

Che cosa significa veramente lo stoccaggio geologico della CO₂?

Usare in maniera
responsabile i
combustibili fossili

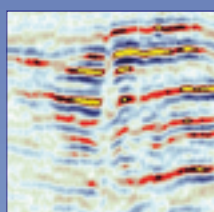
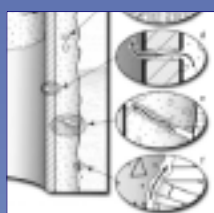
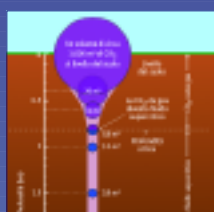
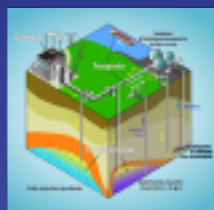
Ridurre drasticamente
le emissioni di gas serra

Rimettere il carbonio nel
sottosuolo da cui proviene

Guadagnare il tempo necessario
per sviluppare fonti di energia
più rispettose dell'ambiente



CO₂GeoNet Network Europeo d' Eccellenza



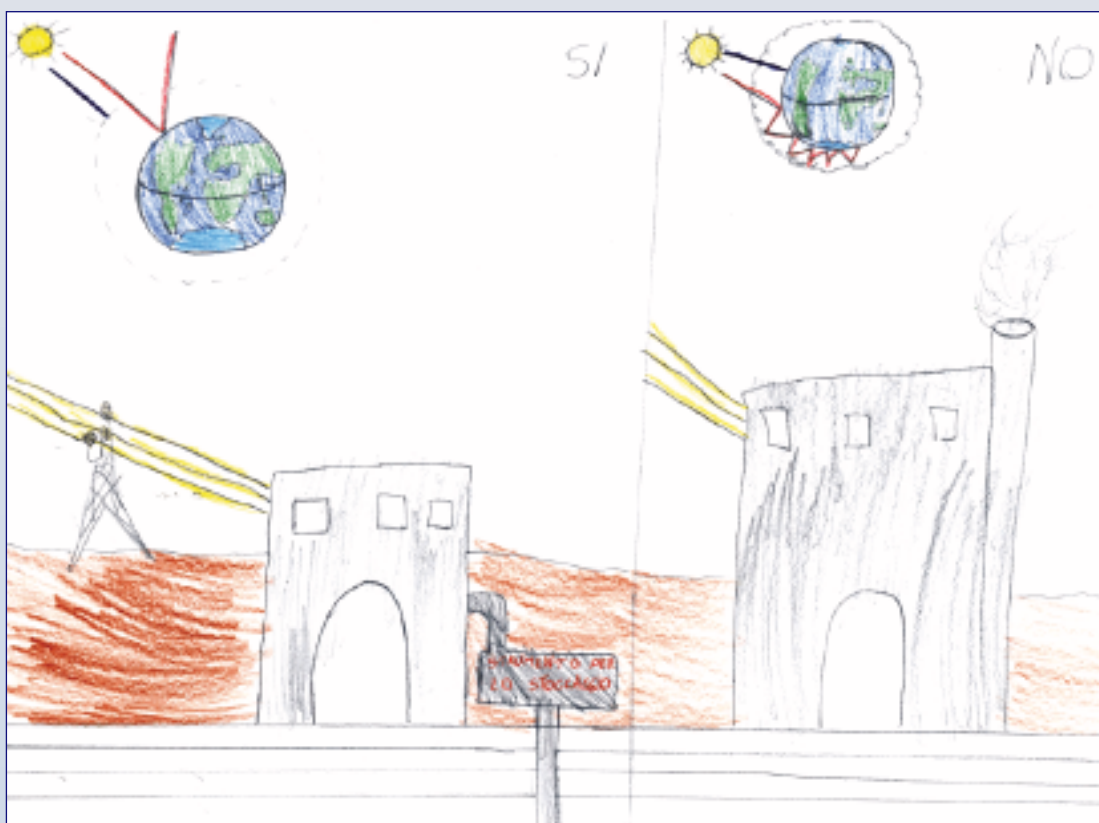
1. I cambiamenti climatici e la necessità dello stoccaggio geologico della CO₂	4
2. Dove e quanta CO₂ possiamo immagazzinare nel sottosuolo?	6
3. Come possiamo trasportare e iniettare grandi quantità di CO₂?	8
4. Cosa accade alla CO₂ una volta che si trova nel sito di stoccaggio?	10
5. La CO₂ può fuoriuscire dal sito di stoccaggio? Quali potrebbero essere le conseguenze?	12
6. Come possiamo monitorare in profondità e in superficie i siti di stoccaggio?	14
7. Quali norme di sicurezza si devono imporre e rispettare?	16
Glossario	18
Cosa può fare CO₂GeoNet per voi	19

Il presente opuscolo è stata realizzato grazie al contributo di:
 Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persoglia, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Guardando al futuro



Non più fumo e ciminiere
Tubazioni convogliano la CO₂ che viene poi
iniettata nel sottosuolo
Questo è bene per il pianeta Terra



© Sapienza URS

Massimo, 10 anni, Roma - Italia

I nostri figli capiscono il senso
dello stoccaggio geologico della CO₂

I cambiamenti climatici e la necessità dello stoccaggio geologico della CO₂

L'uomo sta rilasciando nell'atmosfera troppa CO₂

È ormai comunemente accettato che le attività dell'uomo stanno sconvolgendo il ciclo del carbonio nel nostro pianeta. Prima della rivoluzione industriale - e per ben 10.000 anni prima di essa - questo ciclo dal delicato equilibrio, che interessa lo scambio naturale di carbonio tra la geosfera, la biosfera, gli oceani e l'atmosfera, ha mantenuto le concentrazioni della CO₂ in atmosfera ad un livello contenuto (circa 280 ppm, pari allo 0.028%). Negli ultimi 250 anni, invece, l'utilizzo intensivo di combustibili fossili (carbone, pe-

trolio e gas) per la produzione di energia elettrica, il riscaldamento, le industrie e i trasporti ha fatto aumentare incessantemente la quantità di CO₂ immessa nell'atmosfera (**Fig. 1**). Circa metà dell'eccedenza dovuta all'uomo viene riassorbita dalla vegetazione o si discioglie negli oceani, causandone l'acidificazione e provocando così effetti negativi sugli organismi marini. La quota restante si accumula nell'atmosfera, dove contribuisce ai cambiamenti climatici: la CO₂ è infatti un gas serra che assorbe parte del calore solare, causando il riscaldamento della superficie terrestre. Occorrono azioni radicali ed immediate per evitare che l'attuale concentrazione di 387 ppm della CO₂ nell'atmosfera (già il 38% in più rispetto alle concentrazioni dell'era pre-industriale) s'innalzi nei prossimi decenni oltre il livello critico di 450 ppm. Gli esperti di tutto il mondo sono d'accordo nel ritenere che, oltre tale livello, potrebbe essere impossibile evitare conseguenze disastrose.

Rimettere il carbonio nel sottosuolo

La nostra società dipende dai combustibili fossili sin dagli inizi dell'era industriale, nel XVIII secolo: non sorprende dunque che la transizione verso l'utilizzo di fonti energetiche rispettose del clima richieda sia tempo che denaro. Ciò che occorre è una soluzione di breve periodo che aiuti a ridurre la nostra dipendenza dai combustibili fossili utilizzandoli, come primo passo, in maniera non inquinante, dandoci in tal modo il tempo necessario per sviluppare tecnologie e infrastrutture per un futuro basato su energie rinnovabili. Tale soluzione si concretizza nella creazione di un sistema di produzione dell'energia a ciclo chiuso, in cui il carbonio, originariamente estratto dal sottosuolo sotto forma di gas, petrolio e carbone, venga rimesso nel sottosuolo sotto forma di CO₂. È interessante notare che lo stoccaggio geologico della CO₂ non è un'invenzione dell'uomo bensì una soluzione mutuata da un fenomeno completamente naturale e ampiamente diffuso: sotto terra, infatti, si trovano giacimenti naturali di CO₂ che esistono da milioni di anni. Un esempio è la serie di otto giacimenti naturali di CO₂ nel sud-est della Francia, scoperti durante le ricerche petrolifere negli anni '60 (**Fig. 2**). Questi e molti altri siti naturali in tutto il mondo dimostrano che le formazioni geologiche sono in grado di contenere la CO₂ in modo efficace e sicuro per periodi di tempo estremamente lunghi.

Un'opzione molto promettente per mitigare i cambiamenti climatici

Tra i molteplici provvedimenti che occorre mettere in pratica urgentemente per mitigare i cambiamenti climatici e l'acidificazione degli oceani, le tecnologie per la cattura e lo stoccaggio geologico della CO₂ (CCS*) hanno un ruolo fondamentale, poiché si valuta che possano contribuire per il 33% alla riduzione

Figura 1
Le emissioni globali di CO₂ riconducibili alle attività umane ammontano a 30 miliardi di tonnellate (Gt) all'anno, corrispondenti a 8,1 Gt di carbonio; 6,5 Gt derivano dai combustibili fossili e 1,6 Gt dalla deforestazione e dalle pratiche agricole.

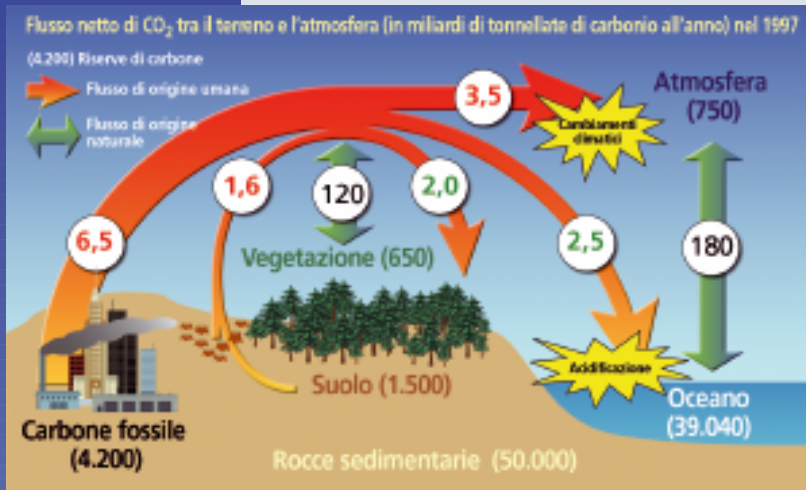
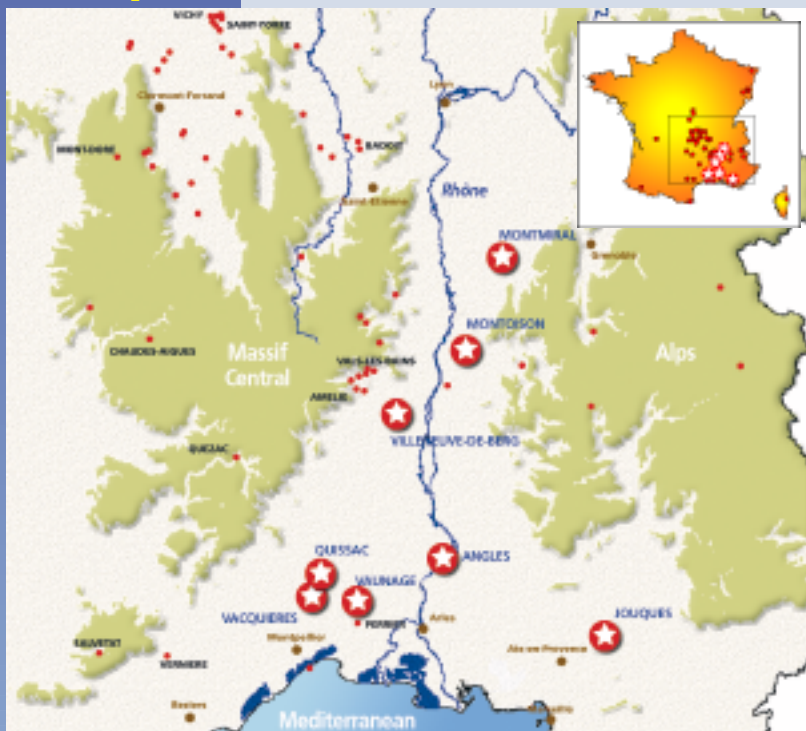


Figura 2
Provincia francese ricca di giacimenti naturali di CO₂.



© BRGM im@ge

© BRGM im@ge

- ⊕ Giacimenti naturali di CO₂
- Acque carbogassate attualmente utilizzate (acque minerali frizzanti, stabilimenti termali)

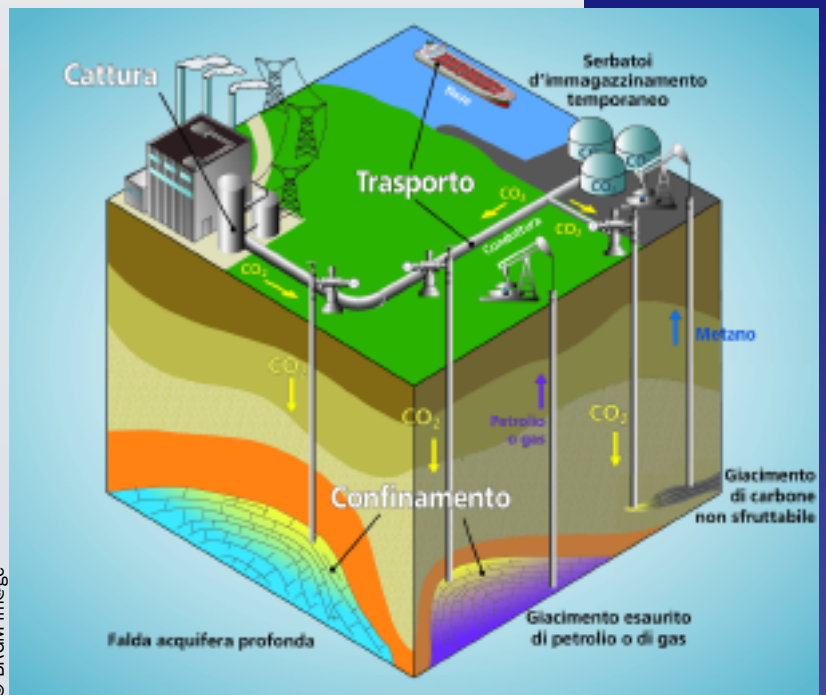
delle emissioni di CO₂ fissata per il 2050. Le tecnologie CCS implicano la cattura della CO₂ dalle centrali elettriche alimentate con combustibili fossili (carbone, petrolio o gas) e dagli impianti industriali (quali acciaierie, cementifici, raffinerie, ecc.), il suo trasporto per mezzo di condutture o via nave verso un sito di confinamento e l'iniezione attraverso un pozzo* in una formazione geologica adatta a contenerla nel lungo periodo (Fig. 3). Data la crescita della popolazione mondiale, l'aumento del fabbisogno di energia nei paesi in via di sviluppo, nonché l'attuale mancanza di fonti alternative "pulite" per la produzione di energia a basso costo e su larga scala, è inevitabile che nel breve periodo si continui ad utilizzare in modo preminente i combustibili fossili. Perciò, impiegando diffusamente le tecnologie CCS si potrebbe garantire un maggior rispetto dell'ambiente e, al tempo stesso, creare un ponte verso un'economia mondiale basata sulla produzione di nuove fonti sostenibili di energia.

Il progressivo sviluppo delle tecnologie CCS in tutto il mondo

A partire dagli anni '90 sono stati condotti importanti programmi di ricerca sulle tecnologie CCS in Europa, Stati Uniti, Canada, Australia e Giappone. Molte conoscenze, inoltre, sono state acquisite con i primi progetti dimostrativi di grandi dimensioni, dove la CO₂ è stata iniettata per diversi anni a grandi profondità: Sleipner in Norvegia (circa 1 Mt/anno dal 1996) (Fig. 4), Weyburn in Canada (circa 1.8 Mt/anno dal 2000), In Salah in Algeria (circa 1 Mt/anno dal 2004). Anche la collaborazione internazionale per la ricerca sullo stoccaggio della CO₂, promossa da IEA-GHG* e CSLF* in questi ed altri siti, è stata fondamentale per ampliare le nostre conoscenze e per sostenere lo sviluppo della comunità scientifica mondiale che si occupa dell'argomento. Un ottimo esempio è il rapporto speciale dell'IPCC* sulla cattura e lo stoccaggio della CO₂ (2005), che descrive lo stato attuale delle conoscenze e gli ostacoli che occorre superare per consentire l'utilizzazione di questa tecnologia su ampia scala. Esiste dunque una solida base tecnologica che ha dato il via in tutto il mondo alla fase dimostrativa. Oltre agli aspetti tecnologici, sono ora in fase di elaborazione i quadri legislativi, normativi, economici e politici per l'utilizzo delle tecnologie CCS e ne viene valutata la percezione e il sostegno da parte del pubblico. In Europa, l'obiettivo è di avere almeno 12 progetti dimostrativi su grande scala attivi entro il 2015, al fine di consentire un diffuso utilizzo di tipo industriale delle tecnologie CCS entro il 2020. A tale scopo, nel gennaio 2008, la Commissione Europea ha emesso il "Pacchetto dell'U.E. per il Clima e l'Energia" che comprende una Direttiva sullo stoccaggio geologico della CO₂ e altri provvedimenti per promuovere lo sviluppo e l'utilizzo sicuro delle tecnologie CCS.

Domande chiave sullo stoccaggio geologico della CO₂

Il Network di Eccellenza CO₂GeoNet è nato con il sostegno della Commissione Europea, per permette-

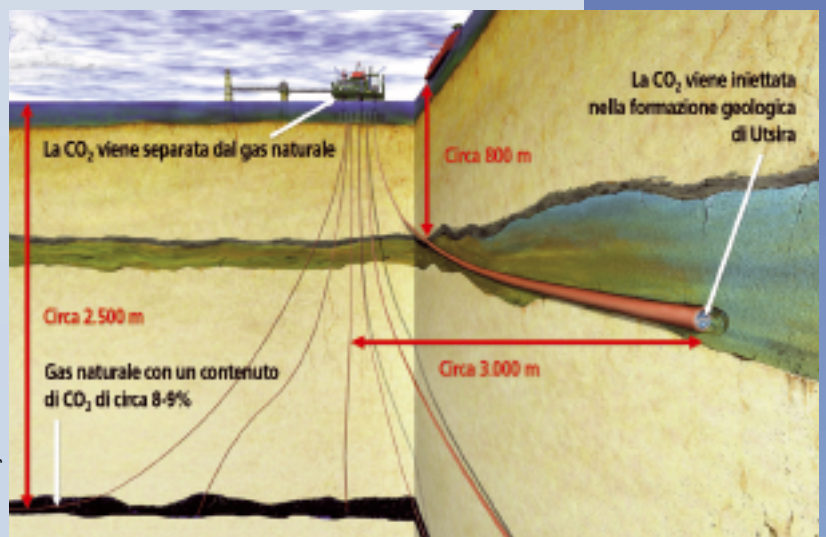


© BRGM im@gé

Figura 3
La CO₂ prodotta dalle centrali elettriche viene catturata mediante separazione dagli altri gas. Viene quindi compressa e trasportata attraverso una conduttura o per nave ai siti di stoccaggio geologico: acquiferi salini profondi, giacimenti di gas o petrolio esauriti, giacimenti di carbone non sfruttabili.

re alla ricerca europea di mantenersi all'avanguardia nel mondo grazie alla collaborazione tra i diversi istituti di ricerca. Uno degli obiettivi di CO₂GeoNet è di produrre chiare informazioni scientifiche sulle caratteristiche tecniche dello stoccaggio geologico della CO₂. Per favorire il dialogo sugli aspetti essenziali di questa importante tecnologia, i ricercatori di CO₂GeoNet si sono impegnati nel rispondere alle domande più frequenti sullo stoccaggio geologico della CO₂: nelle prossime pagine, troverete alcune spiegazioni su come funziona, in quali circostanze è attuabile e quali sono i criteri per una sua realizzazione sicura ed efficace.

Figura 4
Sezione trasversale verticale del sito di Sleipner in Norvegia. Il gas naturale, estratto ad una profondità di 2500 m, contiene una percentuale importante di CO₂ che occorre rimuovere per attenersi agli standard commerciali. La CO₂ catturata, invece di essere rilasciata nell'atmosfera, viene iniettata ad una profondità di circa 1000 m nell'acquifero* sabbioso di Utsira.



© StatoilHydro

Dove e quanta CO₂ possiamo immagazzinare nel sottosuolo?

La CO₂ non si può iniettare dovunque nel sottosuolo: prima occorre identificare le formazioni geologiche adatte. Rocce serbatoio* idonee per lo stoccaggio geologico della CO₂ esistono in tutto il mondo ed offrono una capacità sufficiente a far sì che le tecnologie CCS contribuiscano significativamente alla lotta ai cambiamenti climatici indotti dalle attività umane.

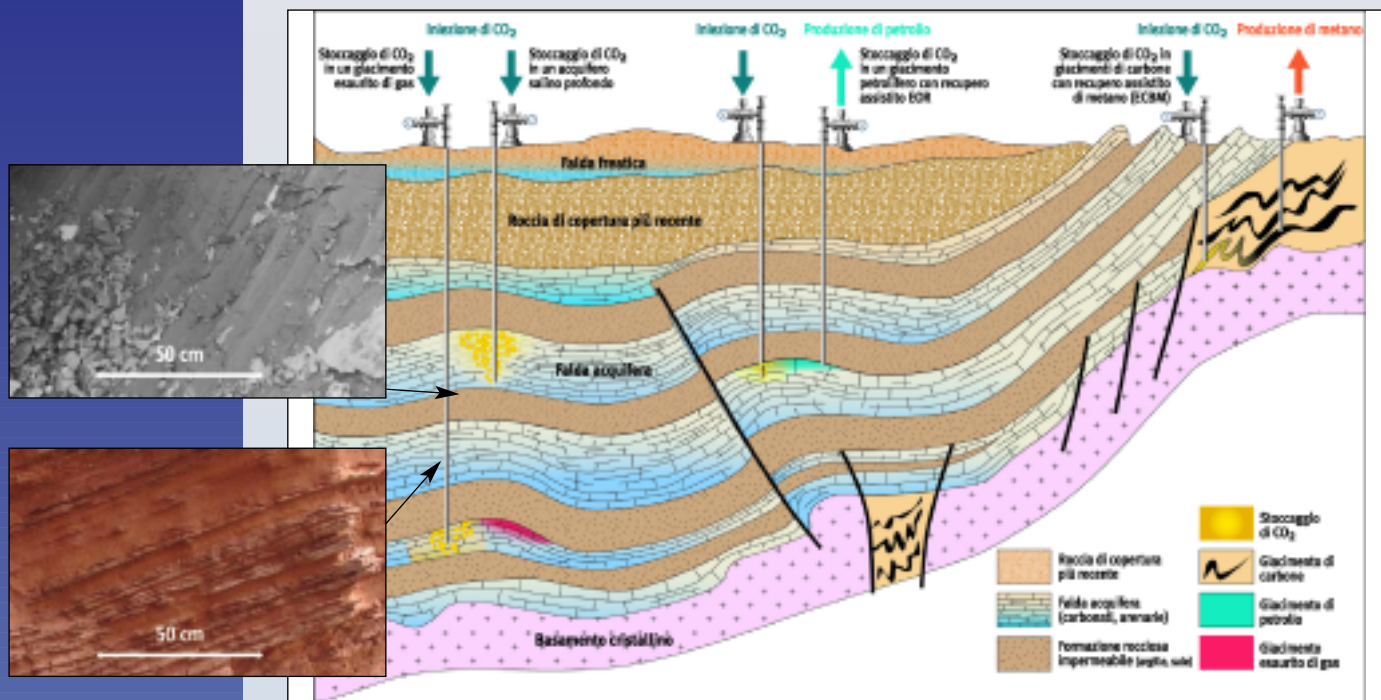


Figura 1
La CO₂ viene iniettata in strati geologici profondi costituiti da rocce porose e permeabili (v. l'arenaria nella figura inferiore), sovrastate da rocce impermeabili (v. l'argillite nella figura superiore) che impediscono alla CO₂ di fuoriuscire in superficie. Le principali opzioni di stoccaggio sono:
1. Giacimenti di petrolio/gas esauriti, usando, se possibile, il recupero assistito (EOR ed EGR)*;
2. Acquiferi contenenti acque saline* non utilizzabili dall'uomo;
3. Giacimenti profondi di carbone non sfruttabili, associando, se possibile, il recupero assistito di metano (ECBM)*.

Esistono tre opzioni principali per lo stoccaggio della CO₂ (Fig. 1).

- 1. Giacimenti esauriti di gas naturale e di petrolio** – ben conosciuti grazie alle esplorazioni e allo sfruttamento degli idrocarburi, offrono opportunità immediate d'immagazzinamento della CO₂;
- 2. Acquiferi salini*** – offrono un potenziale di stoccaggio più grande, ma non sono generalmente conosciuti altrettanto bene;
- 3. Giacimenti profondi di carbone non sfruttabili** – un'opzione per il futuro, una volta che sia stato risolto il problema di come iniettare grandi volumi di CO₂ nel carbone a bassa permeabilità*.

Le rocce serbatoio

Una volta iniettata nel sottosuolo in una formazione geologica adatta come serbatoio naturale (detta anche "roccia serbatoio"*), la CO₂ si accumula nelle fratture e negli interstizi tra i granuli della roccia, spostando e sostituendo così il fluido presente (per esempio il gas, l'acqua o il petrolio). Le rocce adatte per l'immagazzinamento geologico della CO₂ devono perciò avere un'elevata porosità* e sufficiente permeabilità*. Tali formazioni rocciose, risultato della deposizione di sedimenti durante le passate ere geologiche, sono comunemente ubicate nei cosiddetti "bacini sedimentari". In certi punti, que-

ste formazioni permeabili si alternano con rocce impermeabili, che possono comportarsi come un sigillo impenetrabile. I bacini sedimentari spesso ospitano giacimenti di idrocarburi e giacimenti naturali di CO₂, il che conferma la loro capacità di trattenere i fluidi per lunghi periodi di tempo, avendo essi intrappolato naturalmente petrolio, gas e persino CO₂ allo stato puro per milioni di anni.

Nelle figure che illustrano le possibili opzioni per lo stoccaggio della CO₂, il sottosuolo viene spesso rappresentato in maniera molto semplificata, come una struttura simile a una torta a strati omogenei. Nella realtà, esso è composto da strati rocciosi distribuiti in maniera irregolare e localmente interrotti da faglie; il tutto forma strutture rocciose complesse ed eterogenee. Una profonda conoscenza dei siti ed una solida esperienza in campo geologico sono quindi necessarie per valutare l'adeguatezza delle strutture sotterranee scelte per l'immagazzinamento della CO₂ a lungo termine.

I siti potenziali per lo stoccaggio della CO₂ devono soddisfare numerosi criteri; quelli essenziali sono:

- sufficiente porosità, permeabilità e capacità di immagazzinamento;
- la presenza di una roccia impermeabile sovrastante - la cosiddetta "roccia di copertura"* (ad esempio argilla, salgemma), che impedisca alla CO₂ di migrare verso l'alto;

- la presenza di “trappole strutturali” - ovvero elementi, come ad esempio una roccia di copertura a forma di cupola, che possano controllare la migrazione della CO₂ all'interno della roccia serbatoio;
- ubicazione a più di 800 metri di profondità, dove la pressione e la temperatura sono abbastanza elevate per permettere l'immagazzinamento della CO₂ in fase densa e per rendere così massime le quantità da confinare;
- l'assenza di acqua potabile: la CO₂ non deve mai essere iniettata in acque utilizzabili per il consumo o per altre attività umane.

Siti di stoccaggio in Europa

I bacini sedimentari sono molto diffusi in tutta Europa, ad esempio sotto i fondali del Mare del Nord o sulla terraferma attorno alla catena alpina (Fig. 2). Molte formazioni geologiche presenti nei bacini europei soddisfano i criteri per lo stoccaggio geologico della CO₂. Altre zone europee sono composte da crosta consolidata antica, come per esempio gran parte della Scandinavia, e quindi non contengono rocce adatte allo stoccaggio della CO₂.

Una delle zone potenzialmente adatte allo stoccaggio è il bacino Permiano meridionale, che si estende dall'Inghilterra alla Polonia (evidenziato nella figura 2 con l'ellisse più grande). Durante il processo di trasformazione dei sedimenti in rocce, si sono creati degli spazi interstiziali poi riempiti con acqua salina*, petrolio o gas. Gli strati d'argilla presenti tra le arenarie porose sono stati compattati e sono divenuti strati a bassa permeabilità, che impediscono ai fluidi di risalire. Gran parte delle formazioni d'arenaria si trovano a profondità tra 1.000 e 4.000 m, dove la pressione è sufficientemente elevata per immagazzinare la CO₂ in fase densa. In questo intervallo di profondità, il contenuto di sale nelle acque delle formazioni geologiche aumenta da circa 100 g/l a 400 g/l, il che le rende molto più salate rispetto all'acqua di mare (35 g/l). I movimenti tettonici nel bacino hanno provocato la deformazione plastica del salemma, creando centinaia di strutture a forma di cupola che successivamente hanno imprigionato gas naturale. Sono queste formazioni “trappola” che vengono studiate come possibili siti di stoccaggio della CO₂ e che vengono selezionate nei progetti pilota.

La capacità di stoccaggio

Tanto i politici che i legislatori e gli operatori hanno la necessità di sapere quanto spazio è disponibile per lo stoccaggio della CO₂. Le stime sulla capacità di stoccaggio sono solitamente molto approssimative e basate sull'estensione delle formazioni potenzialmente adatte. La capacità può essere valutata su scala nazionale, ottenendo una prima stima approssimativa, su scala di bacino o di roccia serbatoio, per trarre stime via via più precise, che tengano conto dell'eterogeneità e della complessità delle strutture geologiche.

Capacità volumetrica: le capacità di stoccaggio pubblicate a livello nazionale si basano generalmente sul calcolo del volume degli interstizi nelle formazioni. In teoria, la capacità di stoccaggio di una data formazione può essere calcolata moltiplicando la sua area per il suo spessore, la sua porosità

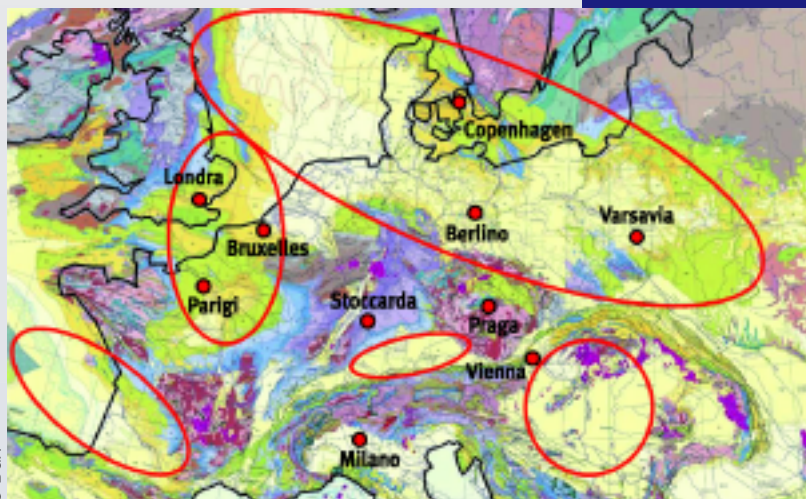


Figura 2
Carta geologica dell'Europa che evidenzia la collocazione dei principali bacini sedimentari (ellissi rosse) dove si trovano siti adatti allo stoccaggio della CO₂ (basata sulla Carta Geologica dell'Europa, scala 1:5.000.000).

media e la densità media della CO₂ alla pressione e temperatura a cui si trova la roccia serbatoio. Tuttavia, poiché gli spazi interstiziali sono già occupati da fluidi (generalmente acqua), solo una minima parte può essere usata per lo stoccaggio (l'1 - 3% circa). Questo ulteriore coefficiente di capacità di stoccaggio viene applicato per la stima della capacità volumetrica.

Capacità realistica: mediante ricerche dettagliate si possono produrre stime più realistiche della capacità per i singoli siti di stoccaggio. Lo spessore delle formazioni non è costante e le proprietà delle rocce serbatoio possono variare anche a breve distanza. La conoscenza della dimensione, della forma e delle proprietà geologiche delle strutture ci permette di ridurre l'incertezza nei calcoli volumetrici. In base a queste informazioni, si possono effettuare simulazioni al computer per predire l'andamento dell'iniezione e il movimento della CO₂ all'interno delle rocce serbatoio onde fare una stima realistica della capacità di stoccaggio.

Capacità effettiva: la capacità non è solo una questione di fisica delle rocce. Anche i fattori socio-economici influenzano la scelta se utilizzare o meno un sito potenzialmente adatto. Per esempio, il trasporto della CO₂ dalla fonte al sito di stoccaggio viene influenzato dai costi di trasporto. La capacità, inoltre, dipende anche dalla purezza della CO₂, perché la presenza di altri gas riduce il volume disponibile per la CO₂. Infine, le scelte politiche e l'accettazione da parte del pubblico sono elementi determinanti nel decidere se utilizzare o meno la capacità disponibile nella roccia serbatoio.

In conclusione, è noto che la capacità di stoccaggio della CO₂ in Europa è alta, anche se esistono incertezze dovute alla complessità ed eterogeneità dei siti e ai fattori socio-economici. Il progetto europeo GESTCO* ha stimato che la capacità di stoccaggio della CO₂ nei giacimenti di idrocarburi nella zona del Mare del Nord è pari a 37 Gt, il che permetterebbe a molti grandi impianti in questa regione di iniettare CO₂ per diversi decenni. Aggiornamenti e ulteriori mappature della capacità di stoccaggio in Europa sono oggetto di ricerche in corso su scala nazionale nei singoli stati membri e, su scala europea, nell'ambito del progetto europeo Geocapacity*.



Come possiamo trasportare e iniettare grandi quantità di CO₂?

Dopo essere stata catturata negli impianti industriali, la CO₂ viene compressa, trasportata e poi iniettata attraverso uno o più pozzi nella formazione geologica che funge da serbatoio naturale. L'intera catena deve essere ottimizzata per permettere lo stoccaggio di parecchi milioni di tonnellate di CO₂ all'anno.

Compressione

Una volta separato dai fumi delle centrali o degli impianti industriali, il flusso ad alta concentrazione di CO₂ così ottenuto viene disidratato e compresso, al fine di rendere il trasporto e lo stoccaggio più efficienti (**Fig. 1**). La disidratazione è necessaria per evitare la corrosione delle attrezzature e infrastrutture e, data l'alta pressione, la formazione di idrati (solidi simili a cristalli di ghiaccio che possono bloccare attrezzature e tubazioni). La CO₂ viene compressa fino a trasformarsi in un fluido denso che occupa molto meno spazio della forma gassosa. La compressione viene effettuata insieme alla disidratazione attraverso un processo a più stadi, che consiste in cicli ripetuti di compressione, raffreddamento e separazione dell'acqua. La pressione, la temperatura e il contenuto d'acqua devono tutti essere adattati alla modalità di trasporto e alle condizioni di pressione del sito di stoccaggio. Fattori chiave per la progettazione dell'impianto di compressione sono la portata del gas, le pressioni d'aspirazione e di scarico, la capacità termica del gas e l'efficienza del compressore. La tecnologia di compressione è già disponibile ed è ampiamente utilizzata in molti settori industriali.

Trasporto

La CO₂ può essere trasportata per nave o attraverso condutture.

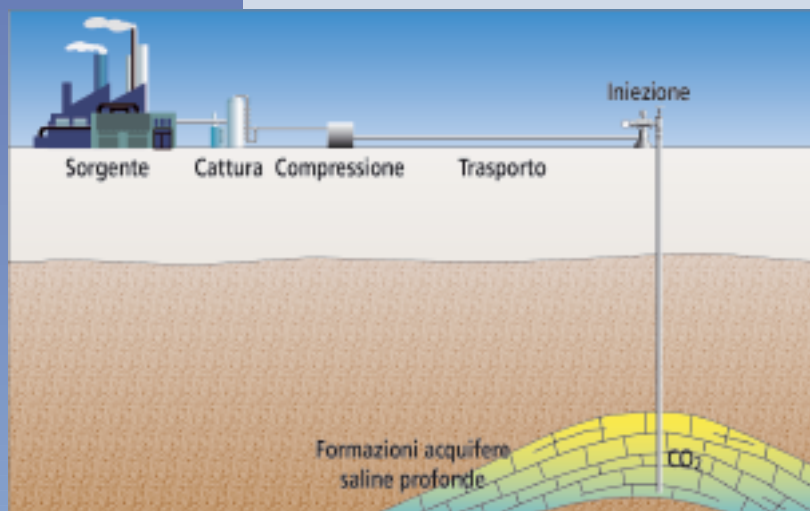
Attualmente il trasporto via nave della CO₂ per impieghi industriali viene svolto solo su scala molto piccola (10.000 - 15.000 m³); tuttavia questa potrebbe

diventare un'opzione attraente nel futuro per i progetti CCS nel caso in cui la fonte di CO₂ si trovi in aree costiere molto distanti da un sito di stoccaggio. Le navi attualmente utilizzate per trasportare gas petroliferi liquefatti (GPL) sono adatte anche per il trasporto della CO₂. In particolare, i sistemi semi-refrigerati sono sia pressurizzati che raffreddati e pertanto la CO₂ può essere trasportata allo stato liquido. Le più moderne navi per GPL hanno una capacità volumetrica che raggiunge i 200.000 m³ e sono in grado di trasportare 230.000 tonnellate di CO₂. Tuttavia, il trasporto via nave non garantisce un flusso continuo tra la fonte e il sito di stoccaggio, e occorre quindi impiegare serbatoi intermedi a terra. Il trasporto in condutture è attualmente impiegato per trasportare le grandi quantità di CO₂ usate dalle compagnie petrolifere nel recupero assistito di petrolio (Enhanced Oil Recovery, EOR)*. Nel mondo sono in funzione approssimativamente 3.000 km di condutture di CO₂, la maggior parte delle quali negli Stati Uniti. Questo tipo di trasporto ha un costo più competitivo rispetto a quello via nave e offre anche il vantaggio di fornire un flusso continuo di CO₂ dall'impianto di cattura al sito di stoccaggio. Tutte le condutture di CO₂ esistenti operano ad alte pressioni: in questo modo la CO₂ è in stato supercritico*, per cui si comporta come un gas, ma ha la densità di un liquido. Tre fattori chiave determinano la quantità che una conduttura può gestire: il suo diametro, la pressione lungo tutta la sua estensione e, conseguentemente, lo spessore delle sue pareti.

Iniezione

Quando la CO₂ arriva al sito di stoccaggio, viene iniettata sotto pressione nella roccia serbatoio (**Fig. 2**). La pressione d'iniezione deve essere sensibilmente maggiore di quella nella roccia serbatoio, in modo da allontanare dal punto di immissione il fluido in essa presente. Il numero di pozzi d'iniezione dipende dalla quantità di CO₂ che deve essere immagazzinata, dal tasso d'iniezione (il volume di CO₂ iniettato in un'ora), dalla permeabilità e dallo spessore della roccia serbatoio, dalla pressione d'iniezione massima e dal tipo di pozzo. Poiché l'obiettivo principale è il contenimento della CO₂ nel lungo periodo, bisogna essere certi dell'integrità idraulica della formazione rocciosa. Tassi d'iniezione troppo alti possono causare aumenti di pressione nel punto d'immissione, soprattutto in formazioni a bassa permeabilità. La pressione d'immissione non deve

Figura 1
Gli stadi dello stoccaggio geologico della CO₂. Per portare la CO₂ dal punto d'emissione ad un sito di stoccaggio sicuro e durevole, essa deve seguire una catena di operazioni che includono la cattura, la compressione, il trasporto e l'iniezione.



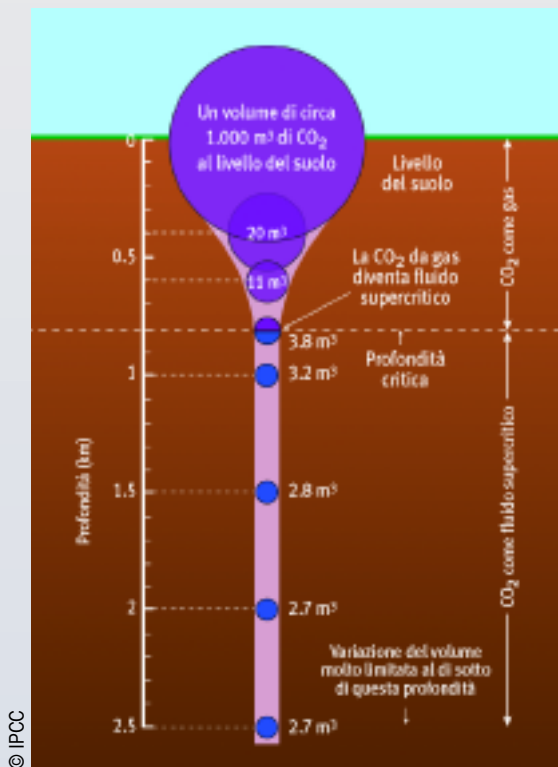


Figura 2
Quando viene iniettata nel sottosuolo, la CO₂ diventa un fluido denso supercritico a circa 800 m di profondità. Il suo volume si riduce drasticamente da 1.000 m³ in superficie sino a 2,7 m³ alla profondità di 2.000 m. Questo è uno dei fattori che rendono così interessante lo stoccaggio geologico di consistenti quantità di CO₂.

superare la pressione di frattura della roccia, poiché si potrebbe danneggiare la roccia serbatoio o la formazione sigillante sovrastante. Analisi e modelli geo-meccanici vengono utilizzati per identificare la massima pressione di iniezione che permette di evitare fratture nella formazione.

Vari processi chimici possono influenzare la portata di iniezione della CO₂ nella formazione rocciosa. A seconda del tipo di roccia serbatoio, della composizione chimica dei fluidi e delle condizioni del serbatoio stesso (quali temperatura, pressione, volume, concentrazione, ecc.), possono avvenire dei processi di dissoluzione o di precipitazione di minerali in prossimità del pozzo. Queste reazioni possono portare ad un aumento o ad una diminuzione dei tassi d'iniezione. Quando la CO₂ viene iniettata, una parte di essa si scioglie nell'acqua salina presente nella roccia serbatoio provocando una leggera diminuzione del pH*, limitata dalla dissoluzione dei carbonati presenti. I carbonati sono i primi a sciogliersi poiché la loro velocità di reazione è molto elevata e il loro scioglimento comincia non appena inizia l'iniezione della CO₂. Questo processo di dissoluzione può aumentare sia la porosità della roccia che l'iniettività*. Tuttavia, una volta disciolti, i minerali di carbonato possono precipitare di nuovo e cementare la formazione attorno al pozzo. Elevate portate possono essere utilizzate per limitare la riduzione di permeabilità attorno al pozzo, spostando in tal modo più lontano l'area dove avviene la precipitazione.

La disidratazione è un altro fenomeno indotto dall'iniezione. Dopo la fase di acidificazione, l'acqua residua che è rimasta attorno al pozzo d'iniezione si dissolve con facilità nei gas disidratati iniettati, il che fa aumentare la concentrazione delle componenti chimiche nell'acqua salina della formazione. Quando la concentrazione salina è sufficientemente elevata, i minerali (p. es. i sali) possono quindi precipitare, riducendo così la permeabilità attorno al pozzo.

I complessi meccanismi d'interazione che si verificano localmente attorno al pozzo d'iniezione influiscono sulla iniettività della CO₂, che varia in rapporto al tempo e alla distanza dal pozzo. Per valutare questi effetti vengono utilizzate delle simulazioni numeriche. Occorre quindi gestire attentamente le portate d'iniezione per contrastare i processi che potrebbero limitare l'immissione della quantità desiderata di CO₂.

Composizione del flusso di CO₂

La composizione e la purezza del flusso di CO₂, che sono il risultato del processo di cattura, hanno un'influenza significativa sullo stoccaggio della CO₂. La presenza di una piccola percentuale di altre sostanze, come ad esempio acqua, solfuro di idrogeno (H₂S), ossidi di zolfo e di azoto (SO_x, NO_x), azoto (N₂) e ossigeno (O₂), ha effetti sulle proprietà fisiche e chimiche della CO₂ e quindi sul suo comportamento e il suo impatto. La presenza di tali sostanze deve pertanto essere attentamente considerata nel progettare le fasi di compressione, trasporto e iniezione e anche nel tarare le condizioni di funzionamento e le attrezzature.

In conclusione, il trasporto e l'iniezione di grandi quantità di CO₂ sono già fattibili. Tuttavia, la diffusione su larga scala dello stoccaggio geologico della CO₂ richiede che tutte le fasi del processo siano adattate ad ogni singolo progetto. I parametri chiave da considerare sono le proprietà termodinamiche del flusso di CO₂ (Fig. 3), le portate, le condizioni a monte e quelle della roccia serbatoio.

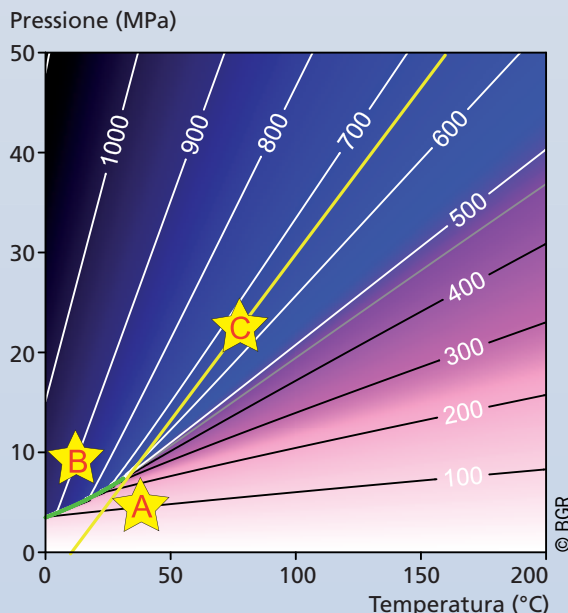


Figura 3
Densità della CO₂ allo stato puro (in kg/m³) in funzione della temperatura e della pressione. La linea gialla corrisponde al gradiente di temperatura e pressione tipici di un bacino sedimentario. A profondità superiori agli 800 metri (circa 8 MPa), le condizioni della roccia serbatoio favoriscono alte densità (parte evidenziata in blu). La curva verde rappresenta il limite fra le fasi gassosa e liquida della CO₂. Le condizioni tipiche di pressione e temperatura per la cattura, il trasporto e lo stoccaggio sono indicate rispettivamente dalle lettere A, B e C.

Cosa accade alla CO₂ una volta che si trova nel sito di stoccaggio?

Una volta iniettata nella roccia serbatoio, la CO₂, essendo più leggera del liquido già presente, sale verso l'alto andando a riempire gli spazi interstiziali al di sotto della roccia di copertura. Col trascorrere del tempo, una parte della CO₂ si discioglierà e in alcuni casi sarà trasformata in minerali. Questi processi si svolgono a differenti scale temporali e contribuiscono a rendere l'intrappolamento permanente.

Meccanismi di intrappolamento

Una volta iniettata in una roccia serbatoio, la CO₂ occupa gli spazi interstiziali della roccia, che nella maggior parte dei casi contengono già acqua salina. Qui hanno inizio una serie di meccanismi di intrappolamento della CO₂. Il primo è considerato il più importante ed è quello che impedisce alla CO₂ di salire in superficie. Gli altri tre tendono ad aumentare l'efficienza e la sicurezza dello stoccaggio con il passare del tempo.

1. Accumulo al di sotto della roccia di copertura (intrappolamento strutturale)

Dato che la CO₂ densa è più "leggera" dell'acqua, essa tende a salire verso l'alto. Questo movimento si arresta quando la CO₂ incontra uno strato roccioso impermeabile, la cosiddetta roccia di copertura. Essa è in genere composta da argilla o sale, ed agisce da trappola, impedendo alla CO₂ di salire ulteriormente e facendo sì che questa si accumuli al di sotto di essa. La **figura 1** illustra il movimento verso l'alto della CO₂ attraverso gli spazi interstiziali della roccia (in blu) fino a raggiungere la roccia di copertura.

2. Immobilizzazione negli spazi interstiziali più stretti (intrappolamento residuo)

L'intrappolamento residuo si verifica quando gli spazi interstiziali della roccia serbatoio sono così stretti che la CO₂ non può più muoversi verso l'alto, nonostante la differenza di densità rispetto all'acqua circostante. Questo processo si verifica principalmente durante la migrazione della CO₂ e generalmente può immobilizzare solo una piccola percentuale di CO₂, variabile a seconda delle proprietà della roccia serbatoio.

3. Dissoluzione (intrappolamento per dissoluzione)

Una piccola parte della CO₂ iniettata si scioglie nell'acqua salina presente negli spazi interstiziali della roccia serbatoio. Di conseguenza, l'acqua così arricchita di CO₂ diviene più pesante rispetto all'acqua che non la contiene, e tende quindi a spostarsi verso il fondo della roccia serbatoio. Il tasso di dissoluzione dipende dalla superficie di contatto tra la CO₂ e l'acqua salina. La quantità di CO₂ che si può sciogliere è limitata poiché non può andare oltre la concentrazione di saturazione della CO₂ nell'acqua. Tuttavia, a causa del movimento verso l'alto della CO₂ iniettata e del movimento verso il basso dell'acqua che ha in sé disciolta la CO₂, c'è un continuo rinnovamento del contatto tra l'acqua salina e la CO₂, il che aumenta la quantità di CO₂ che può venire disciolta. Questi processi sono relativamente lenti perché si svolgono all'interno di spazi interstiziali ristretti. Stime approssimative fatte per il sito del progetto Sleipner indicano che circa il 15% della CO₂ iniettata risulta disciolta 10 anni dopo l'iniezione.

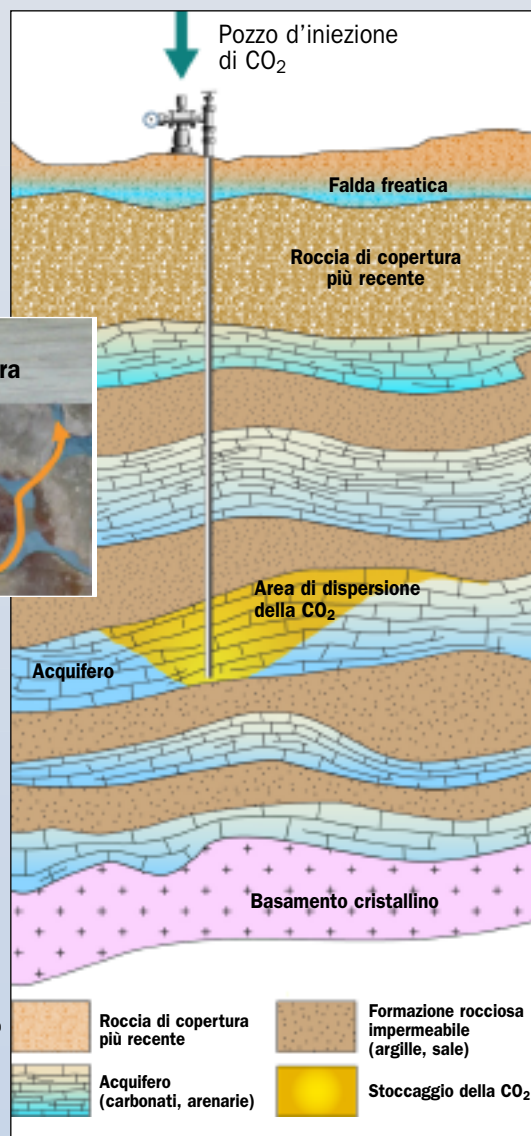
4. Mineralizzazione (intrappolamento per mineralizzazione)

La CO₂, soprattutto quando è disciolta nell'acqua

Vista al microscopio.



Figura 1
La CO₂ iniettata, che è più leggera dell'acqua, tende a salire ed è fermata dalle rocce impermeabili sovrastanti.



© BRGM im@gé



Figura 2
CO₂ densa in migrazione verso l'alto (bolle azzurro chiaro), che si scioglie e reagisce con i granelli della roccia, portando alla precipitazione di carbonato sulla superficie dei granelli (bianco).

salina della roccia serbatoio, può reagire con i minerali che compongono la roccia. Certi minerali possono sciogliersi, mentre altri possono precipitare, a seconda del pH e dei minerali che costituiscono la roccia serbatoio (Fig. 2). Le stime effettuate per Sleipner indicano che dopo un periodo di tempo molto lungo solamente una frazione relativamente piccola della CO₂ risulterà immobilizzata attraverso la mineralizzazione. Dopo 10.000 anni, solamente il 5% della CO₂ iniettata dovrebbe essere mineralizzata mentre il restante 95% dovrebbe essere disciolto, senza lasciare alcun residuo di CO₂ in fase densa.

L'importanza relativa di questi meccanismi d'intrappolamento dipende dalle specifiche caratteristiche di ogni sito. Per esempio, in una roccia serbatoio a forma di cupola, la CO₂ dovrebbe rimanere per lo più in fase densa anche per periodi di tempo molto lunghi, mentre nei serbatoi naturali piatti, come quello di Sleipner, la maggior parte della CO₂ iniettata si scioglierà o si mineralizzerà.

L'evoluzione della proporzione di CO₂ corrispondente ai diversi meccanismi d'intrappolamento per il progetto Sleipner è illustrata nella figura 3.

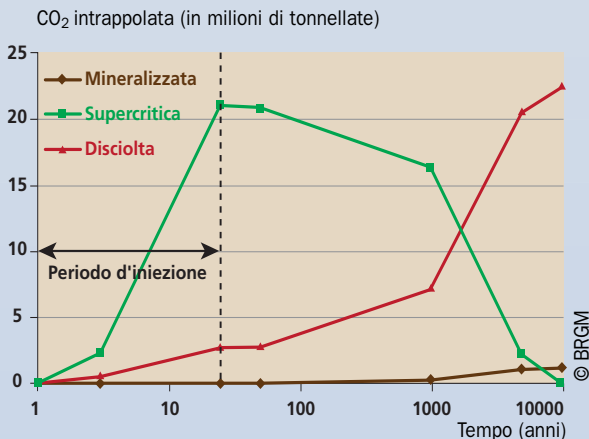


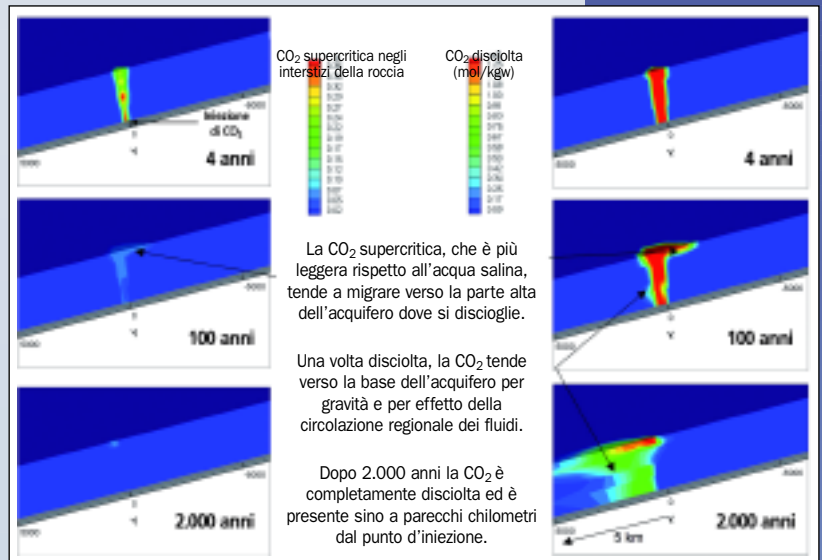
Figura 3
Evoluzione della CO₂ nelle sue varie forme, nella roccia serbatoio di Sleipner sulla base delle simulazioni di flusso. La CO₂ viene intrappolata in forma supercritica dai meccanismi 1 e 2, in forma disciolta dal meccanismo 3 e sotto forma di minerali dal meccanismo 4.

Come sappiamo tutto questo?

La conoscenza di questi processi deriva da quattro principali fonti d'informazione.

- **Misure di laboratorio:** esperimenti su campioni di roccia possono essere svolti per comprendere meglio i processi che avvengono a livello microscopico, quali la mineralizzazione, il flusso e la dissoluzione.
- **Simulazioni numeriche:** sono stati sviluppati dei codici di calcolo che si possono usare per prevedere il comportamento della CO₂ su scale temporali molto più lunghe (Fig. 4). Esperimenti di laboratorio vengono utilizzati per calibrare tali simulazioni numeriche.
- **Studio dei giacimenti naturali di CO₂**, in cui la CO₂ (generalmente di origine vulcanica) è stata intrappolata nel sottosuolo per lunghi periodi di tempo, spesso milioni di anni. Tali siti sono chiamati "analoghi naturali"* e ci forniscono informazioni sul comportamento della CO₂ e sulle conseguenze nel lunghissimo periodo della sua presenza nel sottosuolo.
- **Monitoraggio di progetti dimostrativi** attualmente in corso sullo stoccaggio geologico della CO₂, quali Sleipner (al largo della Norvegia), Weyburn (Canada), In Salah (Algeria) e K12-B (al largo dei Paesi Bassi). I risultati delle simulazioni nel breve periodo si possono confrontare con i dati reali raccolti nei progetti, consentendo così di perfezionare i modelli numerici.

Figura 4
Modello 3D della migrazione della CO₂ dopo l'iniezione di 150.000 tonnellate nell'arco di 4 anni nell'acquifero Dogger in Francia. La concentrazione della CO₂ supercritica (a sinistra) e la CO₂ disciolta nell'acqua salina (a destra) vengono rappresentate dopo 4, 100 e 2.000 anni dall'inizio dell'immissione. La simulazione si basa su dati di campagna ed esperimenti.



Solamente confrontando con controlli incrociati queste quattro fonti di informazione è possibile sviluppare conoscenze affidabili su tutti i processi che avvengono nei siti di stoccaggio a 1.000 metri sotto i nostri piedi.

Per concludere, è accertato che la sicurezza di un sito di stoccaggio della CO₂ tende ad aumentare con il tempo. Il fattore più importante sta nell'individuare una roccia serbatoio provvista di un'adeguata roccia di copertura in grado di trattenere la CO₂ (intrappolamento strutturale). I processi correlati a dissoluzione, mineralizzazione e intrappolamento residuo concorrono ad aumentare la sicurezza dello stoccaggio con il passare del tempo.

La CO₂ può fuoriuscire dal sito di stoccaggio? Quali potrebbero essere le conseguenze?

Lo studio dei sistemi naturali ha permesso di stabilire che i siti di stoccaggio scelti in modo accurato non dovrebbero presentare significativi fenomeni di fuoriuscita di gas. I giacimenti naturali contenenti gas ci aiutano a comprendere quali sono le condizioni necessarie perché il gas rimanga intrappolato nel sottosuolo e quali invece ne favoriscono la risalita verso la superficie. Inoltre, i siti naturali che presentano fenomeni di fuoriuscita in superficie ci aiutano a capire quali potrebbero essere gli impatti di eventuali fughe di CO₂.

Le vie di fuga

In generale, le potenziali vie di fuga sono o artificiali (ad es. i pozzi profondi) o naturali (sistemi di fratture e faglie). Sia i pozzi attivi che quelli abbandonati possono costituire vie di migrazione del gas: in primo luogo perché essi mettono in collegamento diretto la roccia serbatoio con la superficie, in secondo luogo perché essi sono composti da materiali che possono alterarsi o essere corrosi con il passare del tempo (**Fig. 1**). Una complicazione ulteriore è che non tutti i pozzi sono realizzati con le stesse tecniche costruttive: in genere quelli più recenti sono più sicuri di quelli vecchi. In ogni caso, il rischio dovuto a fughe di gas dai pozzi è basso, perché sia i pozzi vecchi che quelli nuovi possono essere controllati in modo molto efficace utilizzando metodi geochimici e geofisici, e perché l'industria petrolifera possiede già le tecnologie per le azioni correttive che potrebbero rendersi necessarie.

La migrazione dei gas lungo faglie e fratture naturali presenti nella roccia di copertura o negli strati ad essa sovrastanti, è un fenomeno complesso perché avviene lungo superfici irregolari con permeabilità variabile. Una buona comprensione scientifica e tecnica dei sistemi naturali, che presentano o no delle perdite, ci permette di progettare siti di stoccaggio della CO₂ con le stesse caratteristiche dei giacimen-

ti esistenti in natura, i quali hanno imprigionato la CO₂ o il metano per migliaia o milioni di anni.

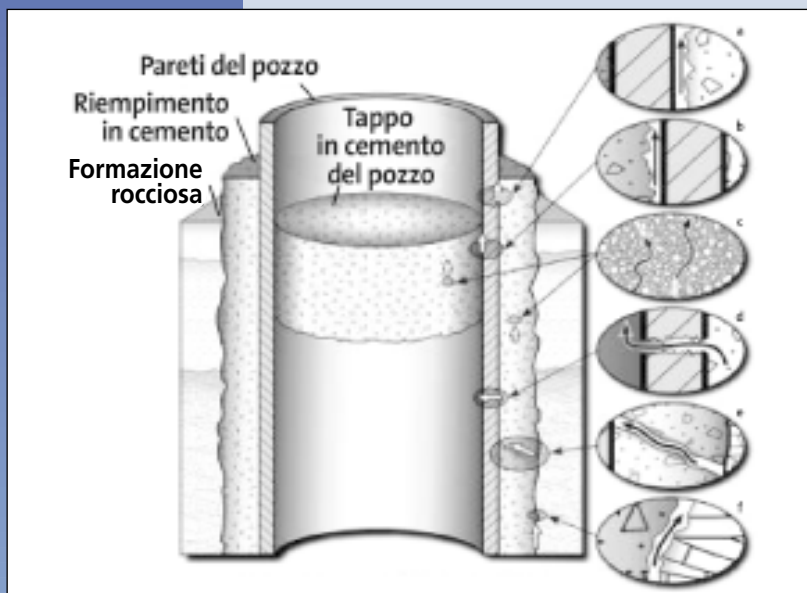
Che cosa ci insegnano gli analoghi naturali?

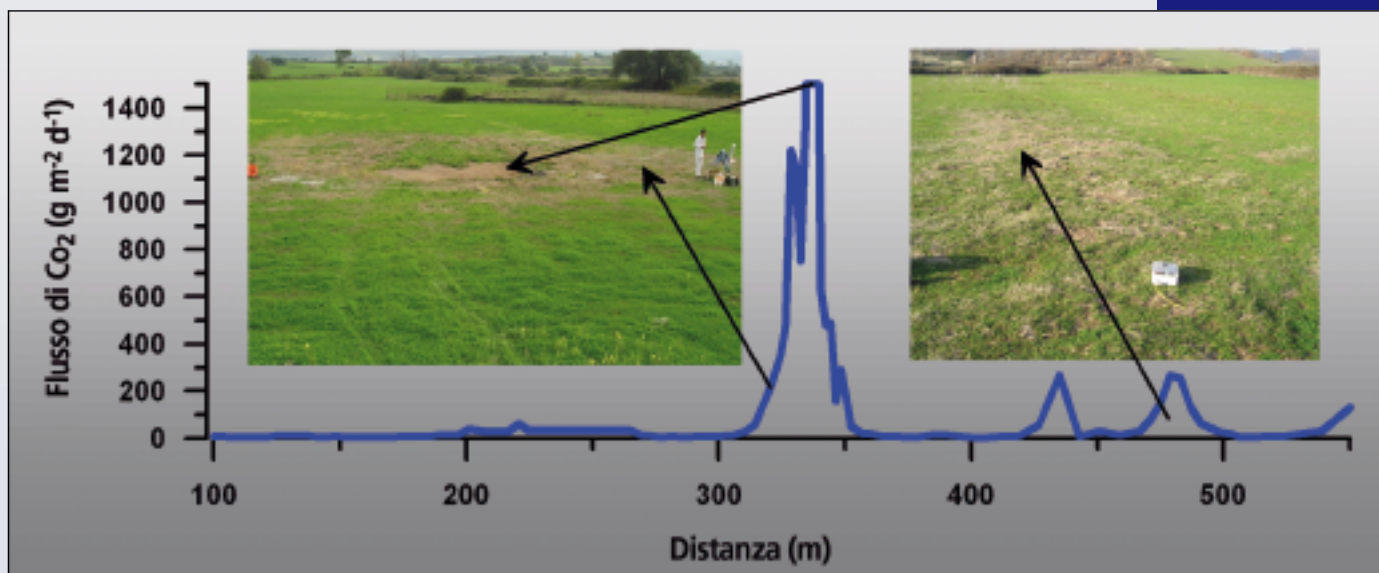
I sistemi naturali (i cosiddetti "analoghi naturali") sono una fonte d'informazione inestimabile per migliorare la nostra comprensione sia della migrazione dei gas di origine profonda, sia dello scambio naturale di gas tra la terra e l'atmosfera. Lo studio di numerosi analoghi naturali, con e senza fuoriuscite di gas, consente di trarre le seguenti conclusioni:

- in condizioni geologiche favorevoli, il gas prodotto naturalmente può rimanere intrappolato per centinaia di migliaia o anche milioni d'anni;
- giacimenti naturali o sacche isolate di gas esistono anche negli ambienti geologici meno favorevoli (aree vulcaniche);
- la migrazione di significative quantità di gas avviene per avezione (migrazione di masse gassose da zone a maggior pressione verso zone a minor pressione), in quanto la migrazione dei gas per diffusione è un processo molto lento;
- affinché si verifichi la migrazione per avezione, la pressione del fluido nella roccia serbatoio deve essere prossima alla pressione litostatica* per poter tenere aperte le faglie e le fratture o per creare nuove vie di fuga;
- le aree in cui i gas prodotti naturalmente fuoriescono in superficie sono situate quasi esclusivamente in regioni vulcaniche o sismiche molto fratturate, con punti di fuoriuscita del gas situati lungo faglie attive o attivatesi recentemente;
- "fughe" significative di gas si verificano solo raramente e tendono ad essere limitate a zone geotermiche o vulcaniche ricche di faglie, dove la CO₂ viene prodotta continuamente da processi naturali;
- le fuoriuscite di gas in superficie si manifestano di solito in punti circoscritti e hanno un impatto spazialmente limitato sull'ambiente circostante.

È perciò necessaria la compresenza di un certo numero di condizioni specifiche prima che si possa verificare una fuga di gas da una roccia serbatoio profonda. Quindi è altamente improbabile che un sito per lo stoccaggio geologico di CO₂, scelto e gestito correttamente sia dal punto di vista geologico che ingegneristico, presenti delle perdite. Tuttavia, anche se le perdite sono improbabili, i processi ed i potenziali effetti ad esse associati devono

Figura 1
Possibili vie di fuga della CO₂ in un pozzo. Migrazione attraverso materiale alterato (c, d, e) o lungo le interfacce tra i materiali (a, b, f).





essere pienamente compresi in modo da poter scegliere, progettare e gestire siti di stoccaggio geologico della CO₂ con la massima sicurezza.

Impatto sugli esseri umani

Noi respiriamo CO₂ di continuo. La CO₂ non è pericolosa per la salute dell'uomo se non ad alte concentrazioni. Valori fino a 5.000 ppm (0,5%) possono provocare mal di testa, vertigini e nausea. Con concentrazioni di CO₂ superiori a questo livello, ed in caso di esposizione prolungata, si possono avere effetti mortali, soprattutto per asfissia, quando la concentrazione d'ossigeno nell'aria scende al disotto del 16%, limite necessario per sostenere la vita di un essere umano. Tuttavia, se la CO₂ fuoriesce in un sito aperto o pianeggiante, essa si disperde rapidamente nell'aria, anche in assenza di vento. Il potenziale rischio per le popolazioni è quindi limitato a fuoriuscite in ambienti chiusi o in depressioni topografiche, dove le concentrazioni possono aumentare perché la CO₂ è più densa dell'aria e tende ad accumularsi in prossimità del suolo. Per la prevenzione e gestione del rischio, è utile conoscere le caratteristiche delle zone dove si verificano naturalmente fuoriuscite di gas. In realtà, molta gente vive in aree caratterizzate da continue emanazioni di gas naturali. Ad esempio a Ciampino, vicino a Roma, in Italia, alcune case sono situate a soli 30 metri dai punti di fuoriuscita del gas; qui le concentrazioni di CO₂ nel terreno raggiungono il 90% e circa 7 tonnellate di CO₂ vengono liberate ogni giorno nell'atmosfera. Gli abitanti del luogo evitano ogni pericolo seguendo semplici precauzioni, quali il non dormire nei seminterrati e il mantenere le case ben ventilate.

Impatto sull'ambiente

Il potenziale impatto sugli ecosistemi varia a seconda che il sito di stoccaggio si trovi in mare o sulla terraferma.

Negli ecosistemi marini, gli effetti principali della fuoriuscita di CO₂ sono un abbassamento localizzato del pH e l'impatto associato a questo. Esso riguarda soprattutto gli animali che vivono sul fondo marino e che non hanno la possibilità di allontanarsi. Tuttavia, le conseguenze sono limitate nello spazio e, una

volta cessata la fuoriuscita, l'ecosistema mostra presto segni di ripresa.

Negli ecosistemi terrestri, l'impatto si può riassumere in termini generali come segue.

- **Vegetazione** - Anche se concentrazioni di CO₂ pari a circa il 20-30% dei gas presenti nel suolo possono in realtà favorire la fertilizzazione delle piante e aumentare il tasso di crescita di certe specie, valori al di sopra di questa soglia possono essere letali per alcune di esse. Questo effetto è tuttavia estremamente localizzato attorno al punto di fuoriuscita del gas, e la vegetazione resta vigorosa e sana anche a soli pochi metri di distanza (**Fig. 2**).
- **Qualità della falda acquifera** - La composizione chimica dell'acqua di falda potrebbe essere alterata dall'aggiunta di CO₂, poiché l'acqua diventa più acida e alcuni elementi possono essere rilasciati dalle rocce e dai minerali presenti. Se anche la CO₂ dovesse disperdersi in una falda di acqua potabile, gli effetti rimarrebbero comunque localizzati; la quantificazione degli impatti è attualmente oggetto di indagine da parte dei ricercatori. È interessante notare che molte falde acquifere in tutta Europa sono arricchite da CO₂ naturale, e quest'acqua viene imbottigliata e venduta come "acqua minerale frizzante".
- **Integrità della roccia** - L'acidificazione dell'acqua di falda può avere come risultato lo scioglimento della roccia, una diminuzione della sua integrità strutturale e la formazione di voragini. Tuttavia, questo tipo di impatto si verifica solo in condizioni geologiche e idrogeologiche molto specifiche (zone tettonicamente attive, presenza di acquiferi di elevata portata, presenza di rocce granulari con cemento carbonatico e/o rocce calcaree), che è molto improbabile si presentino al di sopra di un sito di stoccaggio geologico realizzato dall'uomo.

Per concludere, dato che l'impatto di una ipotetica fuga di CO₂ dipende dalle specifiche caratteristiche del singolo sito, una conoscenza approfondita della situazione geologica e strutturale ci consente di individuare i possibili percorsi di migrazione del gas, di scegliere i siti con la più bassa probabilità di fuoriuscita di CO₂, di prevedere il comportamento dei gas e quindi di valutare e prevenire qualsiasi impatto significativo sugli esseri umani e sull'ecosistema.

Figura 2
Impatto della fuoriuscita di CO₂ sulla vegetazione: flusso intenso (sinistra) e flusso ridotto (destra). L'impatto è limitato all'area dove fuoriesce la CO₂.

Come possiamo monitorare in profondità e in superficie i siti di stoccaggio?

Tutti i siti di stoccaggio della CO₂ dovranno essere monitorati per ragioni operative, di sicurezza, ambientali, sociali ed economiche. Occorre elaborare una strategia per definire in modo preciso che cosa monitorare e come farlo.

Perché è necessario il monitoraggio?

Il monitoraggio di un sito è fondamentale per garantire che venga raggiunto il principale obiettivo dello stoccaggio geologico della CO₂, cioè l'isolamento a lungo termine della CO₂ di origine antropica. Le ragioni per attuare il monitoraggio dei siti di stoccaggio sono numerose, e riguardano:

- **Operatività:** per controllare e ottimizzare il processo d'iniezione.
- **Sicurezza e ambiente:** per evitare o minimizzare qualsiasi impatto sulla popolazione, la fauna e gli ecosistemi in prossimità di un sito di stoccaggio, e garantire l'azione di mitigazione sui cambiamenti climatici.
- **Società:** per fornire al pubblico informazioni utili a comprendere gli aspetti legati alla sicurezza del sito e per aumentare la consapevolezza dei cittadini sulla affidabilità delle tecniche CCS.
- **Economia:** per verificare gli effettivi volumi di CO₂ confinati nel sito di stoccaggio, in modo che siano considerati quali "emissioni evitate" nei registri nazionali delle emissioni (ETS)* dell'Unione Europea.

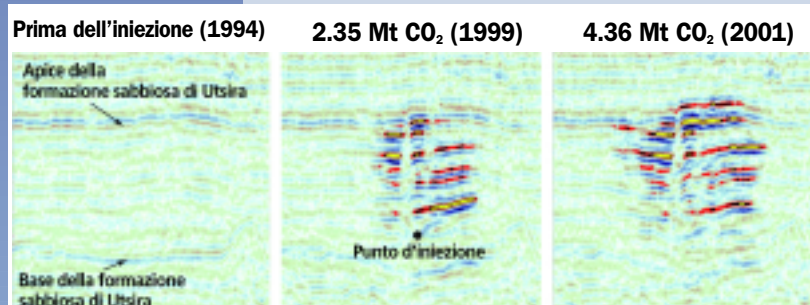
Il monitoraggio, sia delle condizioni iniziali dell'ambiente (la cosiddetta "baseline") che del successivo comportamento del sito, è un importante requisito nella Direttiva CE sullo stoccaggio geologico della CO₂, pubblicata il 23 aprile 2009. Gli operatori devono essere in grado di dimostrare che il comportamento del sito di stoccaggio è conforme ai regolamenti e che continuerà ad esserlo nel lungo periodo. Il monitoraggio è dunque un elemento importante nel ridurre le incertezze sul comportamento dei siti, ed è quindi strettamente connesso alla gestione della sicurezza.

Quali sono gli obiettivi del monitoraggio?

Il monitoraggio può essere applicato a svariati aspetti e processi nelle diverse componenti di un sito.

- **Identificazione e descrizione dell'area di dispersione* della CO₂** - seguendone la migrazione a partire dal punto d'iniezione. Fornisce dati fondamentali per calibrare i modelli predittivi della distribuzione futura della CO₂ nel sito. Molte tecniche sono già disponibili, soprattutto le indagini di sismica a riflessione ripetute nel tempo, che sono state applicate con successo a vari progetti dimostrativi (**Fig. 1**).
- **Integrità della roccia di copertura** - necessaria per valutare se la CO₂ è confinata all'interno della roccia serbatoio e per consentire di dare rapidamente l'allarme in caso di migrazioni impreviste della CO₂ verso l'alto. Questo può essere particolarmente importante durante la fase d'iniezione, quando le pressioni all'interno della roccia serbatoio aumentano, benché temporaneamente, in modo significativo.
- **Integrità del pozzo.** Questo è un tema importante poiché i pozzi profondi potrebbero fornire una via diretta per la migrazione della CO₂ verso la superficie. I pozzi per l'iniezione della CO₂, oltre a quelli di osservazione e a quelli pre-esistenti abbandonati, devono essere attentamente monitorati durante e dopo la fase d'iniezione per prevenire fughe di CO₂. Il monitoraggio è utilizzato anche per verificare che tutti i pozzi siano stati sigillati in modo efficace quando non più in uso. Gli attuali sistemi di monitoraggio geofisici e geochimici, comunemente usati nell'industria petrolifera, possono essere installati all'interno o al di sopra dei pozzi per garantire la tempestività dei sistemi di allarme e la sicurezza.
- **Migrazione negli strati sovrastanti.** In certi siti di stoccaggio vi sono, al di sopra della roccia di copertura, ulteriori strati rocciosi che hanno proprietà simili ad essa. Questi possono essere una componente importante nel ridurre i rischi di fuoriuscita della CO₂ nel mare o nell'atmosfera. Se il monitoraggio nella roccia serbatoio o attorno alla roccia di copertura indica un'inaspettata migrazione verso l'alto, allora sarà necessario monitorare anche gli strati sovrastanti. Molte delle tecniche impiegate per controllare l'evoluzione della CO₂ iniettata e l'integrità della roccia di copertura possono essere utilizzate anche per gli strati sovrastanti.
- **Risalita in superficie, rilevamento e misurazione nell'atmosfera.** Per garantire che la CO₂ iniettata non sia migrata in superficie, sono disponibili varie tecniche geochimiche, biochimiche e di telerilevamento per localizzare le perdite, valutare e seguire la distribuzione della CO₂ nel suolo e la

Figura 1
Immagini del sottosuolo (ottenute con la sismica a riflessione) per controllare l'evoluzione dell'area di dispersione della CO₂ nel progetto Sleipner prima dell'iniezione (iniziata nel 1996) e dopo l'iniezione (rispettivamente dopo 3 e 5 anni).



sua dispersione nell'atmosfera o nell'ambiente marino (Fig. 2).

- **Misurazione, per scopi normativi e fiscali, della quantità di CO₂ immagazzinata.** Sebbene la quantità di CO₂ iniettata possa essere facilmente misurata alla sommità del pozzo, la quantificazione nella roccia serbatoio è tecnicamente più complessa. Se avviene una migrazione di CO₂ verso la superficie, le quantità rilasciate devono essere quantificate per poter essere contabilizzate nei registri nazionali dei gas serra e nei registri europei (ETS).
- **Movimenti del terreno e microsismicità*.** L'aumento della pressione nella roccia serbatoio dovuto all'iniezione della CO₂ potrebbe, in casi specifici, aumentare la probabilità di eventi microsismici e di movimenti del terreno su piccola scala. Sono disponibili al riguardo tecniche di monitoraggio microsismico e metodi di telerilevamento (da aeromobile o da satellite) in grado di misurare anche piccolissime deformazioni del terreno.

Come si esegue il monitoraggio?

Un'ampia gamma di tecniche di monitoraggio è già stata applicata nei progetti dimostrativi e di ricerca esistenti. Vi sono metodi che controllano direttamente la CO₂ e altri che misurano indirettamente i suoi effetti sulle rocce, i fluidi e l'ambiente. Le misurazioni dirette comprendono, ad esempio, l'analisi dei fluidi provenienti dai pozzi profondi e la misurazione delle concentrazioni dei gas nel terreno o nell'atmosfera. I metodi indiretti comprendono i rilievi geofisici, il monitoraggio dei cambiamenti di pressione nei pozzi e delle variazioni del pH nell'acqua di falda. Il monitoraggio è previsto per tutti i siti di stoccaggio, sia in mare che sulla terraferma. La selezione di tecniche appropriate di monitoraggio dipende dalle caratteristiche tecniche e geologiche del sito e dagli obiettivi del monitoraggio stesso. Una vasta gamma di tecniche di monitoraggio è già disponibile (Fig. 3). Molte di queste sono comunemente utilizzate nell'industria petrolifera e in quella del gas e vengono ora adattate allo stoccaggio della CO₂. Sono pure in

corso ricerche volte all'ottimizzazione dei metodi esistenti ed allo sviluppo di tecniche innovative, con l'obiettivo di migliorarne la risoluzione e l'attendibilità, ridurne i costi, automatizzarne l'uso e dimostrarne l'efficacia.

Strategie di monitoraggio

Nel progettare una strategia di monitoraggio è necessario effettuare una serie di scelte in funzione delle specifiche condizioni geologiche e ingegneristiche del singolo sito, come per esempio la geometria e la profondità della roccia serbatoio, le probabili dimensioni dell'area di dispersione della CO₂, i possibili percorsi di fuoriuscita, la geologia degli strati sovrastanti, il tempo e la portata d'iniezione, e le caratteristiche in superficie, quali la topografia, la densità della popolazione, le infrastrutture e gli ecosistemi. Una volta scelte le tecniche di misurazione più appropriate e la loro ubicazione, si devono misurare i valori di fondo presenti nel sito, per poter avere dati a cui fare riferimento in tutte le misurazioni future. Infine, qualunque programma di monitoraggio deve essere sufficientemente flessibile in modo da potersi evolvere assieme al progetto di stoccaggio stesso. Una strategia di monitoraggio capace di integrare tutti questi aspetti è una componente essenziale nell'analisi del rischio e nella verifica della sicurezza e dell'efficienza del sito.

Per concludere, il monitoraggio di un sito di stoccaggio della CO₂ è già realizzabile grazie alle numerose tecniche attualmente disponibili o in via di implementazione. Tuttavia la ricerca continua, non solamente per sviluppare nuovi strumenti (in particolare da usare per siti a mare), ma anche per ottimizzare le attività di monitoraggio e ridurne i costi.



© CO₂GeoNet

Figura 2
Boa di monitoraggio alimentata da pannelli solari, con galleggianti e dispositivo per il campionamento del gas sul fondo del mare.

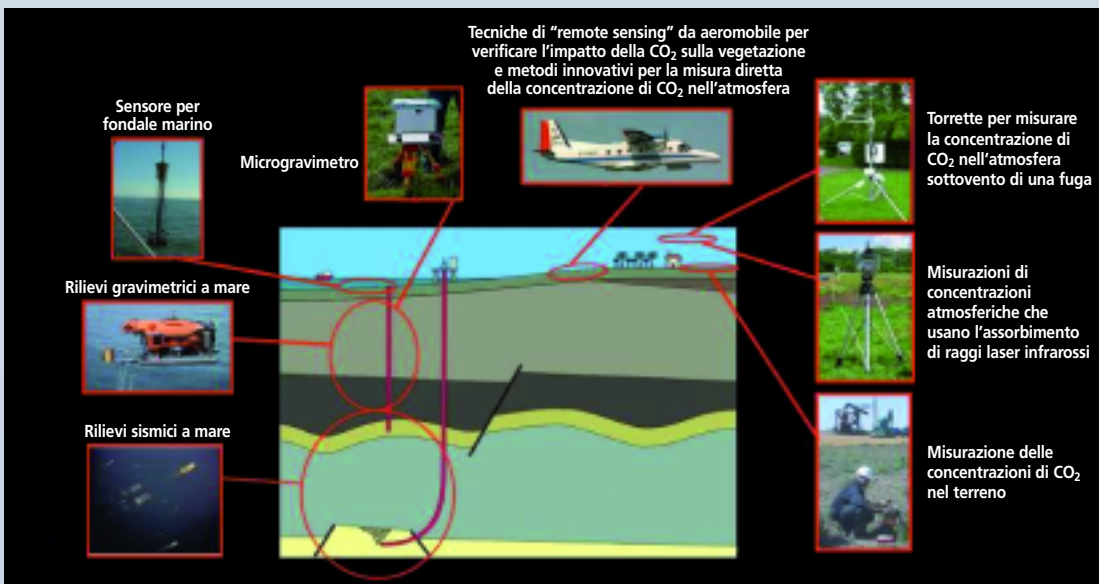


Figura 3
Una piccola selezione delle tecniche disponibili per monitorare i diversi comparti di un sito di stoccaggio della CO₂.

© CO₂GeoNet

Quali norme di sicurezza si devono imporre e rispettare?

Per garantire la sicurezza e l'efficienza di un sito di stoccaggio, le regole di progettazione e di gestione devono essere stabilite dalle amministrazioni competenti e venir rispettate dagli operatori.

Anche se lo stoccaggio geologico della CO₂ è ampiamente accettato come una delle possibili opzioni per mitigare i cambiamenti climatici, l'applicazione delle tecnologie CCS su larga scala richiede che siano ben definiti preliminarmente i criteri di sicurezza per la salute umana e l'ambiente a livello locale. Tali criteri corrispondono ai requisiti imposti agli operatori da parte delle autorità competenti per assicurare che gli impatti locali sulla salute, la sicurezza e l'ambiente (comprese le risorse idriche sotterranee) siano trascurabili nel breve, medio e lungo periodo.

Un aspetto chiave dello stoccaggio geologico della CO₂ è che esso sia permanente, e di conseguenza ci si aspetta che i siti non presentino perdite. Tuttavia lo scenario "e se dovesse accadere?" implica la necessità di valutare i rischi e di esigere dagli operatori il rispetto di quelle prassi che sono in grado di prevenire qualsiasi perdita o comportamento anomalo dei siti. Secondo l'IPCC, occorre che la CO₂ iniettata rimanga confinata sottoterra per almeno 1.000 anni. Questo consentirebbe alle concentrazioni atmosferiche di CO₂ di stabilizzarsi o ridursi grazie allo scambio naturale con le acque oceaniche, minimizzando così gli effetti del riscaldamento globale. Tuttavia, gli impatti a livello locale devono essere valutati su un arco di tempo che va da pochi giorni a molte migliaia d'anni.

La durata di un progetto di stoccaggio della CO₂ può essere suddivisa (**Fig. 1**) in una serie di tappe principali. La sicurezza sarà garantita per tutta la durata da:

- attenta selezione e caratterizzazione del sito;
- valutazione delle condizioni di sicurezza;
- corretto funzionamento;
- piano di monitoraggio adeguato;
- idonee azioni correttive.

rante il processo di cattura. Questo è importante per evitare qualsiasi interazione negativa con il pozzo, la roccia serbatoio, la roccia di copertura e, in caso di perdite, con eventuali acque di falda sovrastanti.

Criteri di sicurezza per la realizzazione del progetto

La sicurezza deve essere dimostrata prima dell'inizio delle operazioni.

Per quanto riguarda la selezione dei siti, i principali componenti che devono essere esaminati sono:

- la roccia serbatoio e la roccia di copertura;
- gli strati sovrastanti e in particolare gli strati impermeabili che potrebbero agire da sigilli secondari;
- la presenza di faglie o pozzi che potrebbero costituire vie di fuga verso la superficie;
- le falde contenenti acqua potabile;
- la popolazione e i vincoli ambientali in superficie.

Le tecniche usate nella ricerca di petrolio e gas sono le stesse utilizzate per studiare la geologia e la geometria del sito di stoccaggio. Le simulazioni del flusso, delle interazioni chimiche e geomeccaniche della CO₂ all'interno della roccia serbatoio consentono di fare previsioni sul comportamento della CO₂ nel lungo periodo, e di definire i parametri per un'iniezione efficiente. Di conseguenza, un'attenta caratterizzazione del sito dovrebbe consentire la modellizzazione del suo comportamento in condizioni "normali" e fornire così gli elementi per valutare se possiede le caratteristiche che lo rendono idoneo a contenere per sempre la CO₂. Dopodiché, la valutazione dei rischi deve considerare anche gli scenari meno plausibili in relazione alle condizioni future del sito di stoccaggio, compresi gli eventi imprevisi. In particolare, è importante individuare ogni possibile via di fuga, livello di rischio e possibili conseguenze (**Fig. 2**). Ogni scenario che preveda fuoriuscite di CO₂ dovrebbe essere analizzato da esperti per valutarne la probabilità d'insorgenza e la potenziale gravità, anche tramite simulazioni numeriche. Ad esempio, l'evoluzione spaziale dell'area di dispersione della CO₂ deve essere attentamente analizzata per individuare possibili collegamenti con zone di faglia. Nell'analisi dei rischi si devono valutare attentamente anche l'incertezza e la sensibilità dei modelli alle variazioni dei parametri considerati. I potenziali effetti della CO₂ sugli esseri umani e l'ambiente devono essere quantificati attraverso studi di valutazione di impatto, una prassi abituale per la concessione di licenze per gli impianti industriali. Nell'ambito di queste procedure vengono esaminati sia gli scenari "normali", sia quelli con fuoriuscite di CO₂, al fine di valutare i potenziali rischi legati agli impianti d'iniezione.

Il programma di monitoraggio, tanto nel breve che

Figura 1
Le fasi principali di un progetto di stoccaggio.



Questo è in relazione ai seguenti obiettivi:

- garantire che la CO₂ rimanga nella roccia serbatoio;
- mantenere l'integrità del pozzo;
- preservare le proprietà fisiche della roccia serbatoio (porosità, permeabilità, iniettività, ecc.) e la natura impermeabile della roccia di copertura;
- prendere in considerazione la composizione del flusso di CO₂, prestando particolare attenzione a tutte le impurità non eliminate du-

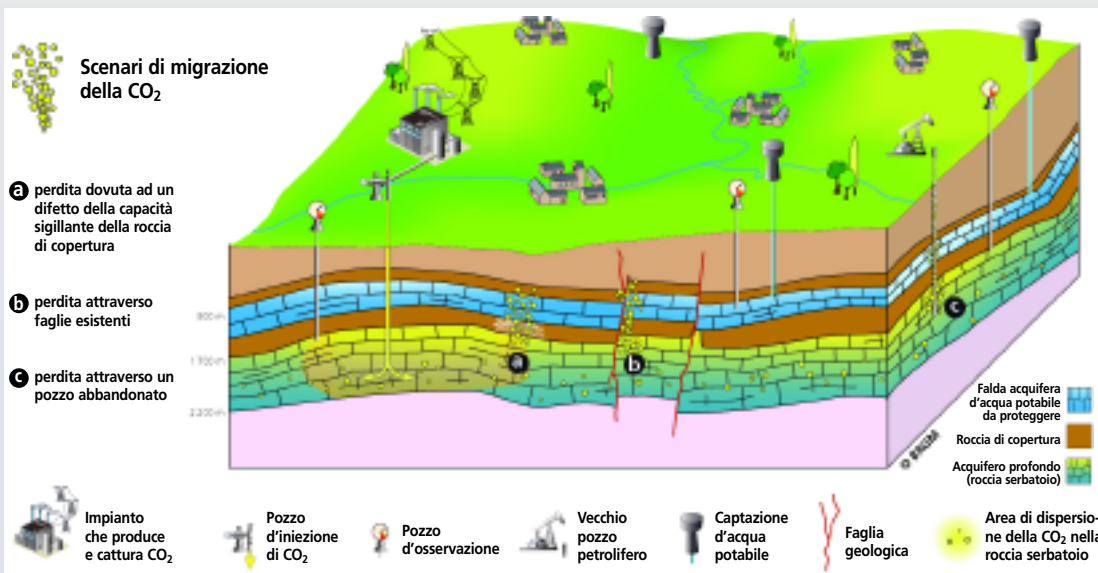


Figura 2
Esempio di scenari con potenziali perdite di CO₂.

nel lungo periodo, deve essere stabilito in base all'analisi dei rischi e deve riguardare i parametri critici definiti all'interno dei vari scenari. I suoi obiettivi principali sono: controllare l'evoluzione dell'area di dispersione della CO₂; verificare l'integrità del pozzo e della roccia di copertura; individuare eventuali fuoriuscite di CO₂; valutare la qualità delle acque di falda; garantire che la CO₂ non raggiunga la superficie. Il piano di risanamento e di mitigazione è l'ultima componente della valutazione della sicurezza e mira a specificare l'elenco delle azioni correttive da usare in caso di fuoriuscita o comportamento anomalo. Esso considera l'integrità della roccia di copertura e l'eventuale malfunzionamento del pozzo durante e dopo l'iniezione, nonché i rimedi estremi come la possibilità di recuperare la CO₂ confinata. Tali azioni correttive sono utilizzate abitualmente nell'industria petrolifera e del gas e comprendono la messa in sicurezza dei pozzi, la riduzione della pressione d'iniezione, il ritiro parziale o totale del gas, l'estrazione dell'acqua per ridurre la pressione, l'estrazione di gas poco profondo, ecc.

Criteri di sicurezza durante e dopo la fase di iniezione

Le principali problematiche di sicurezza sono associate alla fase operativa: una volta terminata l'iniezione, infatti, il sito diventa più sicuro grazie al calo di pressione.

Sappiamo di poter eseguire l'iniezione e lo stoccaggio della CO₂ in maniera sicura grazie all'esperienza acquisita dall'industria in svariati settori che prevedono l'impiego di CO₂. La progettazione e il controllo delle operazioni sono basati principalmente sulle competenze dell'industria petrolifera e del gas, in particolare in merito allo stoccaggio stagionale del gas naturale e al recupero assistito di petrolio (EOR). I principali parametri da controllare sono:

- la pressione e il tasso d'iniezione - la pressione deve essere mantenuta al di sotto di quella di frattura, cioè della pressione sopra la quale possono prodursi fratture nella roccia di copertura;
- il volume iniettato, per uniformarsi a quanto previsto nelle simulazioni numeriche;
- la composizione del flusso della CO₂ iniettata;

- l'integrità del pozzo / dei pozzi d'iniezione e di ogni altro pozzo ubicato all'interno o vicino all'area di dispersione della CO₂;
- l'estensione dell'area di dispersione della CO₂ e l'individuazione di eventuali fuoriuscite;
- la stabilità del terreno.

Durante l'iniezione, occorre confrontare l'effettivo comportamento della CO₂ iniettata con le previsioni. Questo permette di migliorare costantemente la nostra conoscenza del sito. Ogni volta che si rileva un comportamento anomalo, si deve aggiornare il programma di monitoraggio ed adottare le necessarie azioni correttive. Nel caso di perdite sospette, adeguati strumenti di controllo possono venir concentrati su un'area specifica del sito di stoccaggio, dalla roccia serbatoio fino alla superficie. Questo permette di rilevare la risalita di CO₂ e, inoltre, qualsiasi eventuale impatto che potrebbe danneggiare la falda d'acqua potabile, l'ambiente e gli esseri umani.

Una volta completata l'iniezione, inizia la fase di chiusura: i pozzi devono essere chiusi correttamente e dismessi, il programma di simulazione e quello di monitoraggio devono venir aggiornati e, se necessario, misure correttive devono essere adottate per ridurre i rischi. Quando il livello di rischio è considerato sufficientemente basso, la responsabilità sul sito di stoccaggio viene trasferita alle autorità nazionali e il piano di monitoraggio può essere concluso o ridotto al minimo.

La Direttiva Europea stabilisce un quadro normativo per assicurare che la cattura e lo stoccaggio della CO₂ sia un'opzione di mitigazione dell'effetto serra realmente disponibile ed attuabile in maniera responsabile e nel rispetto della sicurezza.

Per concludere, i criteri di sicurezza sono essenziali per l'applicazione delle tecnologie di stoccaggio della CO₂ su scala industriale. Essi vanno adattati ad ogni specifico sito di stoccaggio. Tali criteri sono particolarmente importanti per l'accettazione da parte del pubblico, ed essenziali nella procedura di concessione delle licenze, per la quale gli organi preposti alla regolamentazione devono decidere il livello di dettaglio atto a garantire la sicurezza.

Acqua salina: acqua molto salata ovvero che contiene alte concentrazioni di sali in soluzione.

Acquifero: formazione di roccia permeabile che contiene acqua. Gli acquiferi più superficiali contengono acqua dolce usata per il consumo umano. Quelli a maggiori profondità sono saturi di un'acqua salina non adatta ad essere usata per scopi civili o industriali e sono chiamati **acquiferi salini profondi**.

Analogo naturale: giacimento naturale di CO₂. Esistono sia siti chiusi, sia siti che rilasciano CO₂. Il loro studio può migliorare la nostra comprensione dell'evoluzione della CO₂ nel lungo periodo nelle formazioni geologiche profonde.

Area di dispersione della CO₂: distribuzione spaziale della CO₂ supercritica all'interno delle formazioni geologiche.

CCS (Carbon Capture and Storage): cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica.

CSLF (Carbon Sequestration Leadership Forum): iniziativa internazionale sui cambiamenti climatici incentrata sullo sviluppo di tecnologie competitive per la separazione e la cattura della CO₂, il suo trasporto e lo stoccaggio sicuro nel lungo periodo.

ECBM (Enhanced Coal Bed Methane): tecnologia che usa la CO₂ per estrarre il metano presente nei giacimenti di carbone non sfruttabili.

EGR (Enhanced Gas Recovery) – Recupero assistito di gas: tecnica che incrementa l'estrazione del gas grazie all'iniezione di fluidi (come vapore o CO₂).

EOR (Enhanced Oil Recovery) – Recupero assistito di petrolio: tecnica che incrementa l'estrazione del petrolio grazie all'iniezione di fluidi (come vapore o CO₂).

ETS (Emission Trading Scheme): sistema per lo scambio di quote di emissione di anidride carbonica (CO₂) e altri gas a effetto serra.

GeoCapacity: progetto di ricerca europeo per la stima della capacità totale di stoccaggio geologico in Europa della CO₂ di origine antropica.

GESTCO: progetto di ricerca europeo, ora concluso, che ha verificato e quantificato le potenzialità di stoccaggio geologico della CO₂ in 8 paesi (Norvegia, Danimarca, Regno Unito, Belgio, Paesi Bassi, Germania, Francia e Grecia).

IEA - GHG (International Energy Agency – Greenhouse Gas R&D programme): una collaborazione internazionale che mira a valutare le tecnologie per ridurre le emissioni di gas serra, diffondere i risultati di questi studi, identificare obiettivi per la ricerca, lo sviluppo e le attività dimostrative e promuoverne il raggiungimento.

Approfondimenti:

Il rapporto speciale dell'IPCC sulle tecnologie CCS:
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Il sito della Commissione Europea sulle tecnologie CCS:
<http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/>

Direttiva europea sullo stoccaggio della CO₂:
http://ec.europa.eu/environment/climat/ccs/eccp1_en.htm

Sistema per lo scambio di quote di emissione (Emission Trading Scheme - ETS):
<http://ec.europa.eu/environment/climat/emission.htm>

Sito dell'IEA GHG sugli strumenti per il monitoraggio:
http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Iniettività: caratterizza la facilità con cui un fluido (come la CO₂) può essere iniettato in una formazione geologica. È definita come il rapporto tra il tasso d'iniezione e la differenza di pressione fra il punto d'iniezione alla base del pozzo e quella della formazione.

IPCC (International Panel on Climate Change): organizzazione fondata nel 1988 dalla WMO (Organizzazione Meteorologica Mondiale) e dall'UNEP (Programma Ambientale delle Nazioni Unite) per valutare le informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche di rilievo per la comprensione dei cambiamenti climatici, dei loro potenziali impatti e delle opzioni di adattamento e mitigazione. IPCC e Al Gore hanno ricevuto il Premio Nobel per la Pace nel 2007.

Microsismicità: leggeri tremori o vibrazioni della crosta terrestre non correlati a terremoti e che possono essere provocati da una varietà di agenti naturali o artificiali.

Permeabilità: proprietà o capacità di una roccia porosa di trasmettere un fluido; è una misura della facilità relativa di movimento di un fluido sottoposto a un gradiente di pressione.

pH: misura dell'acidità di una soluzione. Il pH 7 corrisponde a una soluzione neutra.

Porosità: percentuale del volume lordo di una roccia non occupato dai minerali. Questi spazi sono chiamati pori o interstizi e possono essere pieni di fluidi; tipicamente nelle rocce profonde il fluido è acqua salina ma può anche essere petrolio, o un gas come il metano, o la CO₂ d'origine naturale.

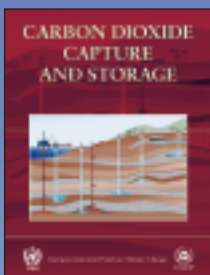
Pozzo: un foro profondo e di piccolo diametro ottenuto per trivellazione, come ad esempio un pozzo di petrolio.

Pressione litostatica: la forza esercitata su una roccia sotterranea dalle rocce sovrastanti. La pressione litostatica aumenta con la profondità.

Roccia di copertura: strato di roccia impermeabile che funge da barriera per il movimento di liquidi e gas e che quindi forma una "trappola" qualora sovrasti una roccia serbatoio.

Roccia serbatoio: strato di roccia o di sedimenti sufficientemente poroso e permeabile per ospitare e immagazzinare la CO₂. Le più comuni rocce serbatoio sono l'arenaria e il calcare.

Supercritico: lo stato di un fluido a pressioni e temperature al di sopra dei valori critici (31.03° C e 7.38 MPa per la CO₂). Le proprietà di detti fluidi variano continuamente, da quelle tipiche di un gas (quando la pressione è bassa), a quelle tipiche dei liquidi (quando la pressione è alta).



Cosa può fare CO₂GeoNet per voi

CO₂GeoNet è il Network Europeo di Eccellenza impegnato a fornire informazioni imparziali e scientificamente valide circa la sicurezza e l'efficienza dello stoccaggio geologico della CO₂. Il Network è composto da più di 150 esperti di 13 istituti di ricerca in Europa, con un alto profilo scientifico nel campo dello stoccaggio geologico della CO₂. Il Network è stato avviato grazie al supporto della Commissione Europea nell'ambito del 6° Programma Quadro per la ricerca e lo sviluppo tecnologico.

Gli istituti del Network sono:

BGR , BGS , BRGM , GEUS , Heriot Watt University , IFPEN , Imperial College , NIVA , OGS , IRIS , SINTEF , TNO , Università di Roma La Sapienza-CERI .



Le attività del Network

I ricercatori del Network lavorano insieme per migliorare costantemente le conoscenze sullo stoccaggio geologico della CO₂ e sugli strumenti necessari per la sua realizzazione nel rispetto della sicurezza. Essi sono impegnati in progetti di ricerca di alto profilo che riguardano tra l'altro: la roccia serbatoio, la roccia di copertura, le potenziali vie di migrazione della CO₂, il potenziale impatto delle fuoriuscite sugli esseri umani e sugli ecosistemi locali, la comunicazione e il coinvolgimento dell'opinione pubblica.

Il punto di forza del CO₂GeoNet sta nella sua capacità di formare gruppi multidisciplinari di esperti, in grado di studiare i vari aspetti dello stoccaggio geologico della CO₂, anche nelle loro complesse interrelazioni.

Oltre alle attività di ricerca, CO₂GeoNet offre anche:

- formazione per ricercatori e ingegneri che vogliono lavorare nel settore dello stoccaggio della CO₂;
- consulenza scientifica, anche su progetti proposti da terzi (qualità geotecnica, tutela ambientale, gestione dei rischi, pianificazione e aspetti normativi, ecc);
- comunicazione di informazioni indipendenti e imparziali basate sui risultati della ricerca;
- collaborazione con i diversi interlocutori che a vario titolo sono interessati allo stoccaggio geologico della CO₂.

Al fine di far crescere la consapevolezza sulla realizzazione dello stoccaggio geologico della CO₂ per mitigare i cambiamenti climatici, un gruppo di eminenti ricercatori del CO₂GeoNet ha cercato di dare una risposta al quesito: "Che cosa significa veramente lo stoccaggio geologico della CO₂?", affrontando sei domande chiave, basandosi su più di un decennio di ricerche in Europa e sui progetti dimostrativi in corso in tutto il mondo. L'obiettivo è quello di fornire informazioni scientifiche chiare e imparziali ad un vasto pubblico, e di incoraggiare il dialogo sulle questioni essenziali dello stoccaggio geologico della CO₂.

Il lavoro, che trovate riassunto in questo opuscolo, è stato presentato durante il primo Seminario di Formazione e d'Incontro del Network svoltosi a Parigi il 3 ottobre 2007. Il pubblico presente comprendeva una varietà di interlocutori: industriali, ingegneri, scienziati, autorità centrali e locali, giornalisti, ONG, sociologi, insegnanti e studenti. In totale, hanno partecipato al seminario 170 persone di 21 paesi diversi; con l'occasione, essi hanno avuto l'opportunità di mettere a confronto i loro punti di vista e di acquisire una comprensione più completa dello stoccaggio geologico della CO₂.

Per ulteriori informazioni, o richieste di corsi di formazione personalizzati sullo stoccaggio geologico, si prega di contattare il segretariato di CO₂GeoNet all'indirizzo info@co2geonet.com o di visitare il nostro sito web www.co2geonet.eu

CO₂GeoNet

Il Network Europeo di Eccellenza sullo stoccaggio geologico della CO₂



www.co2geonet.eu

Segretariato: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN**, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI



La versione italiana è stata
curata dall'associazione CO₂Club
www.co2club.it

ISBN: 978-88-905255-0-6