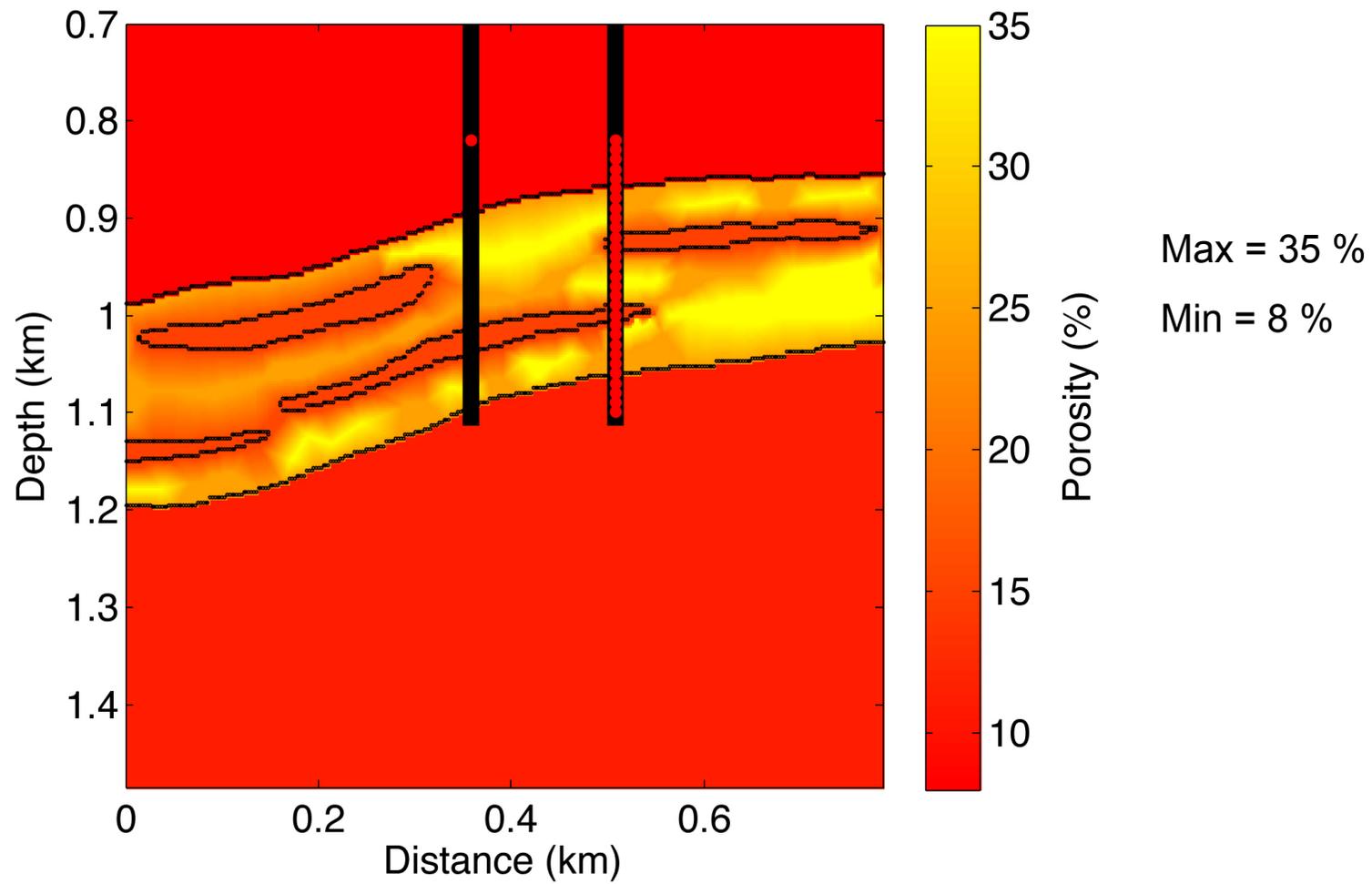
d) Attenuazione ($1000/Q$) delle onde P (———) e delle onde S (- - -)

Modello geologico

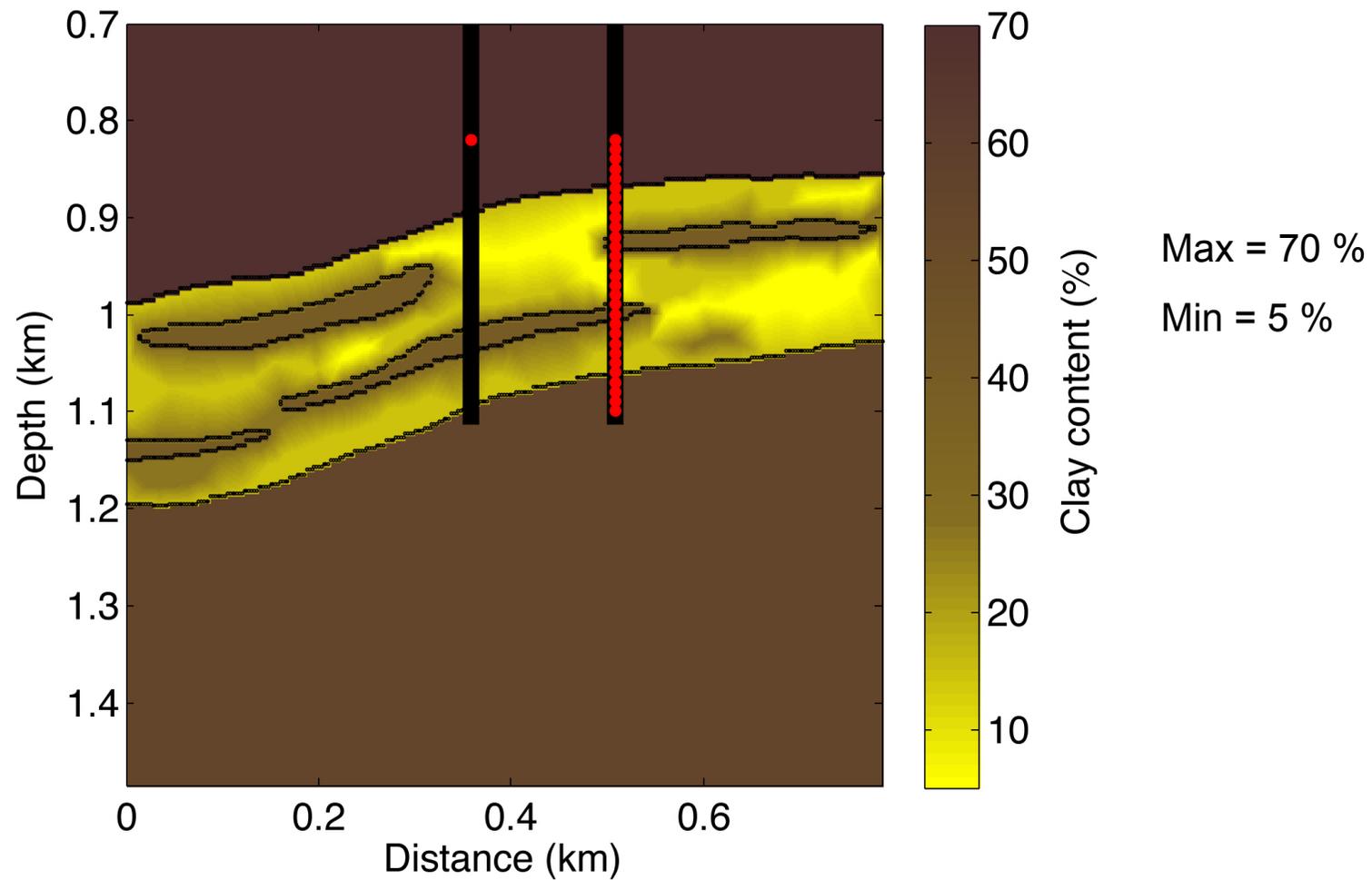
Cross-well seismic monitoring



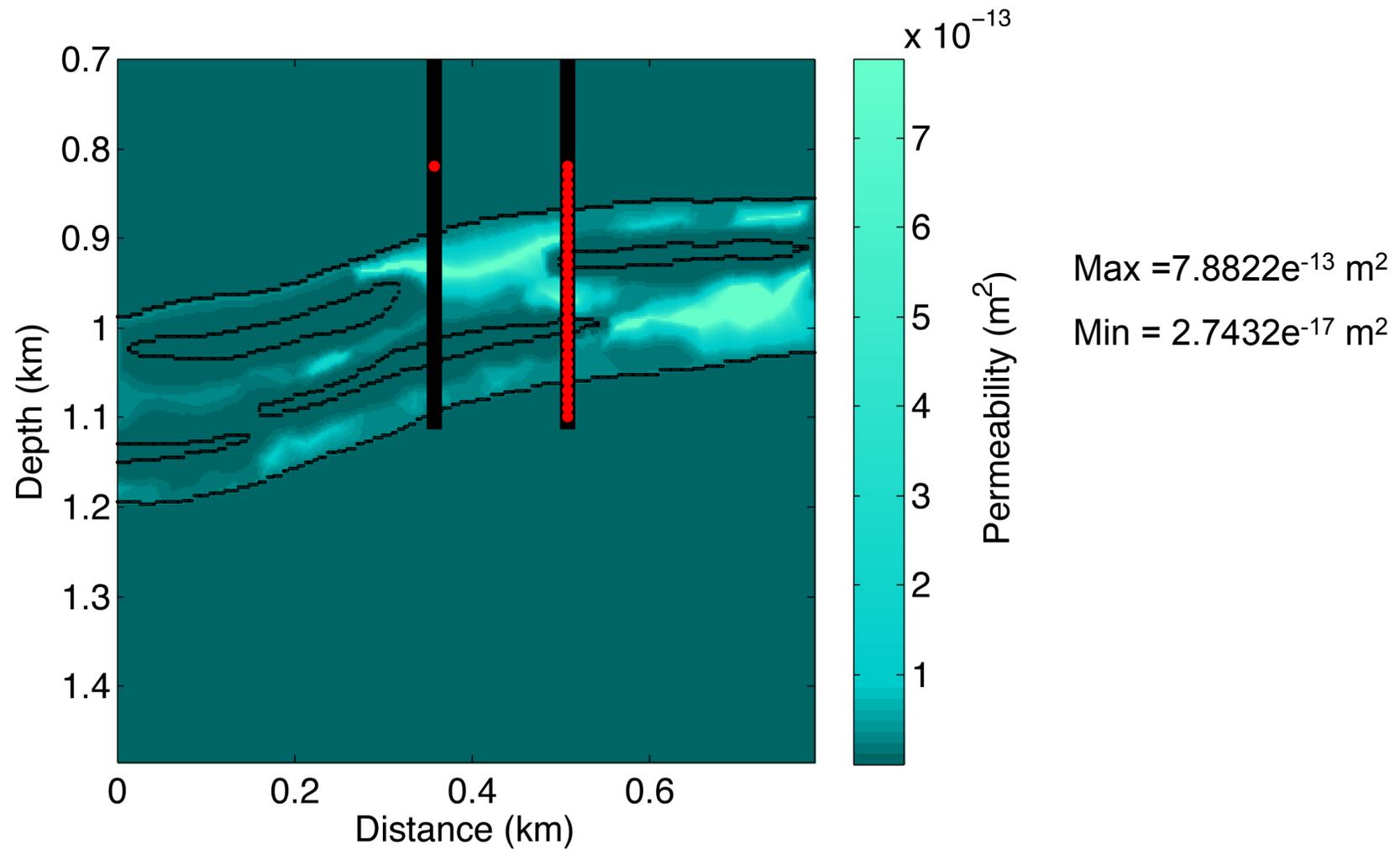
Porosità



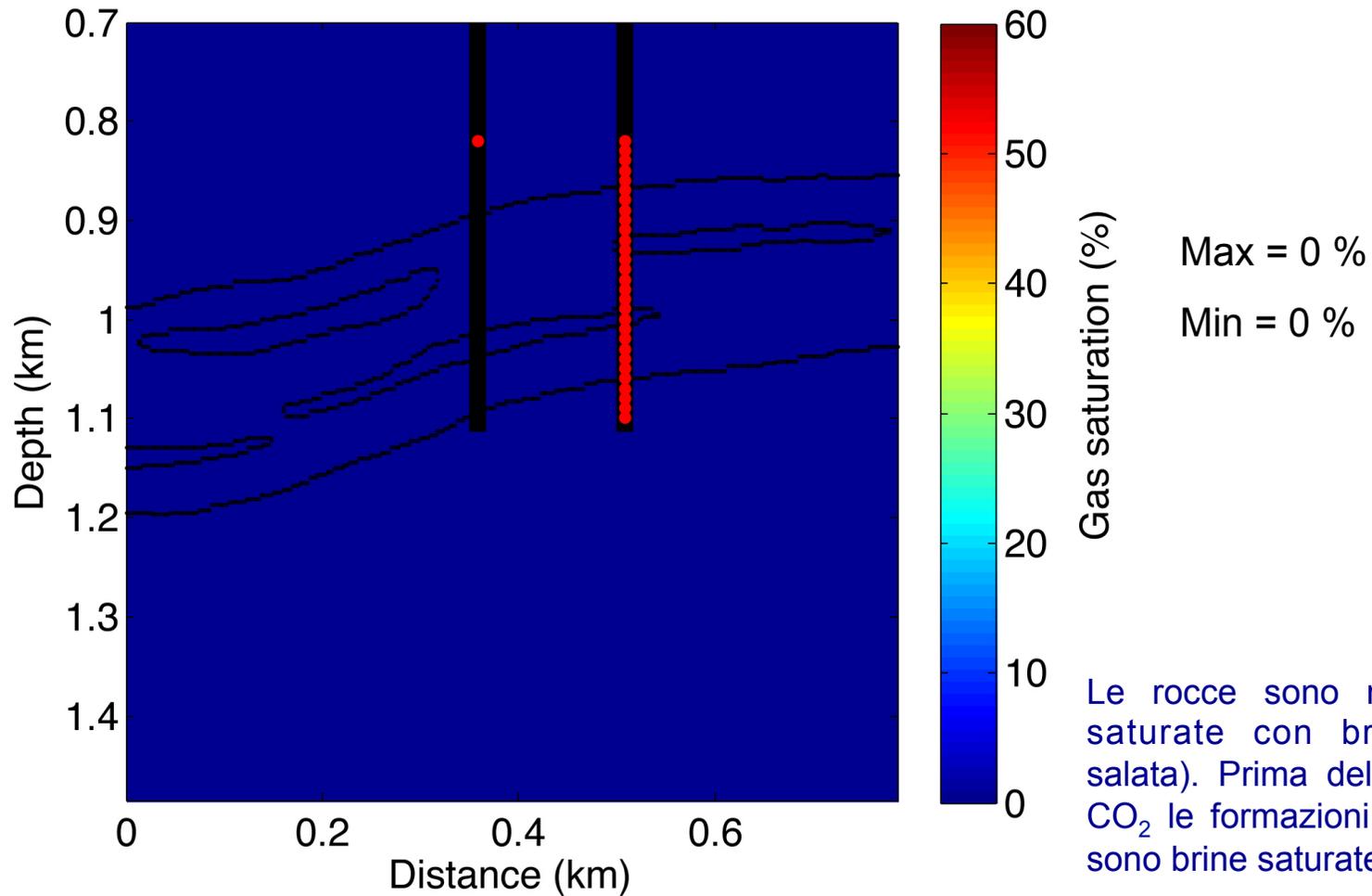
Contenuto di argilla



Permeabilità

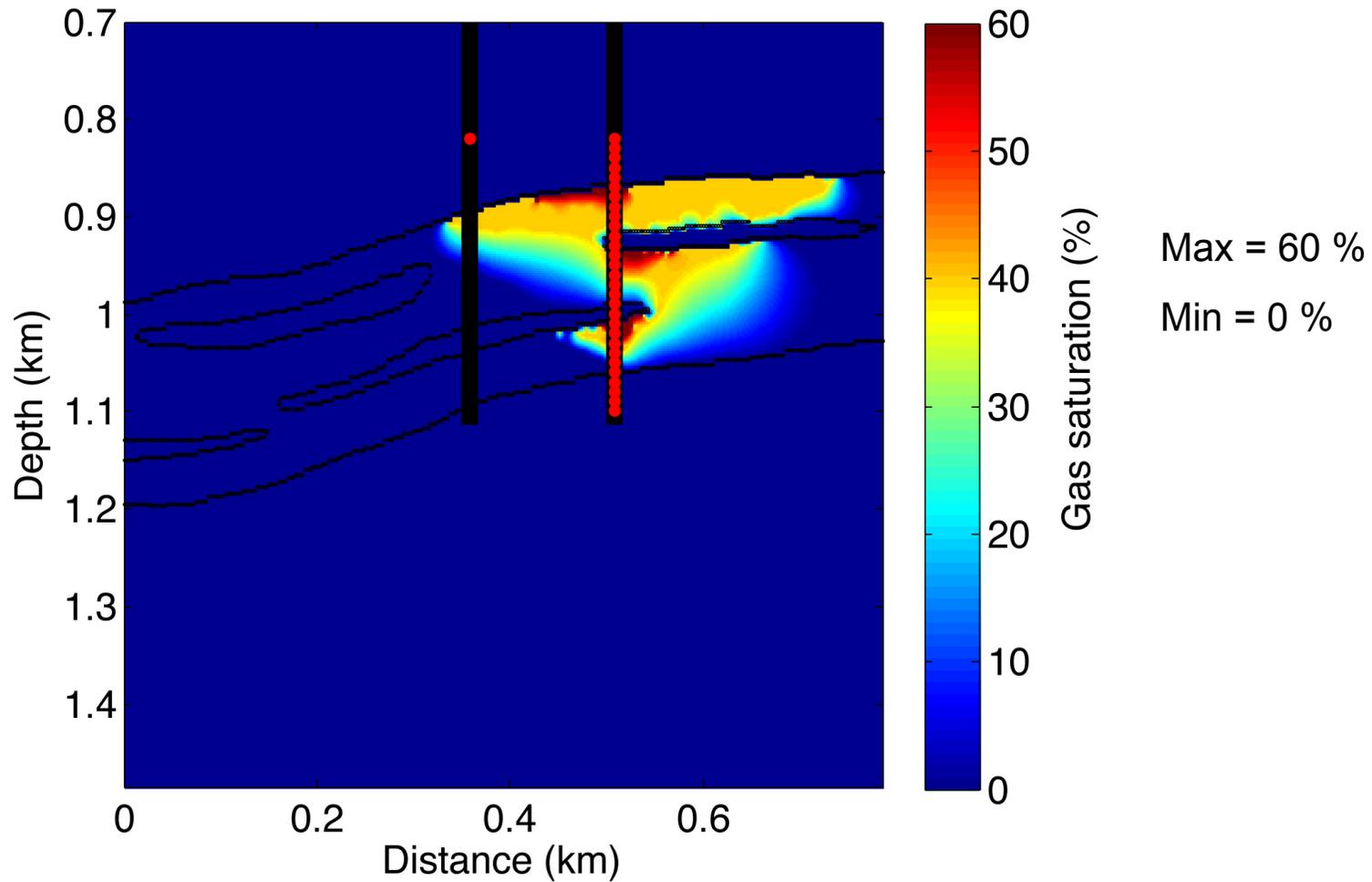


Saturazione di CO₂ prima dell'iniezione

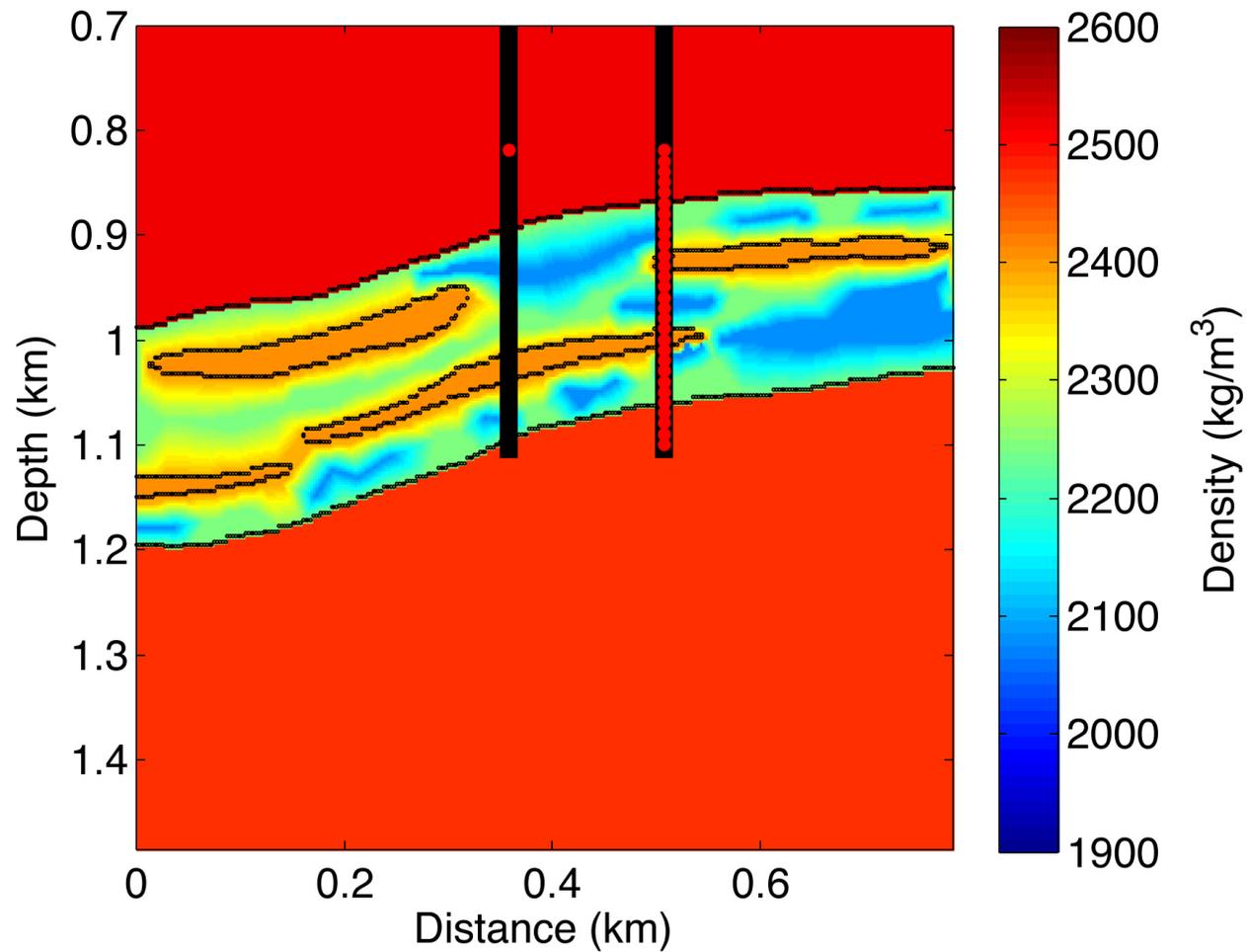


Le rocce sono normalmente saturate con brine (acqua salata). Prima dell'iniezione di CO₂ le formazioni del modello sono brine saturated.

Saturazione di CO2 dopo l'iniezione



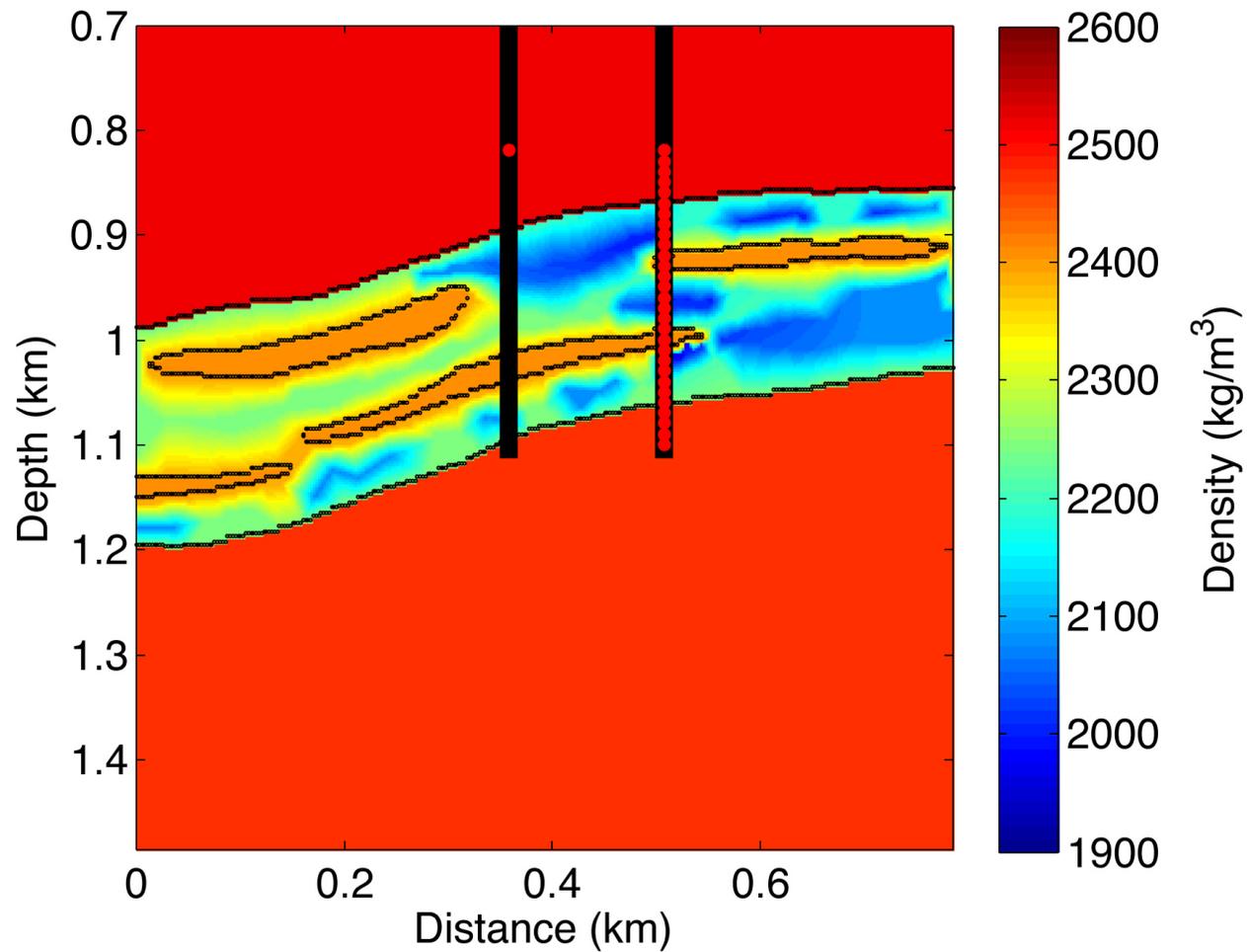
Densità prima dell'iniezione di CO₂



Max = 2520 kg/m³

Min = 2083 kg/m³

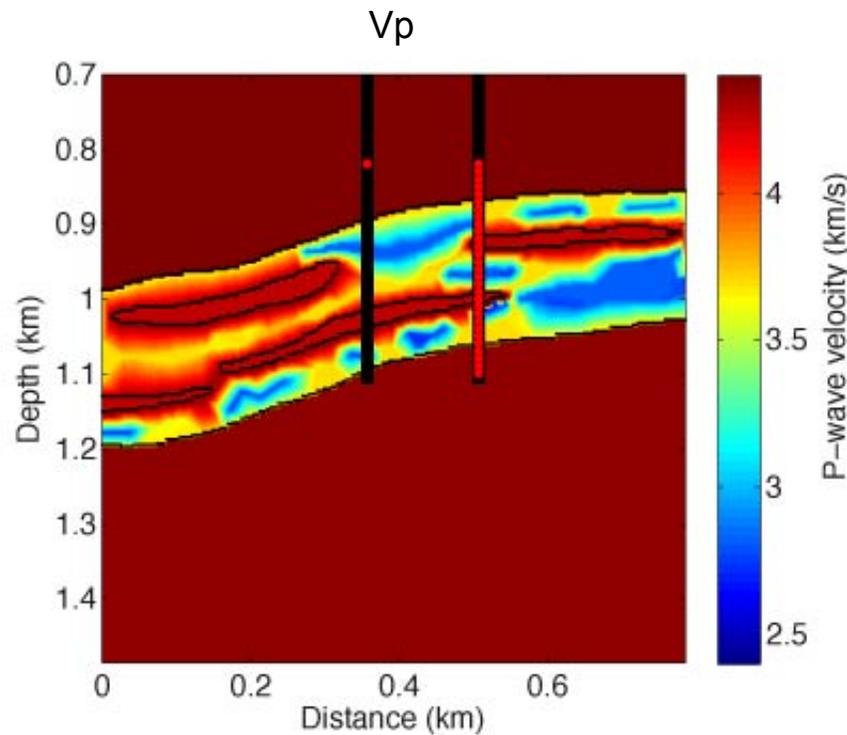
Densità dopo l'iniezione di CO₂



Max = 2520 kg/m³

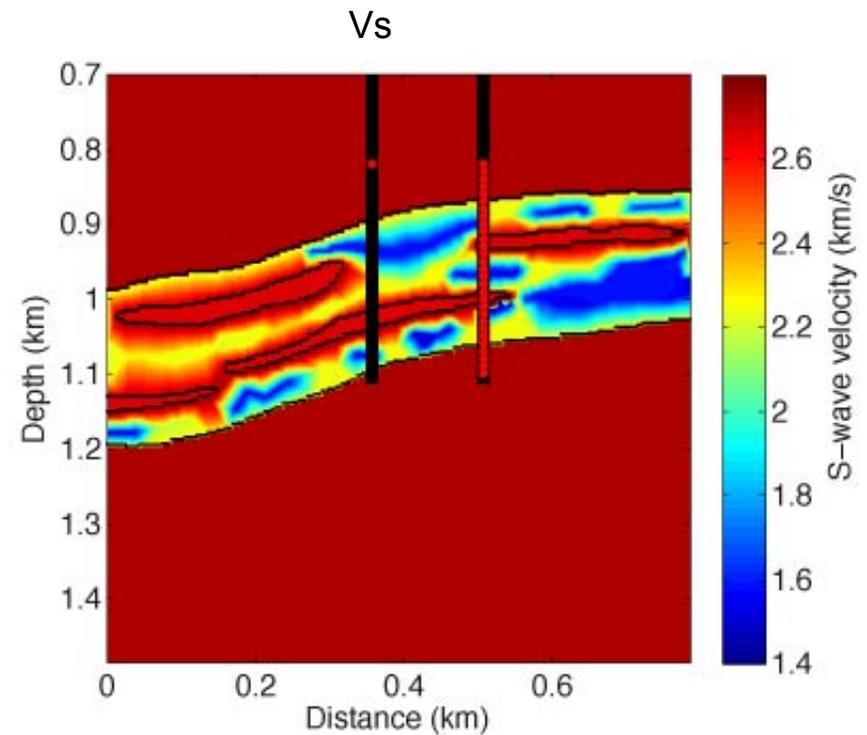
Min = 1972 kg/m³

Velocità sismiche prima dell'iniezione di CO2



Max = 4.374 km/s

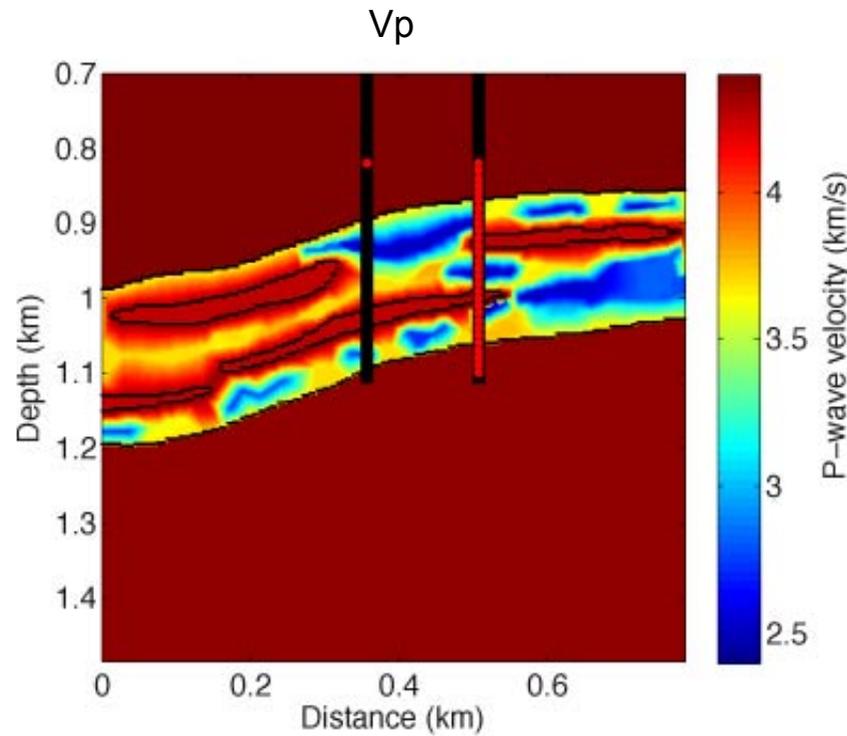
Min = 2.698 km/s



Max = 2.744 km/s

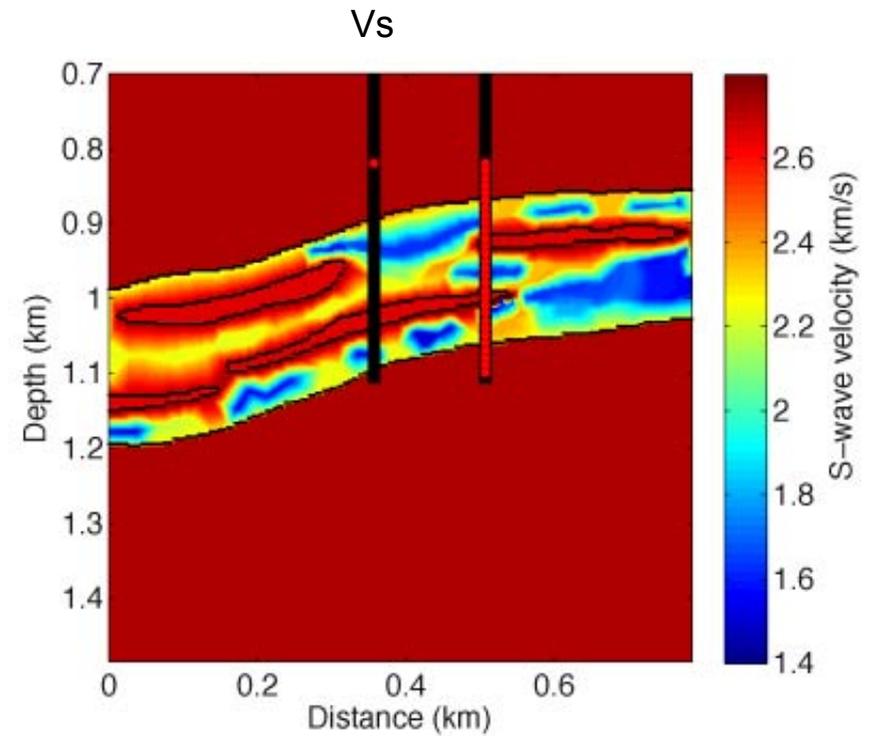
Min = 1.475 km/s

Velocità sismiche dopo l'iniezione di CO₂



Max = 4.374 km/s

Min = 2.434 km/s

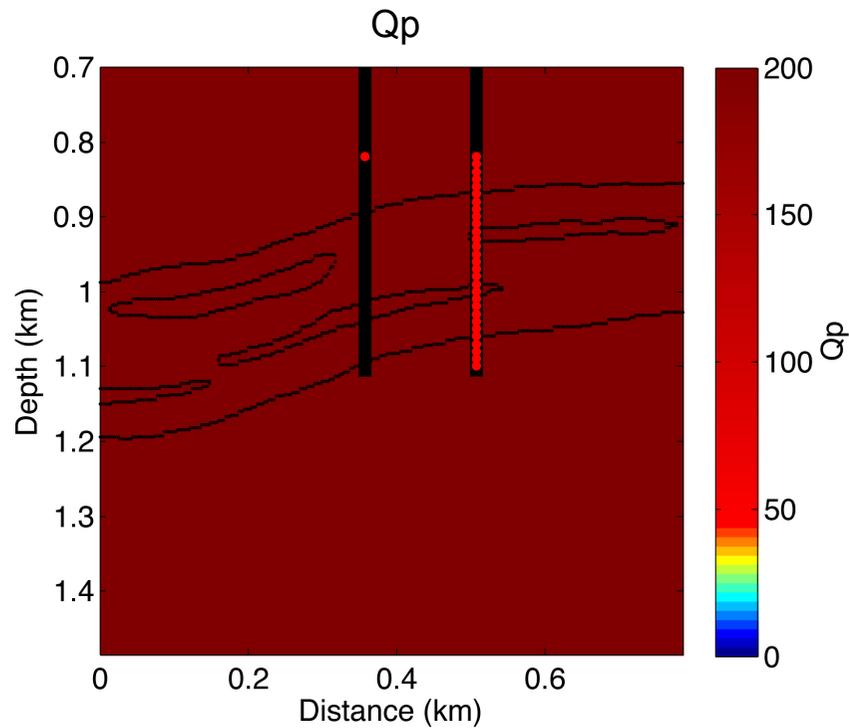


Max = 2.785 km/s

Min = 1.482 km/s

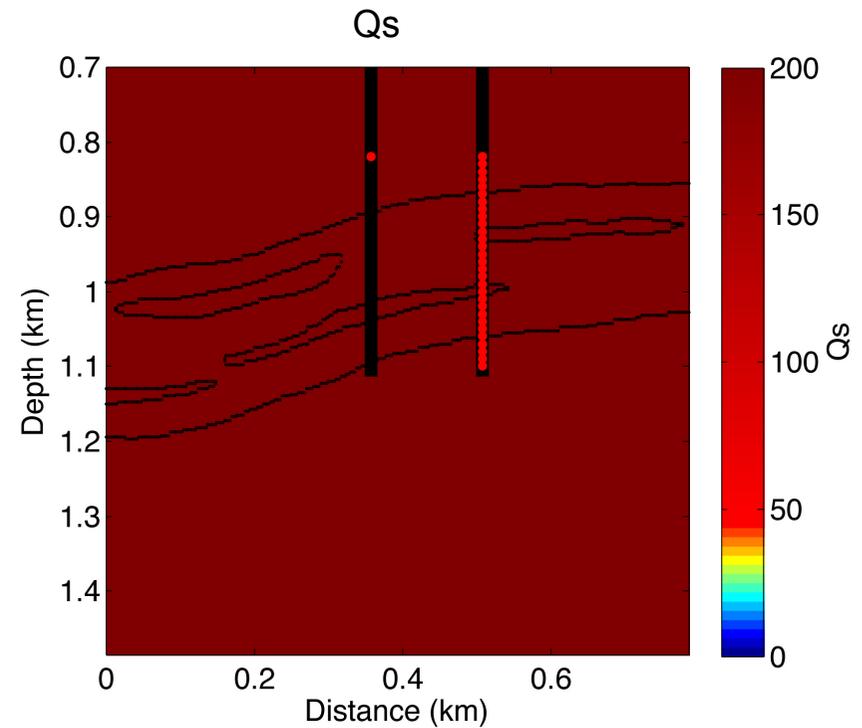
Fattori di qualità prima dell'iniezione di CO2

I fattori di qualità delle onde P ed S costituiscono una *misura* dell'attenuazione del segnale sismico. Sono inversamente proporzionali alla attenuazione.



Max = 200

Min = 200

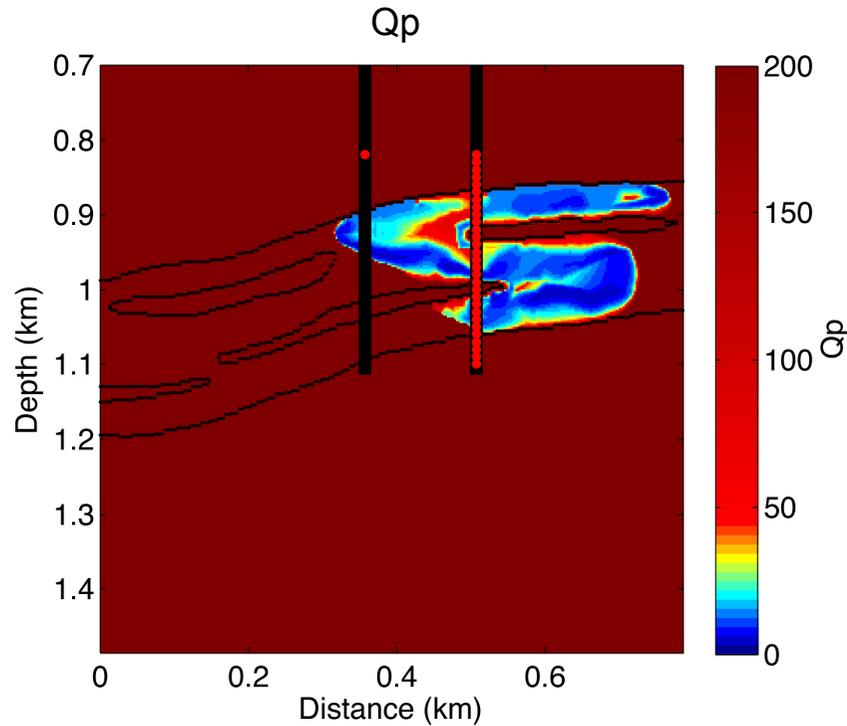


Max = 200

Min = 200

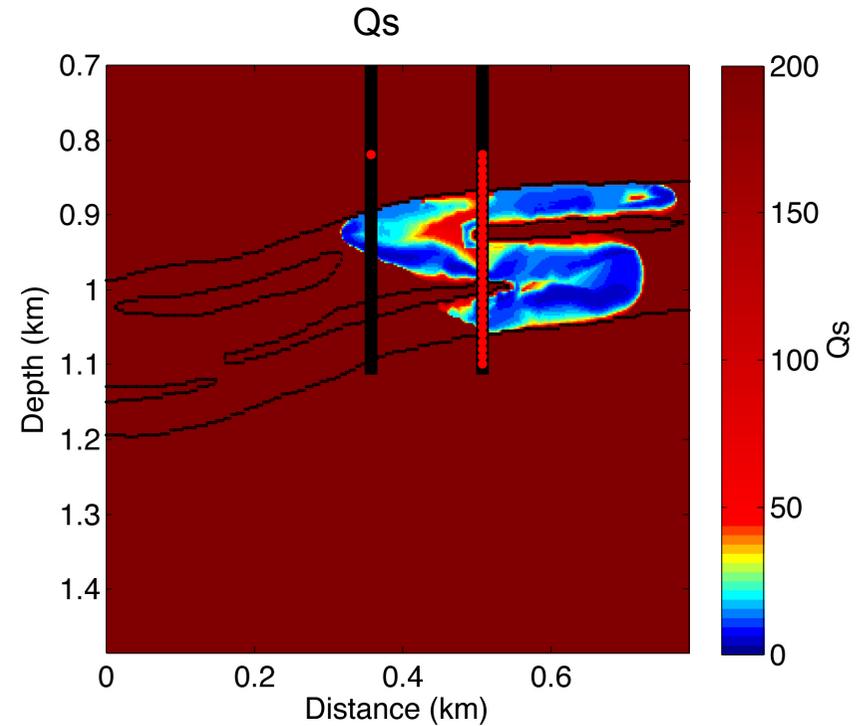
Fattori di qualità dopo l'iniezione di CO₂

Rocce saturate con un solo fluido (e.g. brine o gas) sono caratterizzate da *bassa* attenuazione del segnale sismico, rocce con entrambi i fluidi nei pori (parzialmente saturate) presentano elevata attenuazione.



Max = 200

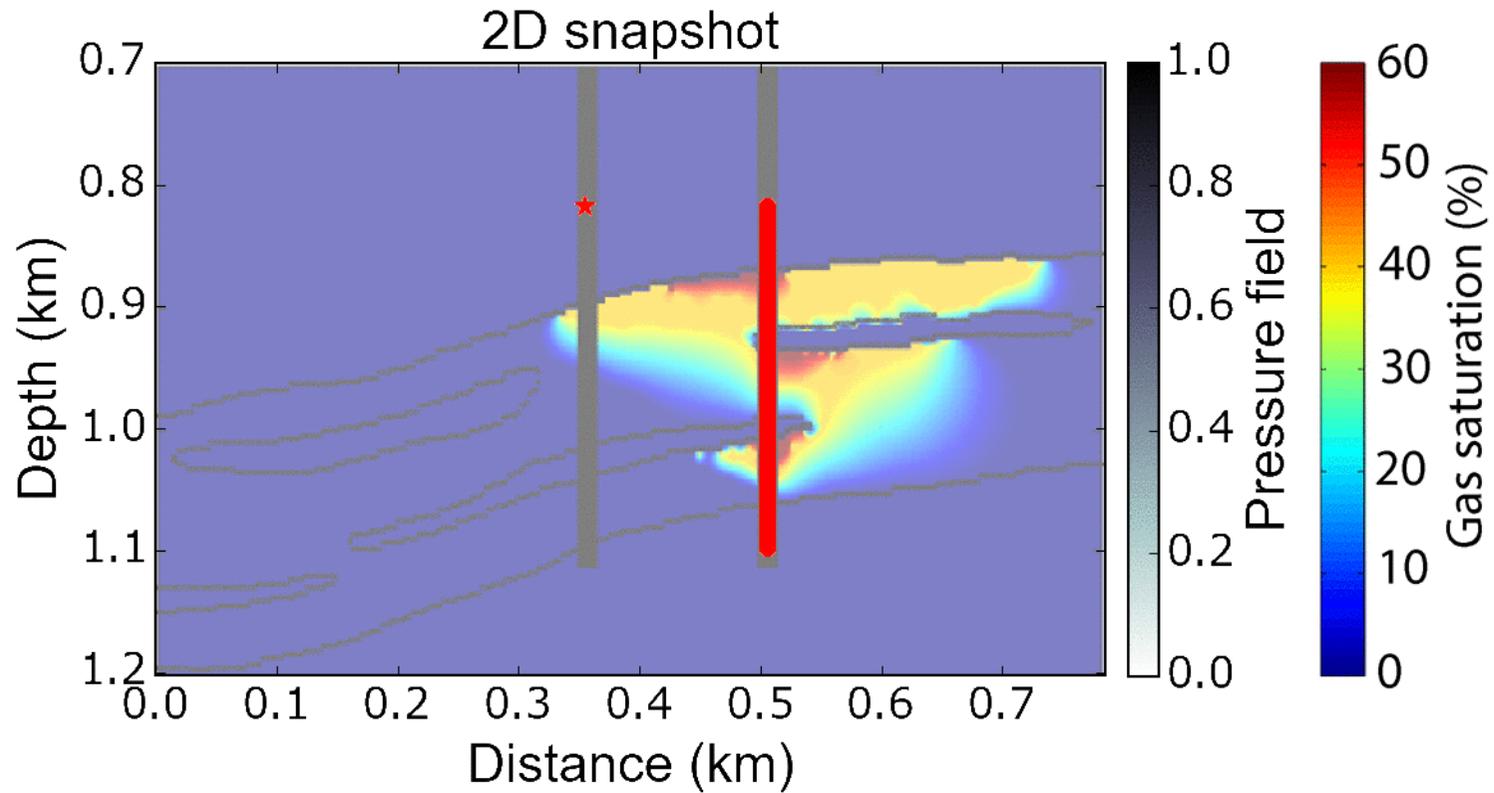
Min = 4



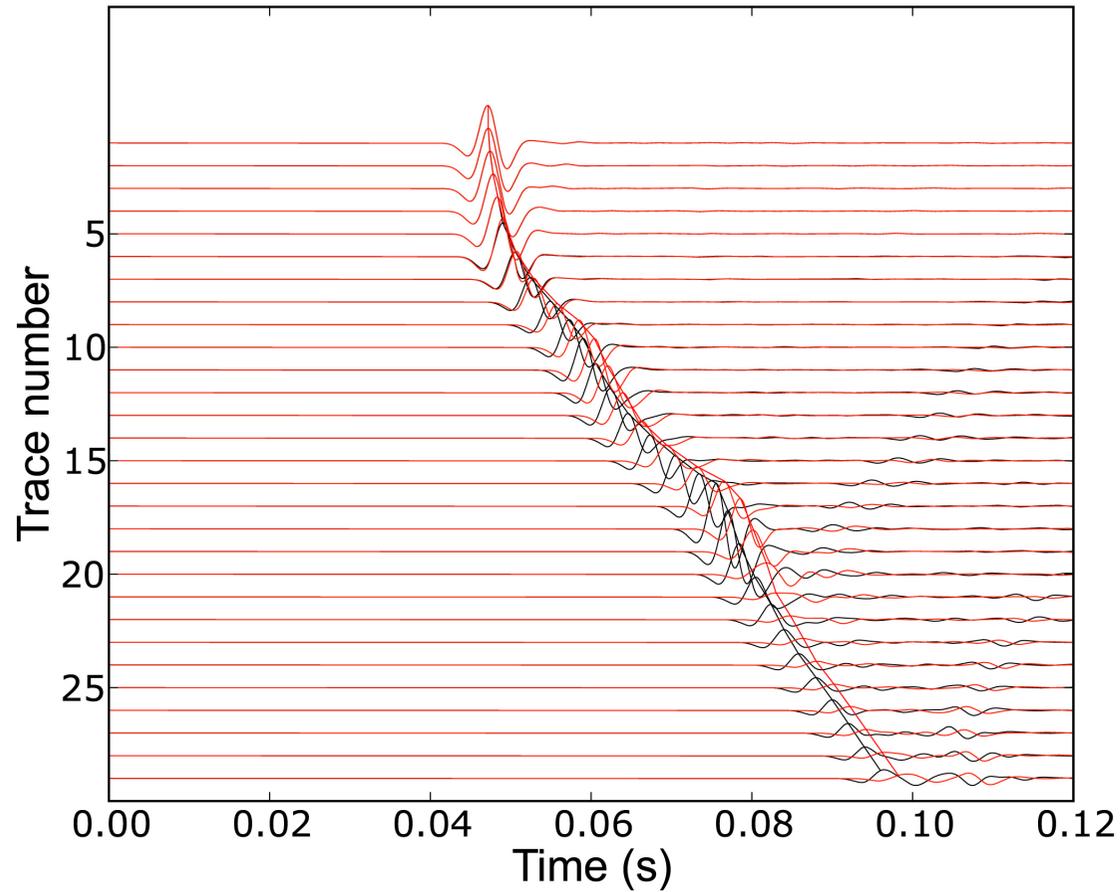
Max = 200

Min = 3.5

Evoluzione del campo d'onda



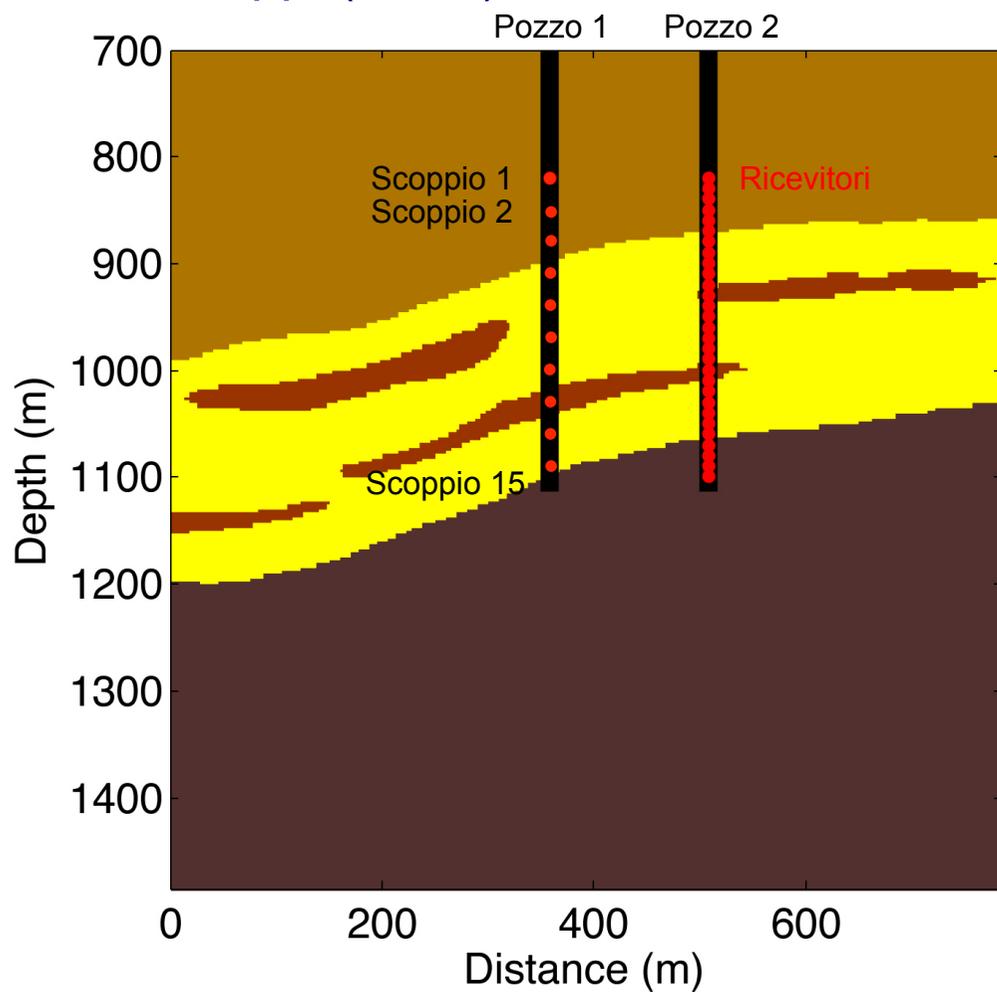
Seismic before-after CO₂ injection (Shot 1)



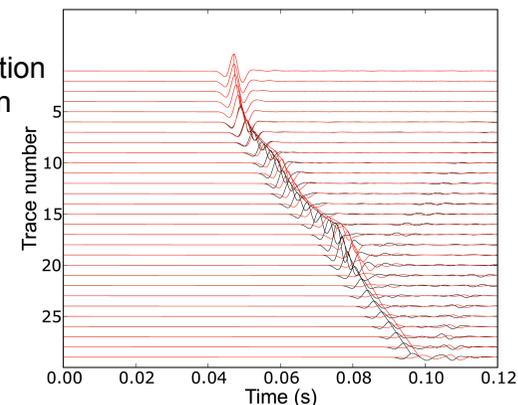
Black= before CO₂ injection
Red = after CO₂ injection

Sismogrammi prima-dopo l'iniezione di CO₂

15 scoppi (shots)

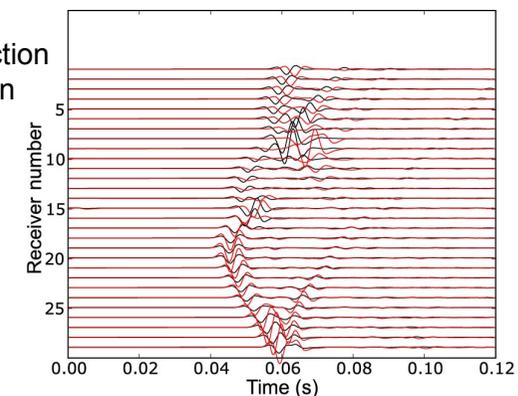


Shot 1
 Black= before CO₂ injection
 Red = after CO₂ injection



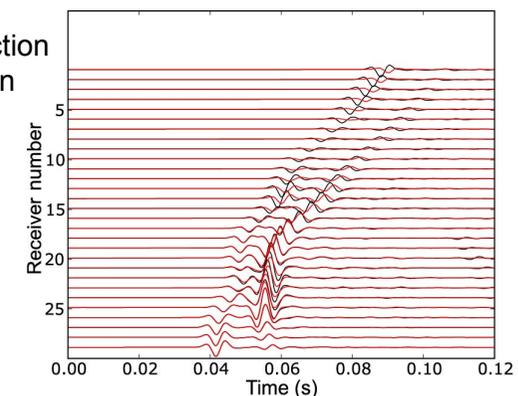
...

Shot 8
 Black= before CO₂ injection
 Red = after CO₂ injection

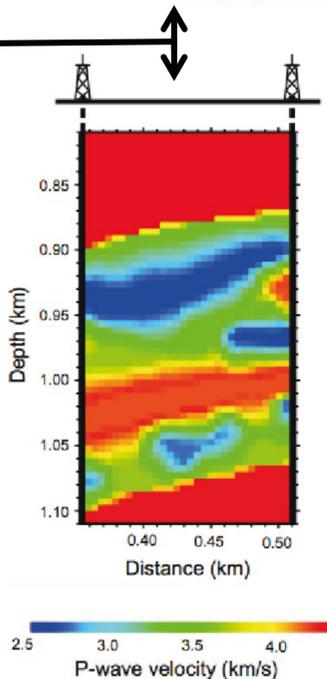
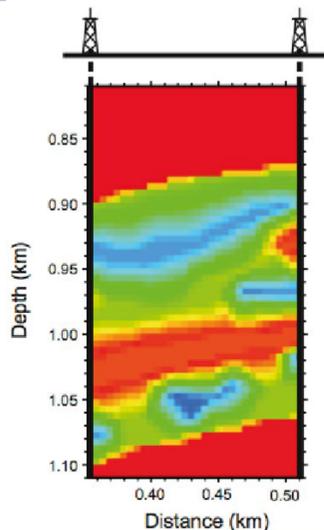
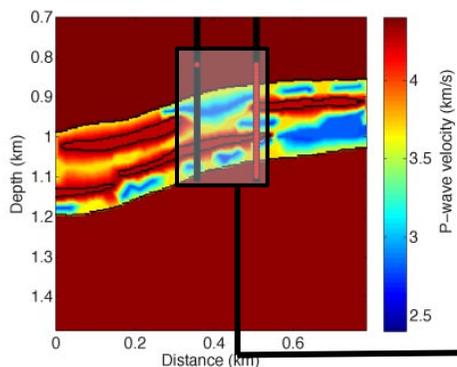


...

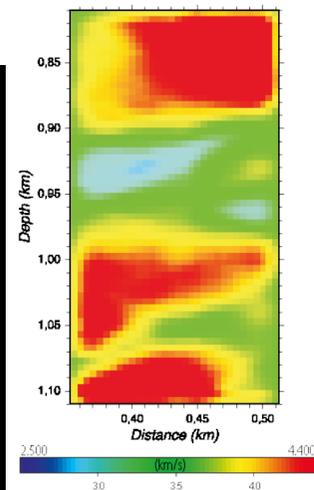
Shot 14
 Black= before CO₂ injection
 Red = after CO₂ injection



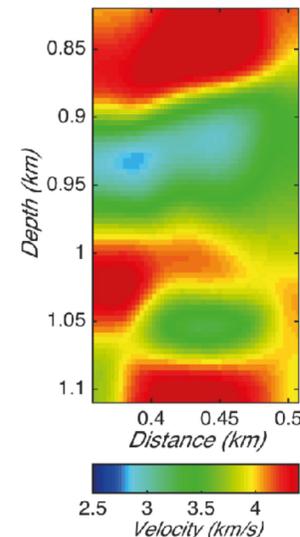
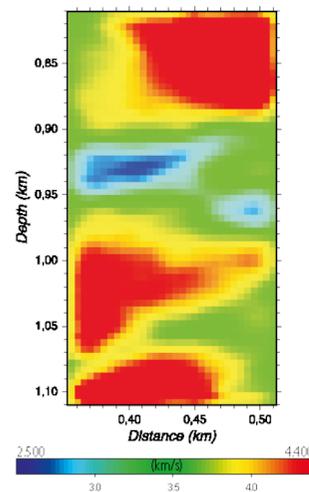
Tomografia sismica: V_p prima-dopo l'iniezione di CO_2



Modello di partenza



Campo di V_p da inversione tomografica 1



Campo di V_p da inversione tomografica 2

Dai dati sismici dei 15 scoppi è possibile calcolare il campo di velocità P (ed S, ed i QP e QS) prima e dopo l'iniezione di CO_2 attraverso l'inversione tomografica. Pur con una certa approssimazione, il plume di CO_2 viene evidenziato da una riduzione della V_p .

Bibliografia

Böhm, G., Carcione, J. M., Gei, D., Picotti, S., and Michelini, A., 2015, Cross-well seismic and electromagnetic tomography for CO₂ detection and monitoring in a saline aquifer, Journal of Petroleum Science and Engineering, 133, 245-257, doi:10.1016/j.petrol.2015.06.010.

Chadwick A., R. Arts, C. Bernstone, F. May, S. Thibeau, and P. Zweigel. Best Practice for the Storage of CO₂ in Saline Aquifers-Observations and Guidelines from the SACS and CO₂STORE projects, volume 14. British Geological Survey, 2008.

Picotti, S., Gei D., Carcione, JM., Grünhut, V., Osella, A., 2013, Sensitivity analysis from single-well ERT simulations to image CO₂ migrations along wellbores, The Leading Edge 32(5), 504-512, doi: 10.1190/tle32050504.1.

Picotti, S., Carcione, J.M., Gei, D., Rossi, G., and Santos, J. E., 2012, A seismic modeling methodology for monitoring CO₂ geological storage - The case of the Atzbach-Schwanenstadt gas field, Journal of Geophysical Research, 117, B06103, doi:10.1029/2011JB008540

Rossi, G., Picotti, S., Gei, D., and Carcione, J., 2009, Monitorare nel tempo la CO₂ in un sito di stoccaggio geologico: possibilità e limiti, Geitalia, Fist, N. 27, 9-13.

Shogenov, K., Gei, D., Forlin, E., Shogenova, A., 2016, Petrophysical and Numerical Seismic Modelling of CO₂ Geological Storage in the E6 structure, Baltic Sea, Offshore Latvia, Petroleum Geoscience, on-line publication, doi:10.1144/petgeo2015-017.