

# Lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>

Lo stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub> è una metodologia mutuata da fenomeni assolutamente naturali e conosciuti, con i quali l'umanità convive da sempre. Il livello di conoscenza tecnologica in merito alle strutture geologiche idonee allo stoccaggio, ai meccanismi di intrappolamento stabile, al monitoraggio pre- e post-iniezione, pur non impedendo il naturale sviluppo di nuove metodologie, strumenti e conoscenze, favorito anche dai numerosi progetti dimostrativi a livello internazionale, garantisce già oggi standard di sicurezza elevatissimi

■ Salvatore Lombardi e Sergio Persoglia

## Introduzione

Tra i provvedimenti da mettere in pratica urgentemente per mitigare i cambiamenti climatici, la cattura e lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> (CCS) possono svolgere un ruolo fondamentale come tecnologie "ponte". Esse infatti consentono un impiego non inquinante dei combustibili fossili, che continueranno ad essere la sorgente principale di energia sino a quando lo sviluppo di tecnologie e infrastrutture per le energie rinnovabili porteranno ad una progressiva riduzione della nostra dipendenza dagli idrocarburi. È interessante notare che lo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> non è un'invenzione dell'uomo, bensì una soluzione mutuata da un fenomeno assolutamente naturale e ampiamente diffuso: sotto terra, infatti, si trovano giacimenti naturali di CO<sub>2</sub> che esistono da milioni di anni.

Le tecniche CCS costituiscono dunque un sistema di produzione dell'energia a ciclo chiuso, in cui il carbonio, originariamente estratto dal sottosuolo sotto for-

ma di gas, petrolio e carbone, viene reimpresso nel sottosuolo sotto forma di CO<sub>2</sub>.

## Lo sviluppo delle tecnologie CCS nel 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, nei quali la CO<sub>2</sub> viene iniettata a grandi profondità: Sleipner in Norvegia (circa 1 Mt/anno dal 1996), 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 CO<sub>2</sub>, promossa in questi ed altri siti, è stata fondamentale per ampliare le conoscenze, per promuovere lo sviluppo della comunità scientifica mondiale che si occupa dell'argomento, per avviare la 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 la sua accettabilità da parte dell'opinione pubblica. 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

■ **Salvatore Lombardi**  
CO<sub>2</sub>GeoNet, Università la Sapienza, Roma

■ **Sergio Persoglia**  
CO<sub>2</sub>GeoNet, Istituto nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

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 CO<sub>2</sub> e altri provvedimenti per promuovere lo sviluppo e l’utilizzo sicuro delle tecnologie CCS.

### Le capacità di immagazzinamento di CO<sub>2</sub> nel sottosuolo

La CO<sub>2</sub> non può essere iniettata dovunque: occorre prima identificare le formazioni geologiche adatte. Le rocce serbatoio, idonee per lo stoccaggio geologico, 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.

In particolare esistono tre opzioni principali (figure 1 e 2):

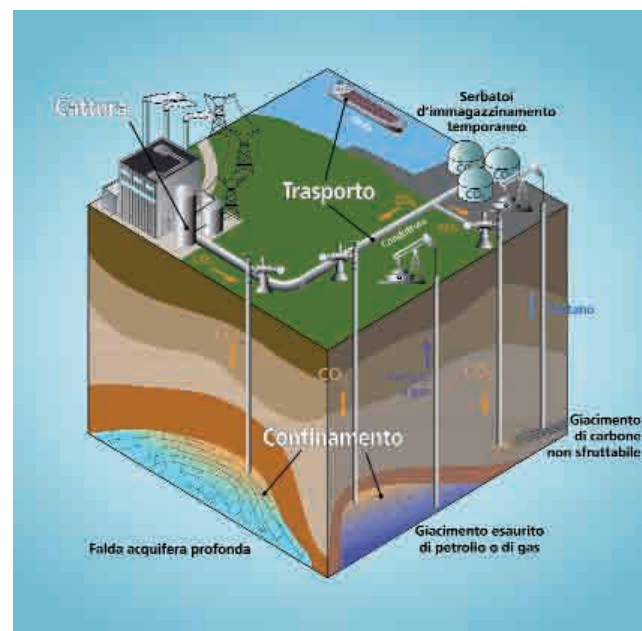
1. *Giacimenti esauriti di gas naturale e di petrolio* – ben conosciuti grazie alle esplorazioni e allo sfruttamento degli idrocarburi, offrono opportunità immediate d’immagazzinamento della CO<sub>2</sub>;
2. *Acquiferi salini* – offrono un potenziale di stoccaggio ben maggiore, ma non sono generalmente 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 CO<sub>2</sub> nel carbone a bassa permeabilità.

Una volta iniettata in una formazione geologica adatta come serbatoio naturale (detta anche “roccia serbatoio”), la CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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

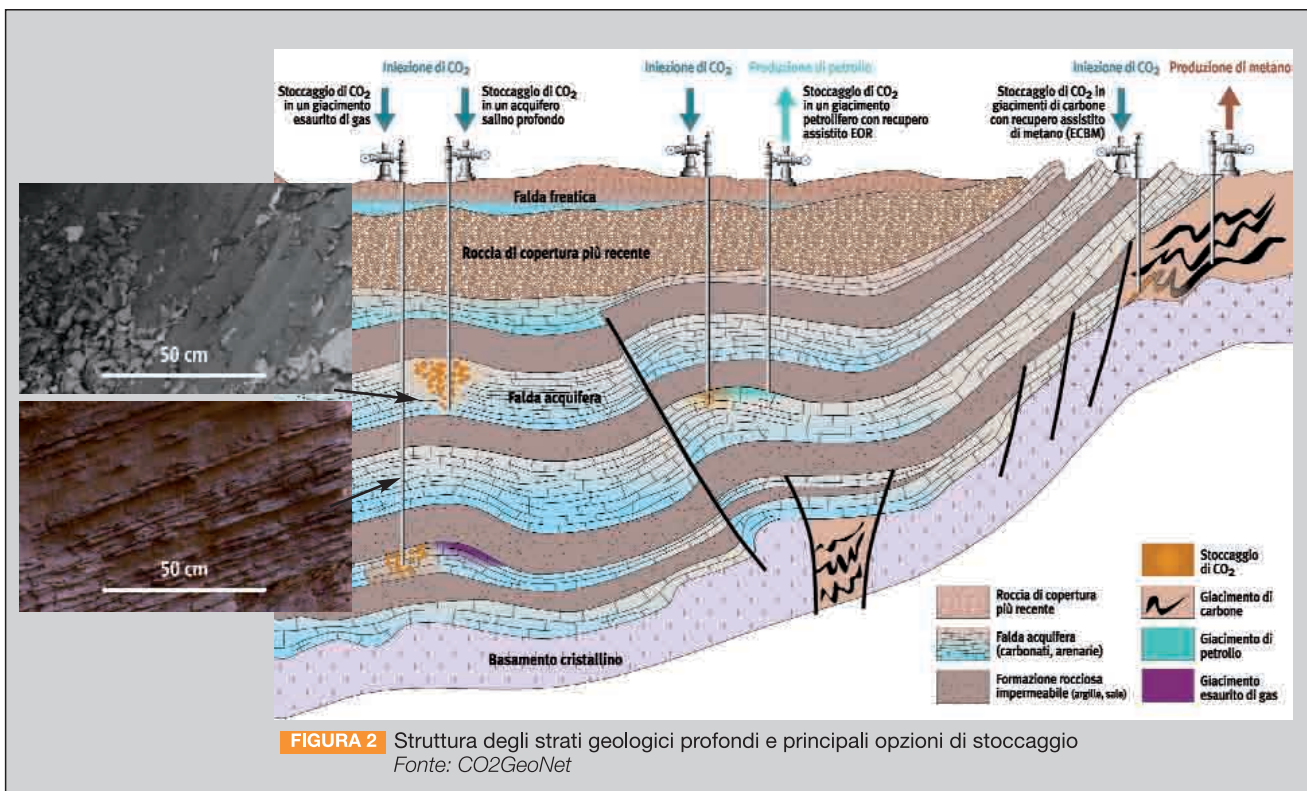
nei cosiddetti “bacini sedimentari”. In certi punti, queste formazioni permeabili si alternano con rocce impermeabili, che possono comportarsi come un sigillo impenetrabile. I bacini sedimentari spesso ospitano giacimenti di idrocarburi e giacimenti naturali di CO<sub>2</sub>, il che conferma la loro capacità di trattenere i fluidi per lunghi periodi di tempo, avendo essi intrappolato naturalmente petrolio, gas e persino CO<sub>2</sub> allo stato puro per milioni di anni.

I siti adatti allo stoccaggio della CO<sub>2</sub> sono caratterizzati da:

- sufficiente porosità, permeabilità e capacità di immagazzinamento;
- la presenza di una roccia impermeabile sovrastante, la cosiddetta “roccia di copertura” (ad esempio argilla, sale), che impedisca alla CO<sub>2</sub> 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 migra-



**FIGURA 1** Il processo di cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>: fasi principali e possibili forme di confinamento geologico  
Fonte: CO2GeoNet



zione della  $CO_2$  all'interno della roccia serbatoio;

- l'ubicazione a più di 800 metri di profondità, dove la pressione e la temperatura sono abbastanza elevate da permettere l'immagazzinamento della  $CO_2$  in fase densa e per rendere così massime le quantità confinate;
- l'assenza di acqua potabile: la  $CO_2$  non deve mai essere iniettata in acque utilizzabili per il consumo o per altre attività umane.

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. Molte formazioni geologiche presenti nei bacini europei soddisfano i criteri per lo stoccaggio geologico della  $CO_2$ . Altre zone europee sono composte da crosta consolidata antica (per esempio gran parte della Scandinavia) e quindi non contengono rocce adatte allo stoccaggio della  $CO_2$ . Tutto ciò premesso, le stime sulla capacità di stoccaggio

sono solitamente approssimative e basate sull'estensione fisica delle formazioni potenzialmente adatte. La capacità può quindi essere valutata, con una prima stima approssimativa su scala di bacino o di roccia serbatoio, e definita successivamente in modo più preciso, tenendo conto dell'eterogeneità e della complessità delle strutture geologiche.

La capacità di stoccaggio teorica si basa generalmente sul calcolo del volume degli interstizi nelle formazioni. Essa può essere calcolata moltiplicando l'area della formazione per il suo spessore, la sua porosità media e la densità media della  $CO_2$  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 di questi può essere usata per lo stoccaggio (l'1-3% circa). Questo ulteriore coefficiente viene applicato per la stima della capacità volumetrica.

Mediante ricerche dettagliate si possono produrre sti-

me 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 permette di ridurre l'incertezza nei calcoli. In base a queste informazioni, si possono effettuare simulazioni al computer per predire l'andamento dell'iniezione e il movimento della CO<sub>2</sub> all'interno delle rocce serbatoio e fare quindi una stima più realistica della capacità di stoccaggio.

La capacità non è solo una questione di fisica delle rocce. Anche fattori socio-economici influenzano la scelta se utilizzare o meno un sito potenzialmente adatto (es. il costo del trasporto della CO<sub>2</sub> dalla fonte al sito di stoccaggio). La capacità, inoltre, dipende anche dalla purezza della CO<sub>2</sub>, perché la presenza di altri gas riduce il volume disponibile per la CO<sub>2</sub>. Infine, le scelte politiche e l'accettazione da parte del pubblico sono elementi determinanti nel decidere se utilizzare o meno la capacità disponibile. L'insieme di queste considerazioni porta a introdurre un concetto di capacità effettiva.

In conclusione, è noto che la capacità di stoccaggio della CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 sono stati eseguiti, su scala europea, nell'ambito del progetto europeo Geocapacity.

## Il trasporto della CO<sub>2</sub> dal luogo di cattura al sito di stoccaggio

Una volta separato dai fumi delle centrali o degli impianti industriali, il flusso ad alta concentrazione di

CO<sub>2</sub> così ottenuto viene disidratato e compresso, al fine di rendere il trasporto e lo stoccaggio più efficienti. 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 CO<sub>2</sub> viene compressa fino a trasformarsi in un fluido denso che occupa molto meno spazio della forma gassosa.

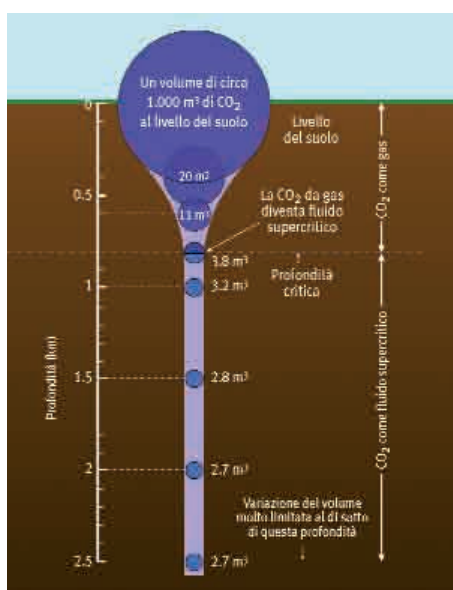
Il suo trasporto può essere effettuato per nave o attraverso condutture.

Attualmente il trasporto via nave per impieghi industriali viene svolto solo su piccola scala (10.000 - 15.000 m<sup>3</sup>); tuttavia questa potrebbe diventare un'opzione attraente nel futuro, per i progetti CCS, nel caso in cui la fonte di CO<sub>2</sub> si trovi in aree costiere molto distanti da un sito di stoccaggio adatto. Le navi attualmente utilizzate per trasportare gas petroliferi liquefatti (GPL) sono adatte anche per il trasporto della CO<sub>2</sub>. In particolare, i sistemi semi-refrigerati sono sia pressurizzati che raffreddati e pertanto la CO<sub>2</sub> può essere trasportata allo stato liquido. Le più moderne navi per GPL hanno una capacità volumetrica che raggiunge i 200.000 m<sup>3</sup> e sono in grado di trasportare 230.000 tonnellate di CO<sub>2</sub>. 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub> dall'impianto di cattura al sito di stoccaggio. Tutte le condutture di CO<sub>2</sub> esistenti operano ad alte pressioni: in questo modo la CO<sub>2</sub> è in stato supercritico, per cui si comporta come un gas, ma ha la densità di un liquido.

## L'iniezione della CO<sub>2</sub>

Allorché la CO<sub>2</sub> arriva al sito di stoccaggio, viene iniettata sotto pressione nella roccia serbatoio (figura 3). La pressione d'iniezione deve essere ovviamente sensibilmente maggiore di quella nella roccia serbatoio, in modo da allontanare dal punto di immissione il fluido in esso presente. Il numero di pozzi d'iniezione dipende dalla quantità di CO<sub>2</sub> che deve essere immagazzinata, dal tasso d'iniezione (il volume di CO<sub>2</sub> 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 confinamento della CO<sub>2</sub> per un 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 superare la pressione di frattura della roccia, poiché si potrebbe danneggiare la roccia serbatoio o la formazione sigillante sovrastante. Analisi e modelli geomeccanici vengono utilizzati per identifi-



**FIGURA 3** Fattori che rendono fattibile lo stoccaggio geologico di consistenti quantità di CO<sub>2</sub>  
Fonte: CO2GeoNet

care la massima pressione di iniezione che permette di evitare fratture nella formazione.

Vari processi chimici possono influenzare la portata di iniezione della CO<sub>2</sub> 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. Non appena la CO<sub>2</sub> 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. 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.

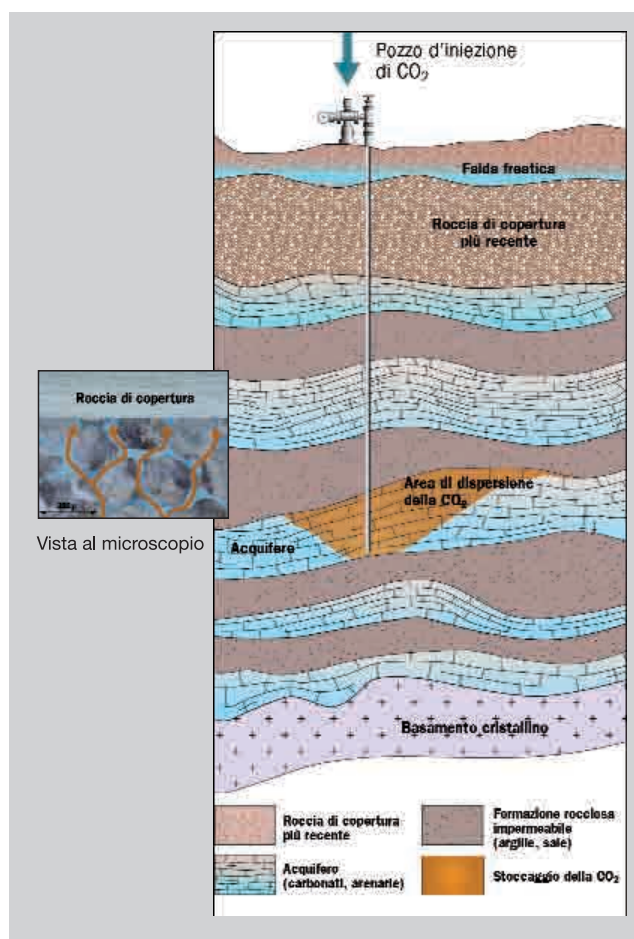
La composizione e la purezza del flusso di CO<sub>2</sub>, effetto del processo di cattura, hanno un'influenza significativa sullo stoccaggio della CO<sub>2</sub>. La presenza di piccole percentuali di altre sostanze, come ad esempio acqua, solfuro di idrogeno (H<sub>2</sub>S), ossidi di zolfo e di azoto (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>), azoto (N<sub>2</sub>) e ossigeno (O<sub>2</sub>), hanno effetti sulle proprietà fisiche e chimiche della CO<sub>2</sub> e quindi sul suo comportamento e il suo impatto.

## I meccanismi di intrappolamento

Una volta iniettata in una roccia serbatoio, la CO<sub>2</sub> occupa gli spazi interstiziali, che nella maggior parte dei casi contengono già acqua salina. Qui ha inizio una serie di fenomeni di intrappolamento della CO<sub>2</sub>. Il primo è considerato il più importante ed è quello che impedisce alla CO<sub>2</sub> di salire in superficie. Gli altri tre tendono ad aumentare l'efficienza e la sicurezza dello stoccaggio con il passare del tempo.

### Accumulo al di sotto della roccia di copertura (intrappolamento strutturale)

Dato che la  $CO_2$  densa è più “leggera” dell’acqua, essa tende a salire verso l’alto. Questo movimento si arresta quando la  $CO_2$  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  $CO_2$  di salire ulteriormente e facendo sì che questa si accumuli al di sotto di essa. La figura 4 illustra il movimento verso l’alto della  $CO_2$  attraverso gli spazi interstiziali della roccia (in blu) fino a raggiungere la roccia di copertura.



**FIGURA 4** La  $CO_2$  iniettata, più leggera dell’acqua, tende a salire ed è fermata dalle rocce impermeabili sovrastanti  
Fonte: CO2GeoNet

### 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  $CO_2$  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  $CO_2$  e generalmente può immobilizzare solo una piccola percentuale di questa, variabile a seconda delle proprietà della roccia serbatoio.

### Intrappolamento per dissoluzione

Una piccola parte della  $CO_2$  iniettata si discioglie nell’acqua salina presente negli spazi interstiziali della roccia serbatoio. Di conseguenza, l’acqua così arricchita di  $CO_2$  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  $CO_2$  e l’acqua salina. La quantità di  $CO_2$  che si può disciogliere è limitata poiché non può andare oltre la concentrazione di saturazione nell’acqua. Tuttavia, a causa del movimento verso l’alto della  $CO_2$  iniettata e del movimento verso il basso dell’acqua che ha in sé disciolta la  $CO_2$ , c’è un continuo rinnovamento del contatto tra acqua salina e anidride carbonica, il che aumenta la quantità di  $CO_2$  che può venire disciolta. Questi processi sono relativamente lenti perché si svolgono all’interno di spazi interstiziali ristretti. Stime approssimative, realizzate per il sito di stoccaggio del progetto Sleipner, indicano che circa il 15% della  $CO_2$  iniettata risulta disciolta 10 anni dopo l’iniezione.

### Intrappolamento per mineralizzazione

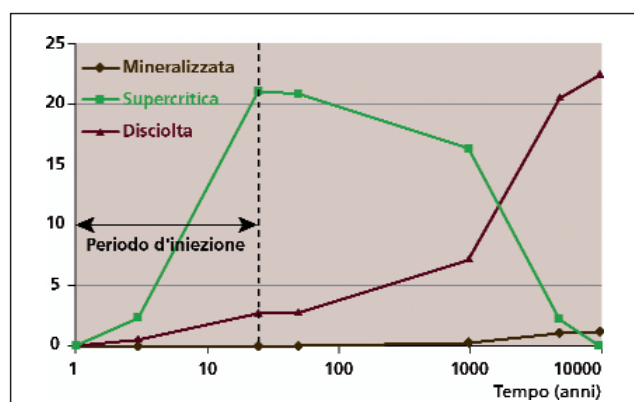
La  $CO_2$ , disciolta nell’acqua salina della roccia serbatoio, può reagire con i minerali che compongono la roccia. Certi minerali possono disciogliersi, mentre altri possono precipitare a seconda del pH e dei minerali che costituiscono la roccia serbatoio. Le stime effettuate per Sleipner indicano che dopo un periodo di tempo molto lungo solamente una frazione relativa-

mente piccola di CO<sub>2</sub> risulterà immobilizzata attraverso la mineralizzazione. Dopo 10.000 anni, solo il 5% della CO<sub>2</sub> iniettata dovrebbe essere mineralizzata mentre il restante 95% dovrebbe essere disciolto, senza lasciare alcun residuo di CO<sub>2</sub> in fase densa.

L'importanza relativa dei meccanismi d'intrappolamento citati dipende dalle specifiche caratteristiche di ogni sito. In una roccia serbatoio a forma di cupola, la CO<sub>2</sub> dovrebbe rimanere per lo più in fase densa anche per periodi di tempo molto lunghi, mentre in serbatoi naturali piatti, come quello di Sleipner, la maggior parte della CO<sub>2</sub> iniettata si scioglierà o si mineralizzerà.

La figura 5 illustra l'evoluzione temporale dei diversi meccanismi d'intrappolamento per il progetto Sleipner.

Le evidenze sperimentali e le valutazioni teoriche permettono di affermare che la sicurezza di stoccaggio di un sito tende ad aumentare con il tempo. Il fattore più critico risiede nell'individuare una roccia serbatoio provvista di un'adeguata roccia di copertura, in grado di trattenere la CO<sub>2</sub> (intrappolamento strutturale). I processi correlati a dissoluzione, mineralizzazione e intrappolamento residuo concorrono ad evitare che la CO<sub>2</sub> migri verso la superficie.



**FIGURA 5** Evoluzione della CO<sub>2</sub> nelle sue varie forme, nella roccia serbatoio di Sleipner sulla base delle simulazioni di flusso  
Fonte: CO2GeoNet

Quanto sopra descritto si fonda sul controllo incrociato di quattro fondamentali strumenti di indagine.

- **Misure di laboratorio:** basate su esperimenti a piccola scala finalizzati allo studio dei processi di mineralizzazione, dissoluzione ecc. I risultati di tali esperienze di breve periodo, e su scala ridotta, vengono estrapolati per la comprensione da processi su scala temporale e spaziale più ampia.
- **Simulazioni numeriche:** mediante codici di calcolo predittivi del comportamento della CO<sub>2</sub> su scale temporali molto più lunghe, validati con test di laboratorio.
- **Studio dei giacimenti naturali di CO<sub>2</sub>,** (detti “analoghi naturali”) in cui la CO<sub>2</sub> (generalmente di origine vulcanica) è stata intrappolata nel sottosuolo per lunghi periodi di tempo, spesso milioni di anni.
- **Monitoraggio di progetti dimostrativi** attualmente in corso sullo stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub>. I risultati delle simulazioni nel breve periodo vengono confrontati con i dati reali di campagna, consentendo la messa a punto dei modelli numerici.

## La stabilità dello stoccaggio

In generale, le potenziali vie di fuga sono artificiali (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 quanto mettono in collegamento diretto la roccia serbatoio con la superficie. In ogni caso, il rischio dovuto a fughe è basso perché esse sono identificabili in modo molto efficace utilizzando metodi geochimici e geofisici, e perché esistono, mutuati dall'industria petrolifera, le tecnologie per mitigare o rimuovere i rischi.

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, con e senza perdite, permette di pro-

gettare siti di stoccaggio con le stesse caratteristiche di stabilità dei giacimenti esistenti in natura, che hanno imprigionato CO<sub>2</sub> o metano per milioni di anni.

I sistemi naturali (“analoghi naturali”) sono peraltro una fonte d’informazione inestimabile per migliorare la nostra comprensione sia della migrazione dei gas di origine profonda, che 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 anche per milioni d’anni;
- giacimenti naturali o sacche isolate di gas esistono anche negli ambienti geologici meno favorevoli (aree vulcaniche);
- la migrazione di quantità di gas significative avviene per migrazione di masse gassose da zone a maggior pressione verso zone a minor pressione (avvezione), in quanto la migrazione dei gas per diffusione è un processo molto lento;
- perché la migrazione per avvezione si verifichi, la pressione del fluido nella roccia serbatoio deve essere prossima a quella litostatica, per poter tenere aperte le faglie e le fratture o per creare nuove vie di fuga;
- “fughe” di gas significative si verificano solo raramente e tendono ad essere limitate a zone geotermiche o vulcaniche ricche di faglie dove la CO<sub>2</sub> 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.

Sulla base di quanto sopra descritto, perché una fuga da una roccia serbatoio profonda possa verificarsi, è necessaria la compresenza di un certo numero di condizioni specifiche. Quindi è altamente improbabile che un sito per lo stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>, scelto e gestito correttamente sia dal punto di vista geologico che ingegneristico, subisca delle perdite. Tuttavia,

anche se le perdite sono improbabili, i processi ed i potenziali effetti ad esse associati devono essere pienamente compresi in modo da poter scegliere, progettare e gestire siti di stoccaggio geologico della CO<sub>2</sub> con la massima sicurezza.

### L’impatto sugli esseri umani e sull’ambiente

La CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 di sotto del 16%, limite inferiore per sostenere la vita di un essere umano. Tuttavia, se la CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> è più densa dell’aria e tende ad accumularsi in prossimità del suolo. In realtà, molta gente vive in aree caratterizzate da continue emanazioni di gas naturali. Ad esempio, a Ciampino, vicino a Roma, le case sono situate a soli 30 metri dai punti di fuoriuscita del gas; qui le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nel terreno raggiungono il 90% e circa 7 tonnellate di CO<sub>2</sub> 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.

Nei confronti degli ecosistemi, il potenziale impatto varia a seconda che il sito di stoccaggio si trovi in mare o sulla terraferma.

Negli ecosistemi marini, gli effetti principali della fuoriuscita di CO<sub>2</sub> sono un abbassamento localizzato del pH e l’impatto a questo associato. 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.

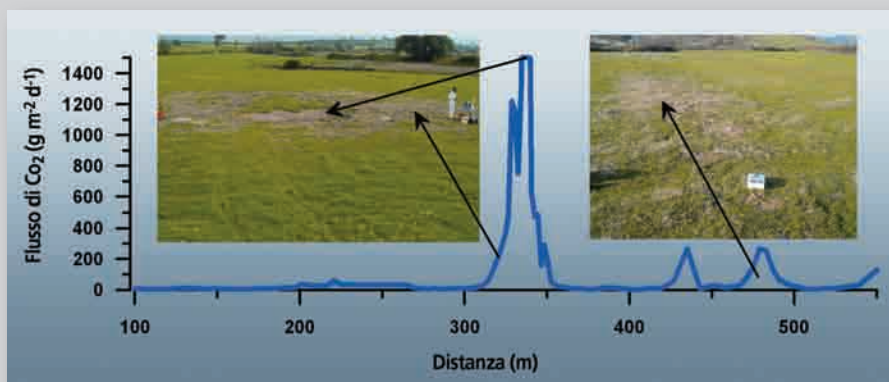
- **Vegetazione** - Anche se concentrazioni di  $\text{CO}_2$  pari a circa il 20-30% dei gas presenti nel suolo possono in realtà favorire la fertilizzazione delle piante e aumentare il tasso di crescita di certe specie, valori al di sopra di questa soglia possono essere letali per alcune di esse. Questo 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 (figura 6).
- **Falda acquifera** - La composizione chimica dell'acqua di falda potrebbe essere alterata dall'aggiunta di  $\text{CO}_2$ , poiché l'acqua diventa più acida e alcuni elementi possono essere rilasciati dalle rocce e dai minerali presenti. Se anche la  $\text{CO}_2$  dovesse disperdersi in una falda di acqua potabile, gli effetti rimarrebbero comunque localizzati. È interessante notare che molte falde acquifere in tutta Europa sono arricchite da  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  dipende dalle specifiche caratteristiche del singolo sito, una conoscenza approfondita della situazione geologica e strutturale consente di individuare i possibili percorsi di migrazione del gas, di scegliere i siti con la più bassa probabilità di fuoriuscita di  $\text{CO}_2$ , di prevedere il comportamento dei gas e quindi di valutare e prevenire qualsiasi impatto significativo sugli esseri umani e sull'ecosistema.

## Il monitoraggio dei siti

Il monitoraggio sulla funzionalità di un sito è fondamentale per garantire che il principale obiettivo dello stoccaggio geologico della  $\text{CO}_2$ , cioè l'isolamento a lungo termine della  $\text{CO}_2$  di origine antropica, venga raggiunto. Il monitoraggio, sia delle condizioni iniziali dell'ambiente (la cosiddetta *baseline*) che del successivo comportamento del sito, è un importante requisito normativo nella Direttiva CE sullo stoccaggio geologico della



**FIGURA 6**

Impatto della fuoriuscita di  $\text{CO}_2$  sulla vegetazione: flusso intenso (sinistra) e flusso ridotto (destra)

Fonte: CO2GeoNet

CO<sub>2</sub>, 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.

Il monitoraggio può essere applicato a svariati aspetti che caratterizzano il sito.

- *Identificazione e descrizione dell'area di dispersione della CO<sub>2</sub>* - seguendone la migrazione a partire dal punto d'iniezione. Fornisce dati fondamentali per calibrare i modelli predittivi della distribuzione futura della CO<sub>2</sub> 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.
- *Integrità della roccia di copertura* - necessaria per valutare se la CO<sub>2</sub> è confinata all'interno della "roccia serbatoio" e per consentire di dare rapidamente l'allarme in caso di migrazioni impreviste della CO<sub>2</sub> verso l'alto. Questo può essere particolarmente importante durante la fase d'iniezione, quando le pressioni all'interno della "roccia serbatoio" possono aumentare, benché temporaneamente, in modo significativo.
- *Integrità del pozzo*. È questo un tema importante poiché i pozzi profondi potrebbero fornire una via diretta per la migrazione della CO<sub>2</sub> verso la superficie. I pozzi per l'iniezione della CO<sub>2</sub>, 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 improvvise di CO<sub>2</sub>. 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 unità rocciose che hanno proprietà simili ad essa. Queste possono essere una com-

ponente importante nel ridurre i rischi di fuoriuscita della CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> iniettata non migri in superficie, è disponibile una gamma di tecniche geochemiche, biochimiche e di telerilevamento per localizzare le eventuali perdite, valutare e seguire la distribuzione della CO<sub>2</sub> nel suolo e la sua dispersione nell'atmosfera o nell'ambiente marino.
- *Misurazione, per scopi normativi e fiscali, della quantità di CO<sub>2</sub> immagazzinata*. Sebbene la quantità di CO<sub>2</sub> iniettata possa essere facilmente misurata alla sommità del pozzo, la quantificazione nella roccia serbatoio è tecnicamente più complessa. Se avviene una migrazione di CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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.

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 CO<sub>2</sub> 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 con-

centrazioni 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 deve essere previsto per tutti i siti di stoccaggio, sia in mare che sulla terraferma. La selezione di tecniche di monitoraggio appropriate dipende dalle caratteristiche tecniche e geologiche del sito e dagli obiettivi del monitoraggio stesso. Una vasta gamma di tecniche di monitoraggio è già disponibile (figura 7), molte delle quali sono comunemente utilizzate nell'industria petrolifera e in quella del gas e vengono ora adattate allo stoccaggio della CO<sub>2</sub>.

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 CO<sub>2</sub>, i possibili percorsi di fuoriuscita, la geologia degli strati sovrastanti, il tempo e la portata d'iniezione, e le caratteristiche in superficie (la topografia, la densità della popolazione, le infrastrutture e gli ecosistemi). Una volta scelte le tecniche di misurazione più appropriate e la loro ubicazione, prima di procedere alle operazioni di iniezione si devono misurare i valori di fondo presenti

nel sito, per poter avere dati 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 CO<sub>2</sub> è già realizzabile grazie alle numerose tecniche attualmente disponibili. Tuttavia la ricerca continua, non solo per sviluppare nuovi strumenti (in particolare da usare per siti a mare), ma anche per ottimizzare le attività di monitoraggio e ridurre i costi. ●

Il presente articolo è un estratto dell'opuscolo *What does CO<sub>2</sub> geological storage really mean?* (ISBN: 978-2-7159-2453-6), redatto dal Network di Eccellenza CO2GeoNet (The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO<sub>2</sub> - info@co2geonet.com; www.co2geonet.eu). La versione italiana è stata curata dall'associazione CO2Club (www.co2club.it).

L'opuscolo raccoglie i contributi 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, Gijb Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

**FIGURA 7**

Una selezione delle tecniche disponibili per monitorare i diversi componenti di un sistema di stoccaggio della CO<sub>2</sub>

Fonte: CO2GeoNet

