



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



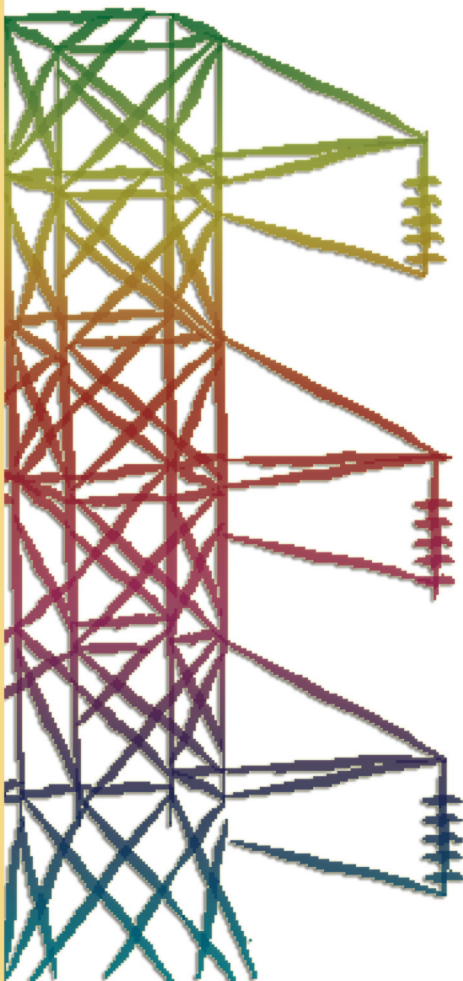
Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Progetto di immagazzinamento geologico dell'anidride carbonica con estrazione di metano nel bacino carbonifero del Sulcis

Proposta di un sistema di monitoraggio del processo di iniezione della CO₂ e delle eventuali riemissioni in atmosfera

R. Ciccu, S. Fais, A. Mazzella, P. Valera





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Progetto di immagazzinamento geologico dell'anidride carbonica con
estrazione di metano nel bacino carbonifero del Sulcis
Proposta di un sistema di monitoraggio del processo di iniezione
della CO₂ e delle eventuali riemissioni in atmosfera

R. Ciccu, S. Fais, A. Mazzella, P. Valera

PROGETTO DI IMMAGAZINAMENTO GEOLOGICO DELL'ANIDRIDE CARBONICA CON
ESTRAZIONE DI METANO NEL BACINO CARBONIFERO DEL SULCIS
PROPOSTA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO DEL PROCESSO DI INIEZIONE DELLA CO₂ E
DELLE EVENTUALI RIEMISSIONI IN ATMOSFERA

R. Ciccu, S. Fais, A. Mazzella, P. Valera (Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali - DIGITA - dell'Università di Cagliari)

Marzo 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Tecnologie innovative che consentano una riduzione dei costi di investimento delle centrali a polverino di carbone. Sviluppo di tecnologie di impiego del polverino di carbone a differenti granulometrie con cattura e sequestro della CO₂

Responsabile Tema: Paolo Deiana, ENEA



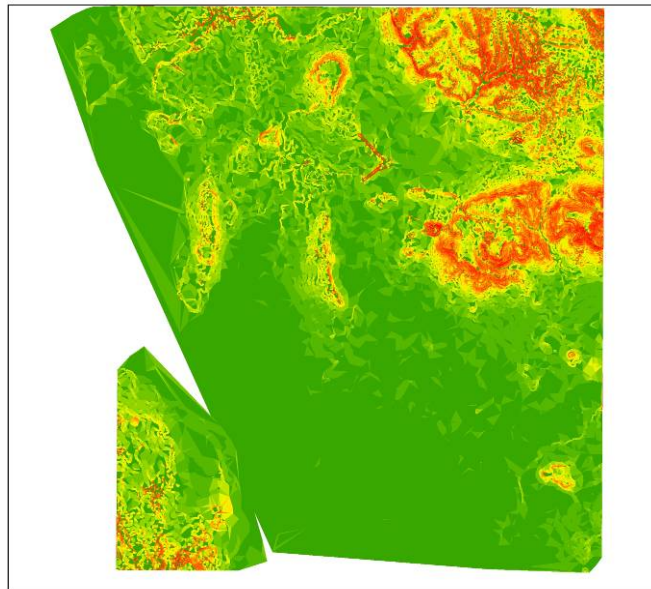
Università degli Studi di Cagliari

DIGITA Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali

CONTRATTO ENEA

PROGETTO DI IMMAGAZINAMENTO GEOLOGICO DELL'ANIDRIDE CARBONICA CON ESTRAZIONE DI METANO NEL BACINO CARBONIFERO DEL SULCIS

PROPOSTA DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO DEL PROCESSO DI INIEZIONE
DELLA CO₂ E DELLE EVENTUALI RIEMISSIONI IN ATMOSFERA



Reponsabile della Ricerca:

Prof. Raimondo Ciccù

Gruppo di Ricerca:

Prof. Silvana Fais

Ing. Alessandro Mazzella

Dr. Paolo Valera

1. INTRODUZIONE

La progressiva perdita dell'equilibrio termico e le conseguenti perturbazioni climatiche globali di carattere duraturo rappresentano una delle maggiori preoccupazioni sul futuro del pianeta Terra.

Questo fatto, ormai accertato e riconosciuto al livello della comunità degli stati nazionali, è stato determinato, con particolari accentuazioni nel corso degli ultimi due secoli, dalla liberazione di ingenti quantità di anidride carbonica da parte delle centrali termoelettriche che bruciano combustibili fossili e dal crescente traffico automobilistico, nonché da fenomeni naturali (decomposizione di sostanze organiche, incendi, emissioni vulcaniche respirazione umana e animale etc.) non compensate dall'attività vitale delle piante e dalla carbonatazione delle sostanze minerali o da altri processi naturali di cattura della CO_2 .

La comunità scientifica concorda sulla necessità che le emissioni correnti di CO_2 a livello mondiale debbano essere ridotte di più del 50% per poter stabilizzare la sua concentrazione nell'atmosfera e, conseguentemente, mitigare i cambiamenti del clima.

Come primo passo è stato formulato nel 1997 il Protocollo di Kyoto, il cui obiettivo era di ridurre entro il 2012 le emissioni di CO_2 ad un livello inferiore a quello del 1990. Esso può essere conseguito con diverse azioni:

- contenimento dei consumi di energia (risparmio)
- miglioramento delle caratteristiche del carbone (lavaggio, gassificazione, liquefazione), maggiore responsabile dell'effetto serra (figura 1)
- miglioramento dell'efficienza energetica della combustione e conseguente riduzione dell'impiego di combustibili (figura 2) e recupero di calore attraverso la cogenerazione
- uso di fonti di energia rinnovabili (quali l'energia eolica e quella solare)
- cattura e confinamento geologico della CO_2 attualmente immessa nell'atmosfera.

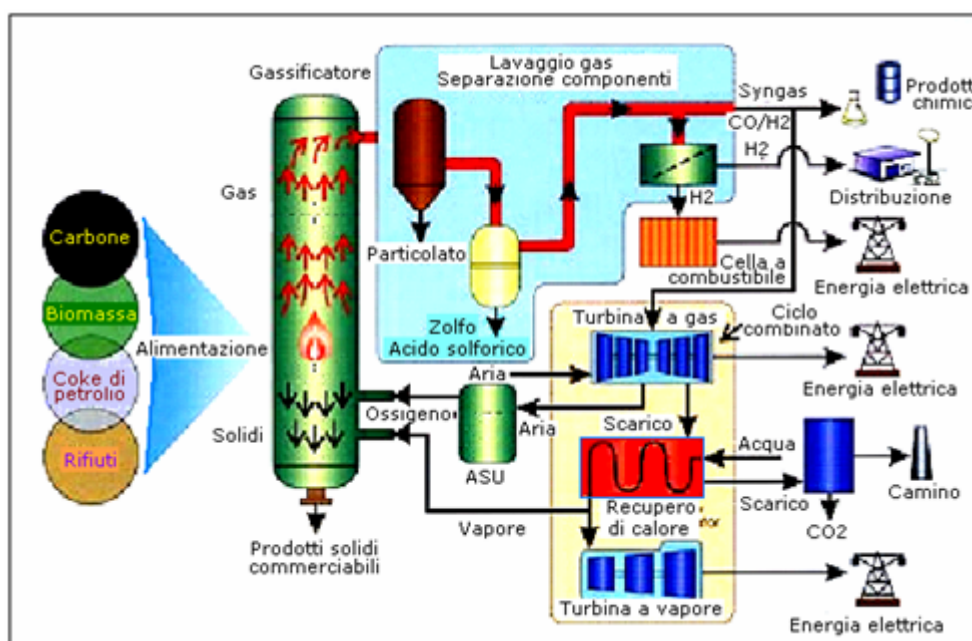


Figura 1. Aumento dell'efficienza della produzione di energia elettrica attraverso la gassificazione del carbone e l'adozione dello schema del ciclo combinato

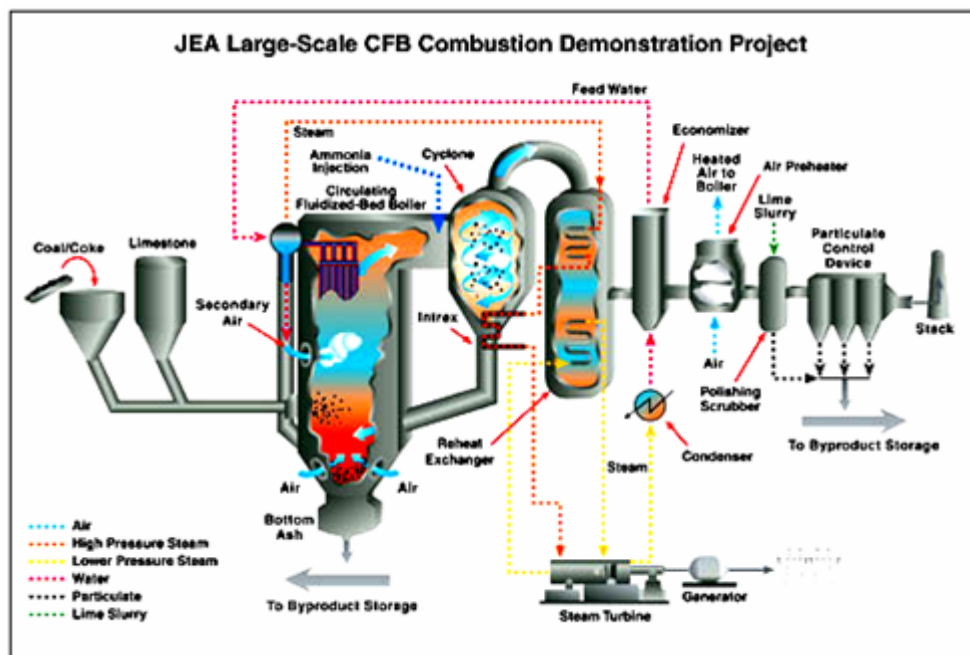


Figura 2. Combustione in letto fluido ricircolato

Sta chiaramente emergendo che il miglioramento dell'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili non basteranno da soli a conseguire la richiesta riduzione nelle emissioni. Il terzo intervento, la cattura ed il confinamento geologico della CO₂, può essere quindi necessario per contribuire a limitare i cambiamenti climatici globali.

Il concetto della reiniezione della CO₂ negli strati profondi del sottosuolo non è una novità. La sua applicabilità è basata sulla constatazione che in molti paesi esistono depositi naturali di CO₂ in formazioni geologiche assolutamente stabili per milioni di anni.

Il mondo dipende tuttora in misura importante dall'energia prodotta con combustibili fossili ed i cambiamenti nel sistema di approvvigionamento energetico non possono avvenire repentinamente ma richiedono molti anni.

Il confinamento geologico della CO₂ potrà essere pertanto di supporto ad una transizione graduale dell'attuale sistema energetico basato sui combustibili fossili verso un sistema di diversificato, in cui sarà ridotto al minimo l'effetto sul clima globale. In questo periodo di transizione, sarà necessario realizzare nuove infrastrutture per catturare la CO₂ dove essa viene prodotta (ad esempio nelle centrali elettriche e nei grandi impianti industriali) e per trasportarla attraverso condutture sino ai siti di reiniezione nel sottosuolo.

Il trattato di Kyoto è stato ridiscusso e aggiornato, e recentemente è stato ratificato anche da parte della Russia, mentre rimangono purtroppo ancora assenti USA, Cina e India che insieme sono responsabili di oltre la metà delle emissioni globali.

I termini delle condizioni prevedono l'obbligo per i paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti (biossido di carbonio ed altri cinque gas serra, ovvero metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi ed esafluoruro di zolfo) in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 - considerato come anno base - nel periodo 2008-2012.

I grafici di figura 3 rappresentano gli impegni al rispetto del protocollo di Kyoto da parte dei principali Paesi Europei.

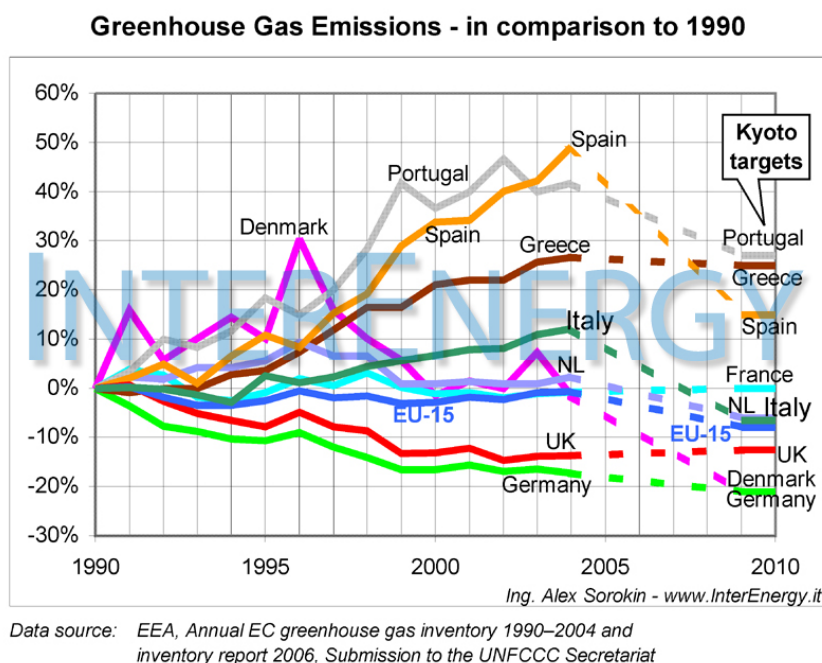


Figura 3. Impegni dei Paesi europei al rispetto del protocollo di Kyoto

2. PROBLEMI AMBIENTALI DELL'USO DEL CARBONE

In seguito alla combustione del carbone per la produzione di energia, vengono immesse nell'atmosfera diverse sostanze inquinanti tra le quali anidride solforosa (SO_2), e anidride carbonica (CO_2), che sono la principale causa rispettivamente delle piogge acide e dell'effetto serra.

Intorno a questi inquinanti sono stati presi vari provvedimenti atti alla riduzione della loro immissione nell'atmosfera per limitare alcuni dei più importanti impatti ambientali dei nostri giorni.

Oltre all'inquinamento dell'aria, la produzione e l'utilizzazione del carbone causano altri impatti ambientali tra i quali la generazione di acque acide, l'occupazione di superficie e il degrado del paesaggio.

Le problematiche ambientali nel percorso dalla miniera all'utilizzazione finale del carbone sono illustrate in figura 4.



Figura 4. Principali problemi ambientali legati alla produzione e all'utilizzazione del carbone [35]

Il ciclo del carbone comprende le fasi di:

- Estrazione mineraria
- Trattamento
- Trasporto
- Utilizzazione

In ciascuna operazione possono prodursi ripercussioni di vario tipo sull'ambiente.

A queste corrispondono appropriate misure di intervento per mitigare gli effetti negativi e restituire un territorio risanato e riabilitato.



Figura 5. Impatto ambientale delle fasi di estrazione e trattamento del carbone

Gli impatti ambientali di maggior rilievo dell'attività produttiva (figura 5) consistono nel degrado del paesaggio (fronti di coltivazione, impianti e infrastrutture, discariche e bacini sterili) e nella generazione di inquinamento dell'aria, del suolo e delle acque (polveri, acidità, contaminanti organici e inorganici).

Nel caso di miniere in sottosuolo possono verificarsi casi di subsidenza, incendi e esplosioni, con conseguenze talora disastrose anche in superficie, spesso di lunga durata e difficili da controllare e rimediare.

Con riferimento alla fase di utilizzazione del carbone che comporta la generazione di effluenti di vario tipo (solidi e gassosi) possono essere attuate:

MISURE PREVENTIVE:

- Recupero del calore e risparmio energetico
- Impiego di combustibili più puliti (carbone lavato, miscele coal-water, gas desolfurato da carbone, SNG - Substitute Natural Gas, prodotti liquidi da carbone)
- Miglioramento della tecnologia di combustione

MISURE PROTETTIVE:

- Captazione degli inquinanti e lavaggio dei gas
- Diluizione e dispersione nell'atmosfera (alti camini)
- Utilizzazione delle ceneri per impieghi industriali

Numerosi studi hanno documentato che il miglioramento dell'efficienza, il risparmio energetico e altre tecniche di prevenzione dell'inquinamento non solo riducono le emissioni ma generano anche benefici economici sostanziali.

Tuttavia, nonostante i vantaggi di una tale filosofia siano ben noti, queste tecniche sono impiegate raramente e in modo incompleto nella realtà.

Utilizzando l'efficienza energetica come strategia per ridurre le emissioni inquinanti, tossiche e nocive, si crea uno scenario di successi a catena sia per gli ambientalisti che per gli industriali (circolo virtuoso).

La diffusa adozione di tecniche di prevenzione presso le centrali termoelettriche potrebbe portare a una riduzione significativa delle emissioni di mercurio, cadmio, diossine, PAH e esaclorobenzene, per citare solo alcune delle sostanze presenti nei fumi, oltre naturalmente ai precursori dell'ozono, aerosol acidi, particolato e gas di serra.

2.1 Le piogge acide

Le piogge acide sono prodotte dal processo di ricaduta dall'atmosfera di sostanze con chimismo acido, solide, liquide o gassose. Se questa deposizione acida avviene sotto forma di precipitazioni meteoriche (piogge, neve, nebbie, rugiade, ecc.) si parla di deposizione umida, in caso contrario il fenomeno consiste in una deposizione secca di particolato.

Le piogge acide sono causate essenzialmente dagli ossidi di zolfo (SOx) e, in parte minore, dagli ossidi d'azoto (NOx), presenti in atmosfera sia per cause naturali che per effetto delle attività umane. Se non entrano in contatto con goccioline d'acqua, questi gas e soprattutto i particolati acidi che da loro si formano pervengono al suolo tramite deposizione secca.

Questa deposizione può avvenire secondo meccanismi differenti dettati principalmente dalle dimensioni delle particelle (per impatto e gravità), dallo stato d'aria a contatto con la superficie ricevente e dalla struttura chimica e fisica della superficie stessa. In ogni caso i depositi secchi di SOx e di NOx conducono rapidamente alla formazione dei relativi acidi al suolo.

Nel caso in cui questi gas entrino in contatto con l'acqua atmosferica allora si originano i corrispondenti acidi prima della deposizione. Gli ossidi di zolfo danno origine all'acido solforico, mentre gli ossidi di azoto si trasformano in acido nitrico; conseguentemente queste sostanze causano un'acidificazione delle precipitazioni. In effetti, da alcuni decenni in molte zone del pianeta si sono registrate precipitazioni piovose, nevose, nebbie e rugiade con valori di pH significativamente più bassi del normale (pH 5,5), cioè compresi tra 2 e 5.

L'azione degli acidi che si formano direttamente in sospensione oppure al suolo provoca l'acidificazione di laghi e corsi d'acqua, danneggia la vegetazione (soprattutto ad alte quote) e molti suoli forestali.

Oltre a questo, le piogge acide accelerano il decadimento dei materiali da costruzione e delle vernici; compromettono poi la bellezza ed il decoro degli edifici, delle statue e delle sculture patrimonio culturale di ogni nazione.

Da notare che, prima di raggiungere il suolo, i gas SOx e NOx e i loro derivati, solfati e nitrati, contribuiscono ad un peggioramento della visibilità ed attentano alla salute pubblica.

2.1.1 Emissioni di anidride solforosa

Il biossido di zolfo o anidride solforosa (SO₂) è un gas incolore dall'odore pungente ed irritante.

L'anidride solforosa è uno dei più diffusi ed aggressivi inquinanti atmosferici tanto da essere universalmente considerato tra le cause principali dei danni all'uomo e all'ambiente. Le principali emissioni di anidride solforosa derivano dalle centrali termoelettriche, dagli impianti di riscaldamento domestico e da alcune produzioni industriali (raffinerie, fonderie, cementifici).

Una minore concentrazione viene attribuita al traffico veicolare, in particolare ai veicoli con motore diesel. La concentrazione di biossido di zolfo presenta una variazione stagionale molto evidente con i valori massimi nella stagione invernale a causa del funzionamento degli impianti di riscaldamento.

L'anidride solforosa si forma dalla combinazione dell'ossigeno con lo zolfo presente come impurità nei combustibili di origine fossile (carbone, petrolio, olio combustibile, gasolio); la quantità di inquinante emessa dipende pertanto dal tenore di zolfo nei combustibili. Le recenti

normative che prescrivono bassi tenori di zolfo nei combustibili insieme al sempre più diffuso uso del gas metano costituiscono efficaci strumenti per il contenimento delle emissioni di SO₂.

L'anidride solforosa produce effetti irritanti agli occhi e sul tratto superiore dell'apparato respiratorio. In particolari condizioni atmosferiche e nel caso di emissioni da alti camini può diffondersi nell'atmosfera anche a grandi distanze.

2.1.2 Effetti sull'ecosistema generati dalle piogge acide.

Il mondo vegetale è fortemente danneggiato dalle piogge acide, al punto che molte foreste rischiano di essere distrutte dalla presenza dell'acido nell'acqua e dalla sua penetrazione nel sottosuolo. Una volta percolata nel terreno la pioggia acida ne modifica la composizione chimica da cui dipende il nutrimento e l'esistenza delle piante stesse. Tramite le foglie avviene invece uno scambio gassoso diretto con gli inquinanti esterni. In entrambe le vie la pianta assorbirà gli inquinanti aumentando il suo grado di tossicità.

Nel lungo periodo il terreno tenderà ad inaridirsi favorendo il fenomeno carsico della penetrazione dell'acqua nel sottosuolo e fenomeni di siccità. Senza la presenza delle piante il clima del luogo tenderà inevitabilmente a cambiare favorendo l'avanzata della desertificazione e aumentando la gravità di fenomeni naturali come le inondazioni, le tempeste, gli uragani. Il cambiamento climatico accentua quindi le conseguenze delle piogge acide nel distruggere le aree verdi e boschive.

I danni maggiori sono provocati dall'anidride solforosa. L'acidificazione del suolo riduce la presenza dei nutrienti nel terreno indebolendo la pianta ed esponendola agli insetti ed alle malattie.

L'intero ecosistema viene quindi inizialmente disturbato e successivamente modificato dall'azione delle piogge acide. Tutti i processi microbiologici su cui si basa l'equilibrio dell'ecosistema sono irrimediabilmente falsati e l'ecosistema stesso si muove verso nuove condizioni caratterizzate da un più elevato livello di entropia.

Gli effetti degli inquinanti acidi sugli ecosistemi variano a seconda delle caratteristiche delle aree interessate.

In genere i suoli caratterizzati dalla presenza di rocce calcaree sono in grado di neutralizzare direttamente l'acidità per la presenza dei carbonati che permettono di mantenere costante il pH; in ogni caso il potere tampone del terreno alla lunga si esaurisce ed il suolo si acidifica. I terreni più sensibili sono quelli derivati da rocce cristalline come il granito e le quarziti.

Nei suoli poveri o totalmente privi di calcare gli inquinanti acidi causano l'impoverimento del terreno per la perdita di ioni calcio, magnesio, potassio e sodio. In effetti, nel suolo avviene lo scambio degli ioni idrogeno liberati dagli acidi con questi cationi, che possono così essere solubilizzati e trasportati via con le acque di percolazione.

Il processo comporta anche la liberazione nel terreno di ioni metallici che risultano spesso tossici per le piante. In particolare il forte abbassamento del pH provoca la liberazione dell'alluminio trivalente estremamente tossico.

L'abbassamento del pH nel terreno può anche compromettere lo sviluppo di molti processi microbiologici, fra i quali l'azoto-fissazione (il processo che comporta l'arricchimento del suolo di azoto tramite la fissazione dell'azoto molecolare atmosferico).

Anche i corpi idrici sono soggetti ai fenomeni di acidificazione, soprattutto nelle aree dove sono presenti suoli che non sono in grado di tamponare l'azione degli inquinanti acidi. Il fenomeno si è manifestato soprattutto nei laghi della Scandinavia, degli Stati Uniti nordorientali e del Canada sudorientale.

Le conseguenze sugli organismi acquatici possono essere sia dirette, cioè dovute alla tossicità delle acque, sia indirette, cioè dovute alla scomparsa dei vegetali o delle prede più sensibili all'acidificazione e che costituivano parte della catena alimentare.

L'acidità dei laghi può, infatti, modificare le popolazioni di diatomee e di alghe brune e può alterare la distribuzione e la varietà della fauna ittica: lo sviluppo embrionale di alcuni pesci viene bloccato già a valori di pH minori di 6 mentre ad un pH inferiore a 5 cessa la riproduzione della maggior parte dei pesci e cominciano a scomparire alcune specie, prime fra tutte i salmoni e le trote.

2.1.3 Gli effetti sull'uomo causati dalle piogge acide.

Le precipitazioni acide non sono direttamente pericolose per la salute umana. Ad esempio: passeggiare sotto una pioggia acida o anche il nuotare in un lago acidificato non è più pericoloso di quanto possa essere farlo in acqua normale.

Invece possono insorgere dei danni alla salute nel caso in cui ci si nutra di alimenti provenienti da acque acide, per esempio pesci che abbiano accumulato nel loro corpo grandi quantità di metalli tossici (alluminio, manganese, zinco, mercurio, cadmio) liberati dai suoli e dilavati nelle acque per effetto dell'acidificazione.

In ogni caso, i danni più gravi sono provocati dagli inquinanti che causano le piogge acide (il biossido di zolfo e gli ossidi d'azoto). Questi gas interagiscono nell'atmosfera formando particelle di solfati e nitrati che possono essere trasportate anche a grande distanza dai venti; queste particelle possono poi essere ispirate e così penetrare in profondità nei polmoni.

Le particelle più fini possono anche insinuarsi all'interno degli edifici e contribuire in questo modo al peggioramento della qualità dell'aria negli ambienti confinati. Molti studi scientifici hanno individuato una relazione tra gli elevati livelli di particelle fini presenti nell'aria ed un aumento delle patologie a carico del sistema circolatorio e respiratorio soprattutto (asma e bronchiti).

Le emissioni di ossidi d'azoto costituiscono un serio problema per la salute anche perché sono in grado di reagire con i composti organici volatili causando la formazione dell'ozono (un composto la cui presenza è associata all'aumento di patologie come l'asma e l'enfisema) e di altri inquinanti secondari.

2.1.4 Le cause del fenomeno

Come già accennato in precedenza, la combustione del carbone, del petrolio e degli altri idrocarburi nei motori delle automobili, nelle centrali che producono energia termoelettrica o negli impianti di riscaldamento, oltre a produrre anidride carbonica (CO_2) dà luogo anche alla produzione di altri agenti inquinanti, quali il piombo, l'anidride solforosa (SO_2) e il biossido di azoto (NO_2) e altri ossidi dell'azoto (detti genericamente NO_x).

In particolare, i combustibili fossili bruciando liberano ossidi (ovvero, composti in cui è presente l'ossigeno) non metallici che chimicamente sono anidridi acide; queste, venendo a contatto con l'acqua presente nell'atmosfera, producono diversi acidi quali l'acido solforoso (H_2SO_3), l'acido solforico (H_2SO_4), l'acido nitroso (HNO_2) e nitrico (HNO_3), l'acido carbonico (H_2CO_3), l'acido cloridrico (HCl).

Tali sostanze si legano all'acqua, determinandone un abbassamento del valore di pH; l'acqua quindi ricade a terra con le piogge (dette pertanto "piogge acide") o sotto forma di neve o nebbia. Prima di disciogliersi in acqua, le molecole degli acidi possono essere trasportate dai venti anche molto lontano dal sito in cui si sono formate; inoltre, possono essere trascinate a

terra dalla neve o dalla nebbia o, ancora, precipitare al suolo sotto forma di deposizioni secche.

Per questo motivo, per indicare il fenomeno è più corretta la locuzione 'deposizioni acide', che comprende anche le deposizioni secche, altrettanto nocive per l'ambiente di quelle umide.

Per quanto riguarda la diffusione del fenomeno si deve dire che le quantità di anidride solforosa e ossidi di azoto sono aumentate a dismisura inseguito al crescente consumo dei combustibili fossili. Negli ultimi decenni il processo ha subito una netta impennata.

In genere, la maggior parte dei composti a base di zolfo si deposita entro 2-4 giorni dall'emissione. Le maggiori deposizioni si verificano nelle regioni che presentano le emissioni più abbondanti e sono dovute in prevalenza ai depositi secchi di SO_2 . Alti tassi di deposizioni di composti solforati hanno luogo anche nelle regioni caratterizzate da elevate precipitazioni, come le aree costiere e montuose.

Gli ossidi di azoto tendono a restare più a lungo nell'atmosfera per cui vicino alle fonti di emissione si depositano quantità relativamente minori.

Per quanto riguarda le precipitazioni a livello globale, le nazioni più colpite sono quelle sulle quali, per effetto dei venti dominanti, si scaricano le nubi acide prodotte anche in altri paesi. Il problema è particolarmente grave per il Canada che riceve le piogge acide statunitensi, mentre in Europa le nazioni più colpite sono quelle scandinave. In queste aree l'abbassamento del pH in migliaia di laghi ha provocato la scomparsa di numerose specie animali e vegetali. In Germania più dell'8% dell'intero patrimonio boschivo è stato gravemente danneggiato, se non compromesso.

In Italia l'azione delle piogge acide viene in parte tamponata dalla particolare costituzione geologica del terreno per cui non si raggiungono gli effetti drammatici che si possono rilevare negli altri paesi europei. Il fenomeno interessa quasi esclusivamente la zona della pianura padana.

Il problema delle piogge acide da SO_2 emessa a seguito della combustione del carbone o di olio ATZ è in parte risolto con la desolforazione dei fumi (figura 6).

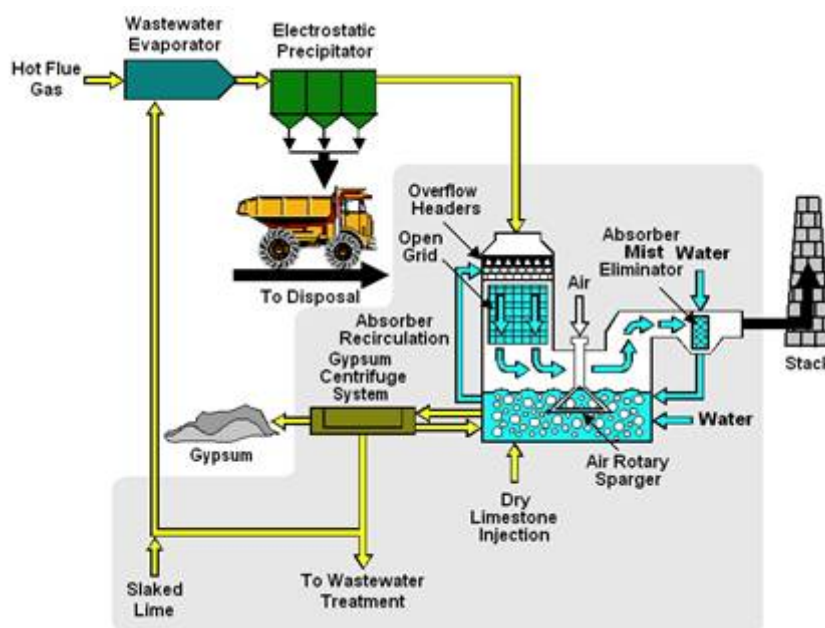


Figura 6. Unità di assorbimento di SO_2 per un impianto da 528-MWe

2.2 L'EFFETTO SERRA

L'effetto serra è un fenomeno senza il quale la vita come adesso la conosciamo non sarebbe possibile. Questo processo consiste in un riscaldamento del pianeta per effetto dell'azione dei cosiddetti gas serra, composti presenti nell'aria con concentrazioni relativamente basse (anidride carbonica, vapor acqueo, metano, ecc.).

I gas serra permettono alle radiazioni solari di passare attraverso l'atmosfera mentre ostacolano il passaggio verso lo spazio di parte delle radiazioni infrarosse provenienti dalla superficie della Terra e dalla bassa atmosfera (il calore riemesso); in pratica favoriscono la regolazione ed il mantenimento della temperatura terrestre su valori accettabile.

Questo processo è sempre avvenuto naturalmente e fa sì che la temperatura della Terra sia circa 33°C più calda di quanto lo sarebbe senza la presenza di questi gas. I gas serra agiscono così come i vetri di una serra: fanno passare la luce solare e trattengono il calore. Il tutto comporta che la temperatura media della Terra sia di 15°C circa, un valore notevolmente più alto di quanto non sarebbe in assenza di questi gas (-18°C).

Ora, comunque, si ritiene che il clima della Terra sia destinato a cambiare perché le attività umane stanno alterando la composizione chimica dell'atmosfera. Le enormi emissioni antropogeniche di gas serra stanno infatti causando un aumento della temperatura terrestre determinando, di conseguenza, profondi mutamenti a carico del clima sia a livello planetario che locale.

Prima della rivoluzione industriale, l'uomo rilasciava ben pochi gas in atmosfera, ora la crescita della popolazione, l'utilizzo dei combustibili fossili e la deforestazione contribuiscono non poco al cambiamento nella composizione dell'aria.

Il Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ritiene che la temperatura media del pianeta sia aumentata di circa 0,6°C dal 1861. Inoltre, sulla base delle tendenze attuali di emissione dei gas serra, vi è la stima di un ulteriore aumento della temperatura terrestre tra 1,4 e 5,8°C nel periodo fra il 1990 e il 2100.

Il conseguente cambiamento climatico comporterà conseguenze estremamente significative a carico della salute dell'uomo e dell'integrità dell'ambiente. Il clima, infatti, influenza fortemente l'agricoltura, la disponibilità delle acque, la biodiversità, la richiesta di energia (ad esempio per il riscaldamento o il raffreddamento) e la stessa economia.

Il progresso che si farà nella riduzione delle emissioni dei gas serra nell'immediato futuro determinerà il livello di riscaldamento globale a cui dovranno andare incontro le generazioni che verranno.

L'approccio dovrà essere necessariamente coordinato; infatti, i progressi fatti con la riduzione delle emissioni in un determinato settore possono essere facilmente compromessi dall'aumento delle emissioni in un altro. In ogni caso le azioni intraprese finora a livello internazionale e locale non sono confortanti e la situazione continua a peggiorare.

2.2.1. Cause dell'effetto serra

Le radiazioni provenienti dal sole non raggiungono la superficie terrestre nella loro totalità: nella misura del 25% vengono assorbite dal pulviscolo, dal vapor acqueo, dall'ozono e da molti altri gas presenti nell'atmosfera, mentre per il 30% vengono invece riflesse nello spazio dal pulviscolo atmosferico, dalle nuvole e dalla superficie terrestre.

La frazione della radiazione solare totale che viene riflessa da un corpo qualsiasi viene anche definita albedo. L'albedo può essere espressa sia come percentuale che come frazione unitaria. Le aree ricoperte di neve hanno un valore elevato di albedo (circa 0,9 cioè il 90%) a causa del colore bianco, mentre la vegetazione ha un valore molto basso (circa il 10%) a causa del colore scuro e dell'assorbimento della luce ad opera della fotosintesi.

L'albedo globale terrestre, come già accennato, è circa 0,3.

La radiazione solare rimanente viene assorbita dai materiali e dagli organismi presenti sulla superficie terrestre.

L'energia ricevuta complessivamente dalla superficie terrestre e dalla troposfera viene poi riemessa sotto forma di energia termica come raggi infrarossi. Alcune sostanze presenti in atmosfera (i gas serra) assorbono gran parte di questa radiazione per poi reirradiarla in tutte le direzioni. Circa il 6% di questa energia si perde nello spazio, parte viene riassorbita nuovamente dai composti atmosferici, mentre la quantità maggiore dell'energia viene trattenuta e rinviata verso la terra, riscaldandola.

I gas serra naturali capaci di assorbire la radiazione infrarossa comprendono il vapor d'acqua, l'anidride carbonica, il metano, l'ossido nitrico e l'ozono troposferico. Certe attività dell'uomo, comunque, aumentano il livello di tutti questi gas e liberano nell'aria altri gas serra di origine esclusivamente antropogenica.

Il vapor d'acqua è presente in atmosfera in seguito all'evaporazione da tutte le fonti idriche (mari, fiumi, laghi, ecc.) e come prodotto delle varie combustioni. L'anidride carbonica è rilasciata in atmosfera soprattutto quando vengono bruciati rifiuti solidi, combustibili fossili (olio, benzina, gas naturale e carbone), e prodotti derivanti dal legno.

Il metano viene emesso durante la produzione ed il trasporto del carbone, del gas naturale e dell'olio minerale.

Grandi emissioni di metano avvengono anche a seguito di eruzioni vulcaniche e quale conseguenza della decomposizione della materia organica nelle discariche e della normale attività biologica degli organismi superiori (soprattutto ad opera dei quasi 2 miliardi di bovini presenti sulla terra).

L'ossido nitroso è emesso durante le attività agricole ed industriali, come del resto nel corso della combustione dei rifiuti e dei combustibili fossili.

Gas serra estremamente attivi sono i gas non presenti normalmente in natura, ma generati da diversi processi industriali, come gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC) e l'esfluoruro di zolfo (SF_6).

La presenza nel tempo di un gas in atmosfera è anche detta vita media atmosferica e rappresenta l'approssimativo ammontare di tempo che ci vorrebbe perché l'incremento della concentrazione di un inquinante dovuto all'attività umana scompaia e si ritorni ad un livello naturale (o perché l'inquinante è stato convertito in un'altra sostanza chimica, oppure perché è stato catturato a seguito di un processo naturale).

Questo tempo dipende dalle sorgenti dell'inquinante, dai depositi e dalla reattività della sostanza. La vita media dei gas serra può variare da 12 anni (metano e HCFC-22), a 50 anni (CFC-11), a circa un secolo (CO_2), a 120 anni (N_2O) ed anche a migliaia di anni (50000 per il CF_4).

2.2.2. Dimensioni del problema

Per meglio definire l'apporto che ogni determinato gas serra fornisce al fenomeno del riscaldamento globale, si è concepito il potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential, GWP). Questo valore rappresenta il rapporto fra il riscaldamento globale causato in un determinato periodo di tempo (di solito 100 anni) da una particolare sostanza ed il riscaldamento provocato dal biossido di carbonio nella stessa quantità.

Così, definendo il GWP della CO₂ pari a 1, il metano ha GWP pari a 21, il CFC-12 ha un GWP di 8500, mentre il CFC-11 ha un GWP di 5000. Vari HCFC e HFC hanno un GWP variabile fra 93 e 12100. L'esafluoruro di zolfo è un gas serra estremamente potente e ha un GWP pari a 23900, il che vuol dire che una tonnellata di SF₆ provoca un aumento dell'effetto serra pari a quello causato da 23900 tonnellate di CO₂.

Dall'inizio della rivoluzione industriale, la concentrazione atmosferica dell'anidride carbonica è aumentata del 30% circa, la concentrazione del gas metano è più che raddoppiata e la concentrazione dell'ossido nitroso (N₂O) è cresciuta del 15%.

Inoltre dati recenti indicano che le velocità di crescita delle concentrazioni di questi gas, anche se erano basse durante i primi anni '90, ora sono comparabili a quelle particolarmente alte registrate negli anni '80 (figura 7).

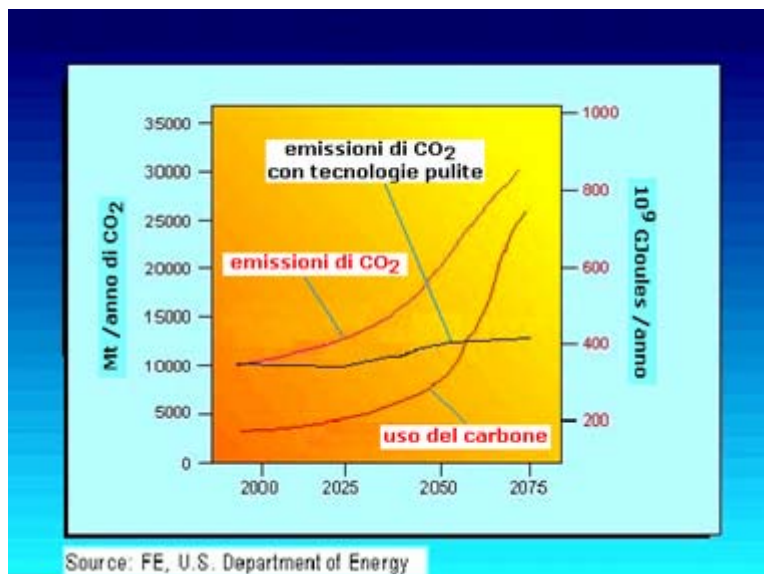


Figura 7. Contributo delle tecnologie avanzate alla soluzione dell'effetto serra da emissioni di CO₂

Nei Paesi più sviluppati, i combustibili fossili utilizzati per le auto e i veicoli commerciali, per il riscaldamento negli edifici e per l'alimentazione delle numerose centrali energetiche sono responsabili in misura del 95% delle emissioni dell'anidride carbonica, del 20% di quelle del metano e del 15% per quanto riguarda l'ossido nitroso o protossido di azoto.

L'aumento dello sfruttamento agricolo, le varie produzioni industriali e le attività minerarie contribuiscono ulteriormente per una buona fetta alle emissioni in atmosfera. Anche la deforestazione concorre ad aumentare la concentrazione di anidride carbonica nell'aria; infatti, le piante sono in grado di ridurre la presenza della CO₂ nell'aria mediante il processo fotosintetico.

Il danno è ancora più evidente se si pensa che nel corso degli incendi intenzionali che colpiscono ogni anno le foreste tropicali viene emessa una quantità totale di anidride carbonica paragonabile a quella delle emissioni dell'intera Europa. Da notare che la respirazione delle specie animali e la decomposizione della materia organica rilasciano una quantità di CO₂ nell'aria 10 volte maggiore di quella rilasciata dalle attività umane; queste emissioni sono state comunque bilanciate nel corso dei secoli fino alla rivoluzione industriale tramite la fotosintesi e l'assorbimento operato dagli oceani.

Se le emissioni globali di CO₂ fossero mantenute come in questi ultimi anni, le concentrazioni atmosferiche raggiungerebbero i 500 ppm per la fine di questo secolo, un valore che è quasi il doppio di quello pre-industriale (280 ppm). Il problema viene ulteriormente complicato dal fatto che molti gas serra possono rimanere nell'atmosfera anche per decine o centinaia di anni, così il loro effetto può protrarsi anche per lungo tempo.

Data la gravità della situazione è necessario porre rimedio nei tempi più brevi possibili.

Il Protocollo di Kyoto impegna i Paesi industrializzati e quelli ad economia in transizione (i Paesi dell'est europeo) a ridurre complessivamente del 5% rispetto al 1990 e nel periodo 2008–2012 le principali emissioni antropogeniche dei gas capaci di alterare il naturale effetto serra (questi Stati sono attualmente responsabili di oltre il 70% delle emissioni).

I sei gas serra presi in considerazione sono, come si è detto, l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto (N₂O), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC) e l'esafluoruro di zolfo (SF₆). Il vapor d'acqua non è stato considerato in quanto le emissioni di origine antropogenica sono estremamente piccole se paragonate a quelle enormi di origine naturale.

Per i Paesi in via di sviluppo il Protocollo di Kyoto non prevede alcun obiettivo di riduzione. In queste regioni la crescita delle emissioni di anidride carbonica e degli altri gas serra sta avvenendo ad un ritmo che è circa triplo (+25% nel periodo 1990-1995) di quello dei Paesi sviluppati (+8% dello stesso periodo), partendo tuttavia da una base molto inferiore.

La stima delle future emissioni diventa così estremamente difficile perché dipende dai vari trend demografici, economici, tecnologici e dagli sviluppi politici ed istituzionali di tutti i paesi del pianeta. In ogni caso, senza delle misure più restrittive volte alla limitazione delle emissioni, la concentrazione atmosferica dei gas serra si teme continuerà ad aumentare fino a provocare dei danni climatici impensabili.

Il clima del nostro pianeta è dinamico e si sta ancora modificando da quando la terra si è formata. Le fluttuazioni periodiche nella temperatura e nelle modalità di precipitazione sono conseguenze naturali di questa variabilità. Vi sono comunque delle evidenze scientifiche che fanno supporre che i cambiamenti attuali del clima terrestre stiano eccedendo quelli che ci si potrebbe aspettare a seguito di cause naturali.

L'aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera sta causando un corrispondente incremento della temperatura globale della Terra. Le rilevazioni effettuate hanno dimostrato che negli ultimi 15 anni del XX secolo vi sono stati i 10 anni più caldi di tutto il periodo; il 1998 è stato l'anno più caldo in assoluto.

Inoltre, come si è già detto, si ritiene che la temperatura media globale superficiale possa aumentare di 0,6-2,5°C nei prossimi 15 anni e di 1,4-5,8°C nel secolo in corso, pur con significative variazioni regionali.

Al momento, l'incremento risulta maggiore per quanto riguarda le temperature minime che stanno aumentando ad una velocità doppia di quelle massime. Il riscaldamento è maggiore nelle aree urbane sia a causa dei cambiamenti che si sono verificati nelle coperture dei terreni

che per il consumo di energia che avviene nelle aree densamente sviluppate (fenomeno conosciuto come “isole di calore”).

L'aumento delle temperature comporta inevitabili effetti a livello meteorologico. Con l'incremento della temperatura vi è un conseguente aumento dell'evaporazione, per cui si ritiene che, a livello globale, l'inasprimento dell'effetto serra porterà ad una crescita delle precipitazioni e ad una maggiore frequenza delle tempeste di forte intensità.

I calcoli sui cambiamenti climatici in aree specifiche sono molto meno affidabili di quelli globali e, di conseguenza, non è chiara la variazione che avranno i climi regionali. Si ritiene, comunque, che per il maggior calore vi sarà una riduzione dell'umidità in varie regioni delle zone tropicali che andranno incontro a frequenti siccità.

Un'ipotesi interessante è stata formulata a proposito delle future condizioni climatiche dell'Europa. Alcuni ricercatori ritengono che lo scioglimento dei ghiacci artici provocato dal riscaldamento globale provocherà un potenziamento delle correnti oceaniche provenienti dall'Artico. Queste causeranno la deviazione della Corrente del Golfo del Messico che attualmente lambisce le coste dell'Europa Occidentale.

Per capire l'effetto che ha questa corrente sul clima europeo basta fare questa considerazione: a Dicembre in Normandia (Francia) la temperatura si aggira attorno allo 0 centigrado; in Canada, alle stesse latitudini si raggiungono spesso i -30°C. Il venir meno dell'effetto riscaldante della Corrente del Golfo potrebbe così paradossalmente condurre l'Europa verso una nuova glaciazione, in un periodo in cui la maggior parte della Terra va incontro ad un riscaldamento.

In ogni caso si è scoperto che, mentre la maggior parte della terra si sta riscaldando, le regioni che sono sottoposte alla ricaduta delle emissioni di biossido di zolfo si stanno in genere raffreddando. Le nuvole di solfati atmosferici prodotti dalle emissioni industriali raffreddano l'atmosfera riflettendo la luce solare verso lo spazio ed attenuano l'effetto dell'incremento della concentrazione dei gas serra; comunque i solfati hanno una permanenza atmosferica molto bassa e la loro presenza varia, anche di molto, nelle diverse zone della terra.

L'aumento delle temperature a causa del riscaldamento globale provocato dall'incremento della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera può comportare sia effetti diretti che indiretti per la salute dell'uomo.

Le temperature estremamente calde aumentano soprattutto i rischi fisici a carico delle persone che presentano problemi cardiaci. Questi soggetti sono più vulnerabili perché in condizioni termiche più elevate il sistema cardiovascolare deve lavorare in modo maggiore per mantenere la temperatura corporea stabile. Il clima più caldo comporterebbe inoltre una maggiore frequenza dei colpi di calore ed un aumento della diffusione dei problemi respiratori.

Le temperature più elevate aumentano inoltre la concentrazione dell'ozono a livello del suolo, favorendone la formazione. Le statistiche sulla mortalità e sui ricoveri ospedalieri dimostrano chiaramente che la frequenza delle morti aumenta nei giorni particolarmente caldi, in modo particolare fra le persone molto anziane e fra i malati di asma. In ogni luogo della Terra, la presenza e la diffusione delle malattie sono fortemente influenzate dal clima locale.

In effetti, molte malattie infettive potenzialmente mortali sono diffuse solamente nelle aree più calde del pianeta.

Malattie come la malaria, la febbre dengue, la febbre gialla e l'encefalite potrebbero aumentare la loro diffusione se le zanzare e gli altri insetti che le diffondono trovassero condizioni climatiche più favorevoli alla loro diffusione. Le temperature più elevate possono anche favorire l'aumento dell'inquinamento biologico delle acque, favorendo la proliferazione dei vari organismi infestanti.

Molti ricercatori ritengono anche che l'inasprirsi dell'effetto serra comporterebbe un aumento del fenomeno dell'eutrofizzazione delle acque, con tutti i danni biologici, economici e sanitari che questo comporterebbe.

Tutti questi problemi sarebbero di difficile soluzione anche per i Paesi Occidentali che dispongono di un patrimonio economico ed industriale enorme.

Molti degli impatti del cambiamento climatico potrebbero comunque essere risolti tramite l'organizzazione ed il mantenimento di adeguati programmi a difesa dell'ambiente e della salute pubblica. Invece, nei Paesi del Terzo (e Quarto) Mondo, l'inasprimento delle condizioni ambientali provocherebbe situazioni sanitarie e sociali insostenibili.

L'aumento delle malattie, delle carestie e degli scontri sociali per la crescente povertà e precarietà della vita comporterà conseguenze inimmaginabili che finiranno per ricadere anche sui paesi più progrediti, nei quali gli interessi economici hanno avuto la prevalenza sugli aspetti ambientali.

L'incremento della temperatura della Terra può provocare una serie di effetti ambientali di notevoli proporzioni. L'aumento del calore e quindi dell'evaporazione dai grandi bacini idrici comporta un aumento corrispondente della quantità d'acqua in atmosfera e quindi un aumento delle precipitazioni.

Alcuni ricercatori ritengono che queste siano cresciute di circa l'uno per cento su tutti i continenti nell'ultimo secolo. Le aree poste ad altitudini più elevate dimostrano incrementi più consistenti; al contrario le precipitazioni sono diminuite in molte aree tropicali. In ogni caso si nota una maggiore intensità delle piogge e dei fenomeni meteorologici più violenti (come le tempeste e gli uragani) con un conseguente aumento delle inondazioni e delle erosioni a carico del terreno.

Il riscaldamento globale comporta anche una diminuzione complessiva delle superfici glaciali. Le grandi masse di ghiaccio della Groenlandia e dei ghiacciai continentali stanno arretrando notevolmente; e, ultimamente, anche i ghiacci dell'Antartide hanno iniziato a restringersi.

L'aumento del volume oceanico a causa della temperatura più alta e lo scioglimento dei ghiacci provocano anche l'innalzamento del livello medio del mare. Negli ultimi cento anni è cresciuto approssimativamente di 15-20 cm.

Inoltre, in molte zone tropicali già si assiste ad una riduzione dell'umidità del suolo che comporta una diminuzione nella resa agricola; molte aree, anche in Europa, sono a rischio di desertificazione.

Tutti questi effetti sono già scientificamente evidenti per i molti dati ottenuti a riguardo e si ipotizza un inasprimento della situazione attuale nel caso in cui le concentrazioni dei gas serra aumentassero. Lo scenario che si può ipotizzare è impressionante: i deserti potrebbero espandersi in terre già ora semiaride; le foreste, i polmoni della terra, diminuirebbero ulteriormente nella loro estensione; intere popolazioni, ora in regime di sussistenza, non avrebbero più risorse idriche a disposizione; città costiere e numerose isole scomparirebbero nel mare.

Per quanto riguarda le conseguenze che il pianeta terra può subire in seguito ad un continuo aumento della temperatura, esse possono assumere dimensioni catastrofiche anche per soli 1-2°C di aumento rispetto alla temperatura media attuale. Come detto si presagiscono catene di effetti, a partire dallo scioglimento parziale delle calotte polari fino alla scomparsa di numerose specie animali e vegetali particolarmente sensibili.

2.2.3. Emissioni di anidride carbonica

L'**anidride carbonica** CO₂ è una sostanza fondamentale nei processi vitali delle piante e degli animali. A temperatura e pressione ambiente è un gas incolore e inodore.

Essa è il risultato della combustione di un composto organico in presenza di una quantità di ossigeno sufficiente a completarne l'ossidazione. In natura, viene anche prodotta da batteri durante il processo di fermentazione ed è il sottoprodotto della respirazione.

Le piante la utilizzano per la fotosintesi che, combinandola con l'acqua e per azione della luce solare e della clorofilla, la trasforma in glucosio liberando ossigeno come sottoprodotto.

È presente a basse concentrazioni nell'atmosfera della terra, dove agisce come gas serra. La correlazione tra il rapido aumento della sua concentrazione nell'atmosfera nell'ultimo secolo principalmente dovuto all'intenso uso di combustibili fossili ed il fenomeno di riscaldamento globale con il conseguente scioglimento dei ghiacciai ed espansione delle aree desertiche della terra sembra ormai essere un fatto assodato.

2.3. La presenza di anidride carbonica in natura

ATMOSFERA

Nel 2004 il contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera terrestre era circa dello 0,038% (o 380 ppm) in volume. Per via della maggiore estensione delle terre emerse e quindi della maggiore superficie occupata da vegetazione, nell'emisfero nord della Terra si osserva una fluttuazione della concentrazione di anidride carbonica di circa 5 ppm nell'arco dell'anno, che raggiunge il suo massimo nel mese di maggio ed il suo minimo in quello di ottobre, al termine della stagione vegetativa dell'emisfero nord, quando la biomassa vegetale del pianeta è al suo valore massimo.

Nonostante la sua relativamente piccola concentrazione, la CO₂ è un componente fondamentale dell'atmosfera terrestre perché - insieme al vapore acqueo ed al metano - intrappola la radiazione infrarossa della luce solare riflettendola nuovamente verso la superficie terrestre impedendo alla Terra di mantenere costante la sua temperatura.

Sono stati i vulcani le prime fonti di anidride carbonica atmosferica della Terra neonata, e grazie ad essa si è potuto instaurare un clima favorevole allo sviluppo della vita. Oggi i vulcani rilasciano in atmosfera circa 130 - 230 milioni di tonnellate di anidride carbonica ogni anno, ma questa quantità rappresenta solo l'1% della quantità di anidride carbonica totale liberata in atmosfera dalle attività umane.

Si stima che la concentrazione atmosferica di anidride carbonica sia aumentata del 35% dai tempi della rivoluzione industriale e del 20% dal 1958. La combustione dei combustibili fossili (carbone, petrolio) è la principale causa di questo aumento; la deforestazione è la seconda.

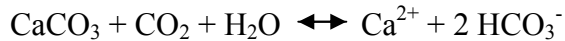
L'ipotesi del *riscaldamento globale* compare nella letteratura scientifica per la prima volta alla fine del XIX secolo. Vi si ipotizza che un aumento della quantità di anidride carbonica nell'atmosfera vada ad incrementare l'effetto serra e contribuire quindi ad un rapido riscaldamento del pianeta al quale gli ecosistemi non avrebbero il tempo necessario per adattarsi.

L'entità di questo effetto è ancora in discussione, ma la diffusa convinzione che si stia, in realtà, attraversando una fase di riscaldamento generalizzato del clima terrestre ha portato

molti paesi del mondo a siglare il protocollo di Kyoto, un accordo in cui le nazioni si impegnano a limitare e ridurre le emissioni di anidride carbonica.

OCEANI

Gli oceani contengono quantità enormi di anidride carbonica sotto forma di ioni bicarbonato e carbonato, più di quanta ce ne sia nella stessa atmosfera. Il bicarbonato (solubile) viene prodotto per azione dell'anidride carbonica libera sulle rocce calcaree secondo la reazione:



È attraverso reazioni come questa che gli oceani vanno a tamponare le variazioni di concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera; la reazione è, infatti, reversibile. Per centinaia di milioni di anni questo processo ha prodotto enormi quantità di rocce costituite da carbonati che sono andati a depositarsi sui fondali marini.

Con l'aumentare della concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera, aumenta la quantità di ioni bicarbonato presenti nelle acque marine con conseguente abbassamento del pH. Si ritiene che gli aumenti di temperatura ed acidità siano all'origine della moria delle barriere coralline osservata negli ultimi anni in numerose zone tropicali del pianeta.

2. CATTURA E CONFINAMENTO GEOLOGICO DELLA CO₂ (CCS)

2.1 Metodi di cattura e sequestro della CO₂

Più del 60% delle emissioni in atmosfera di CO₂ prodotte dall'uomo avvengono in grandi infrastrutture, quali centrali elettriche, raffinerie, impianti di trattamento gas ed altri impianti industriali.

Nella maggioranza di questi, i gas di combustione esausti contengono anche CO₂ diluita (dal 5% al 15%). Un'opzione a disposizione ai fini del successivo sequestro è quella di separare la CO₂ dagli altri gas contenuti nei fumi e di concentrarla sino al 90%.

Un'altra opzione è di rimuovere il carbonio prima della combustione, come nel caso in cui l'idrogeno e la CO₂ sono prodotti assieme a partire dal gas naturale (CH₄).

La cattura della CO₂ è una tecnica ben nota ed usata in vari settori industriali, dove essa viene abitualmente separata dagli altri gas.

Attualmente, la CO₂ risultante viene rilasciata nell'atmosfera oppure sottoposta a processi aggiuntivi per produrre CO₂ ad elevato grado di purezza da usare in mercati di nicchia, quali l'industria delle bevande. Sebbene esista un'idonea tecnologia, la cattura della CO₂ non è stata ancora ottimizzata per un'applicazione su vasta scala in impianti di produzione di energia.

Nel mondo sono in corso approfondite ricerche per verificare nuovi promettenti metodi e migliorare le tecnologie esistenti con l'intento di ridurre i costi e l'energia consumata nella cattura. Allo stesso tempo, sono stati programmati test in centrali elettriche per convalidare a scala industriale le tecnologie più recenti.

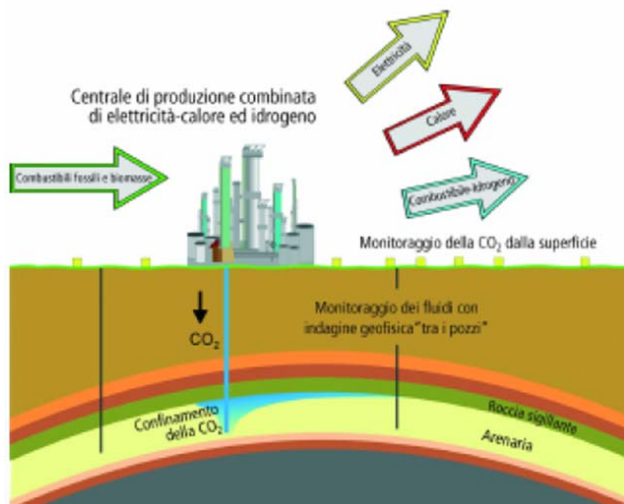


Figura 8. Concetto di impianto combinato termo-energetico (CHP) per la produzione di elettricità, calore e idrogeno insieme alla cattura e al confinamento della CO₂

2.2. Tecnologie di cattura della CO₂

Tutti i combustibili fossili contengono carbonio. Bruciando il combustibile, il carbonio reagisce con l'ossigeno nell'aria per formare la CO₂. Rimuovendo il carbonio prima o dopo il processo di combustione si evita di immettere nell'atmosfera la CO₂.

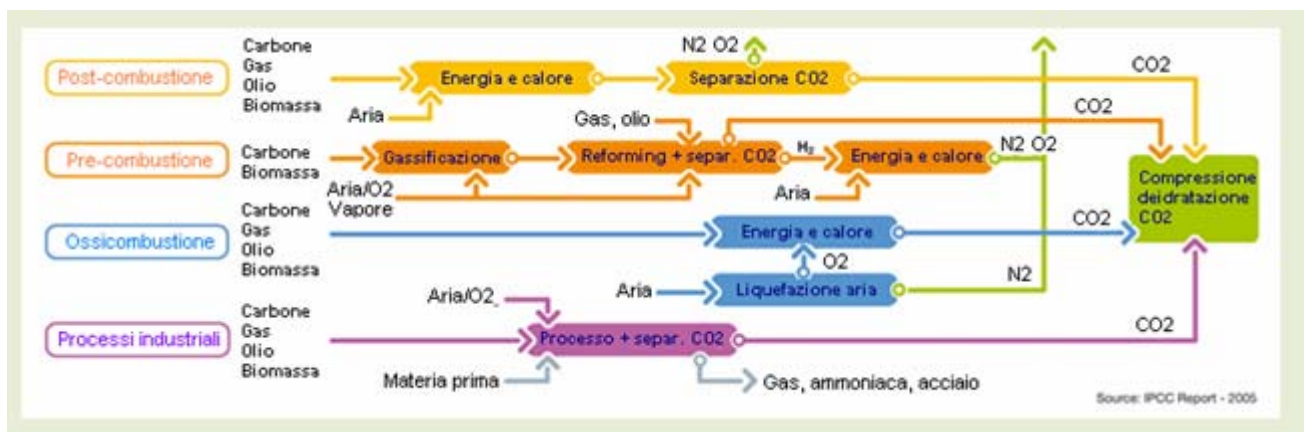


Figura 9. Schemi dei processi alternativi per la cattura dell'anidride carbonica

Questa, invece, catturata sotto forma di gas, ed eventualmente condensata allo stato liquido può essere trasportata in un idoneo serbatoio naturale di immagazzinamento sotterraneo [35]. Esso può essere un giacimento petrolifero o di gas naturale già sfruttati, un deposito di carbone o una falda acquifera salina profonda (una formazione geologica contenente acqua non adatta ad usi civili o industriali).

2.2.1. Recupero post-combustione

In fase di **post-combustione**, la CO₂ è eliminata a valle della caldaia dove viene bruciato il combustibile. Questo schema può essere facilmente applicato negli attuali impianti di tipo convenzionale (retrofitting).

La tecnologia è ben conosciuta ed è già usata in alcuni mercati di “nicchia”. Il processo presuppone la separazione della CO₂ catturandola direttamente dal flusso gassoso con **reagenti vari** (ammoniaca, urea).

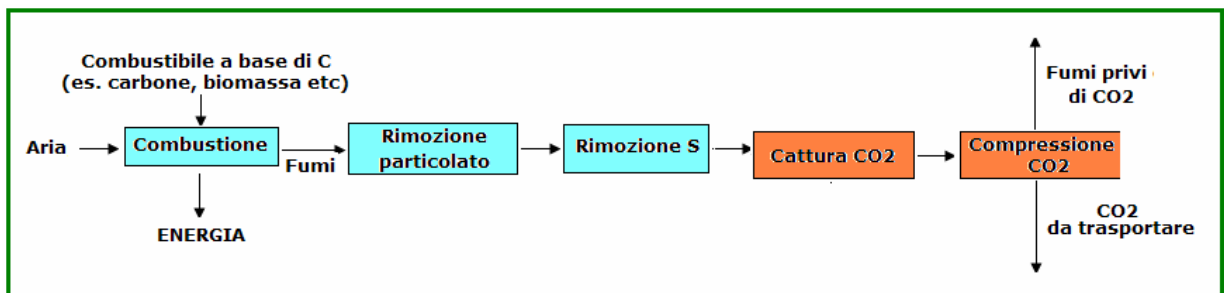


Figura 10. Fasi del processo di cattura post-combustione

Il processo può essere collegato ad un convenzionale impianto di combustione di potenza ed elimina le emissioni di CO₂ dal flusso dei gas di combustione. L'ammina è un solvente usato per rimuovere le emissioni di CO₂ dagli altri gas contenuti nei fumi, principalmente azoto. La CO₂ è quindi separata per lo stoccaggio per mezzo del solvente che può essere rigenerato e riutilizzato. Un grande vantaggio della cattura post-combustione è che può essere possibile adeguarla alle attuali centrali.

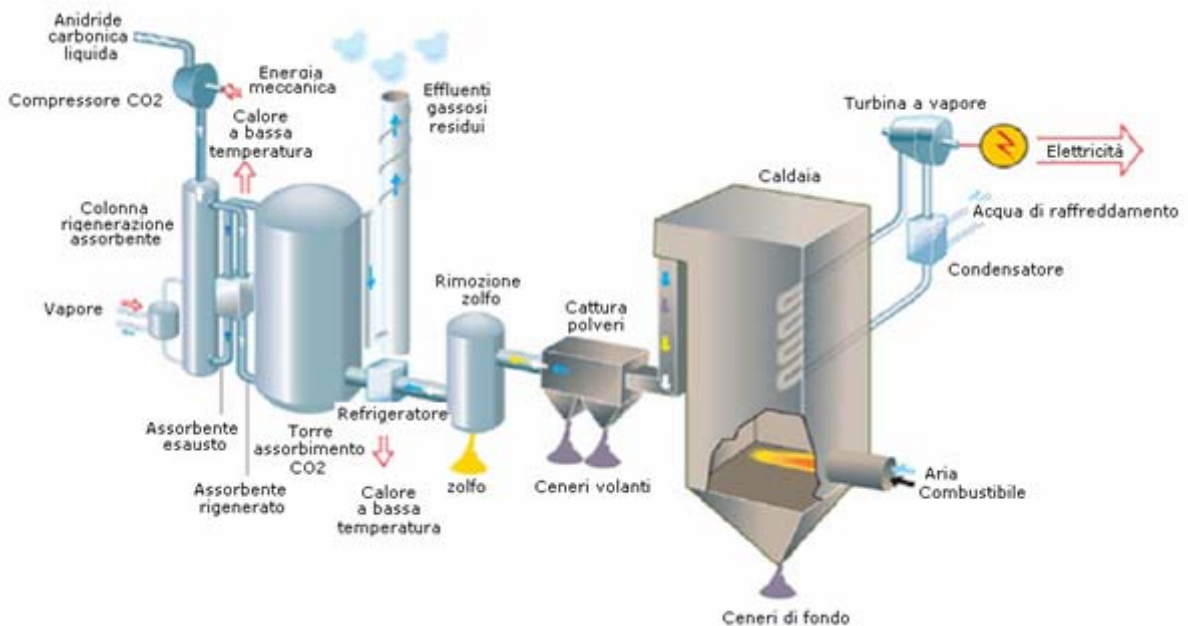


Figura 11. Schema del processo di cattura post-combustione

2.2.2 Recupero 'pre-combustione

Il processo in fase di pre-combustione è largamente applicato nei settori dei fertilizzanti, nella carbochimica e nella conversione del carbone in combustibili gassosi (H_2 , CH_4), oltre che per la generazione di energia elettrica.

In questo caso si procede alla gassificazione e l'anidride carbonica prodotta può essere catturata da un flusso gassoso relativamente puro.

può essere raggiunto attraverso tecnologia IGCC (gassificazione integrata a ciclo combinato) adattando il processo in modo che insieme all'idrogeno si produca CO_2 , piuttosto che monossido di carbonio. L'idrogeno viene poi bruciato in una turbina a gas e le emissioni di CO_2 catturate per la conservazione o l'uso.

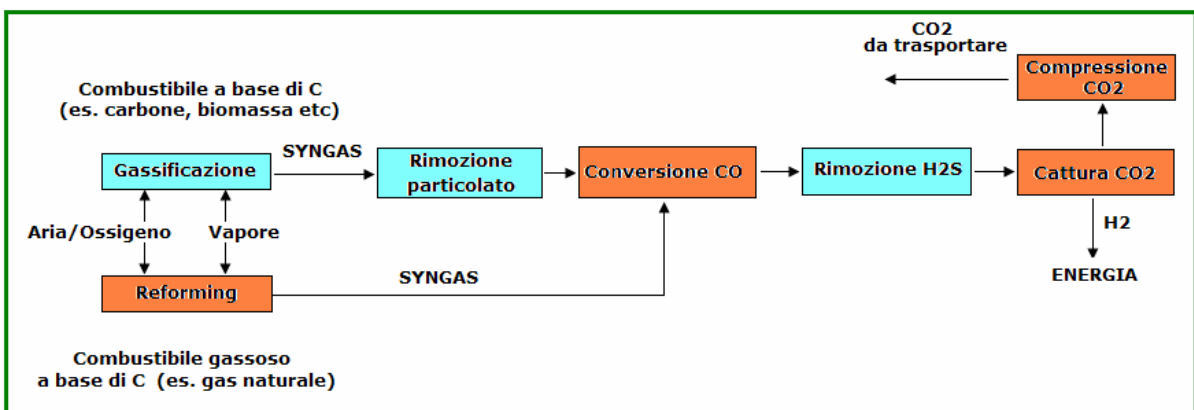


Figura 12. Fasi del processo di cattura pre-combustione

2.2.3. Ossicombustione

Il combustibile fossile (compresa la lignite) è bruciato con ossigeno, prodotto attraverso la liquefazione frazionata dell'aria al di sotto della temperatura critica (circa $-200^{\circ}C$).

Il gas di combustione è formato esclusivamente da CO_2 che può essere direttamente iniettato nel sito di sequestro geologico. Il processo è promettente ma richiede elevati consumi di energia per la produzione dell'ossigeno.

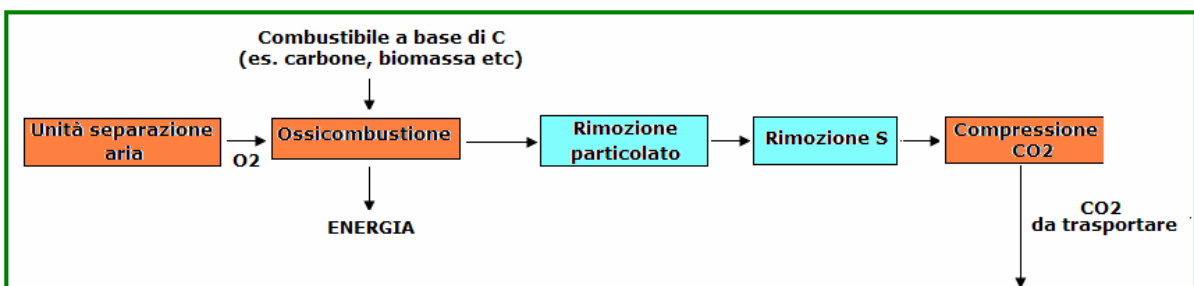


Figura 13. Fasi del processo di cattura con ossi-combustione

Un metodo alternativo alla ossicombustione, tuttora in fase di sviluppo, è la combustione in circuito chiuso in assenza di aria. L'ossigeno è fornito da un ossido metallico macinato che reagisce con un combustibile fossile solido, liquido o gassoso in un combustore a letto fluidizzato producendo metallo elementare e una miscela di anidride carbonica e vapore acqueo.

Il vapore viene condensato e separato dalla CO₂ praticamente pura che può essere sequestrata. Le particelle metalliche passano a un reattore a letto fluidizzato dove reagiscono con l'aria per essere ossidate e rigenerate prima di essere riciclate al combustore.

I costi della cattura sono molto maggiori di quelli relativi a sorgenti puntuali ma possono risultare accettabili nel caso di utenze mobili e diffuse, quali automobili e aerei.

2.3 Dimensione del problema in Italia e in Europa

Si stima che in Italia la cattura delle emissioni di CO₂ di grosse industrie come cementifici, industrie chimiche, raffinerie o centrali termoelettriche permetterebbe di recuperare dal 20 al 30% dei 550 milioni di tonnellate di CO₂ emesse ogni anno. In Europa, lo stoccaggio potrebbe interessare 400 "grossi emettitori", ognuno dei quali produce più di un milione di t di CO₂ all'anno da combustibili fossili.

Quanto alla produzione di idrogeno, spesso considerato la risorsa energetica del futuro, è anch'essa strettamente connessa alla produzione di CO₂ ed alla soluzione dei problemi che ne derivano: se si produce idrogeno dal petrolio (come oggi si fa per la maggior parte dell'idrogeno disponibile industrialmente), il carbonio delle catene idrocarboniche viene necessariamente trasformato in CO₂.

Apparentemente non si è fatto nessun guadagno: ma si deve considerare che in questo modo la CO₂ verrebbe prodotta in modo centralizzato, e quindi molto più facile da catturare. In altre parole, alimentando il riscaldamento residenziale e l'autotrazione con celle a combustibile alimentate a idrogeno, sarebbe possibile trasformare moltissime fonti di CO₂ "diffuse" in poche fonti "centralizzate" più facili da gestire.

3. CONFINAMENTO DELLA CO₂

Dopo la cattura, la CO₂ può essere sia confinata sia riutilizzata (ad es. per produrre bibite gassate, o nelle serre per favorire la crescita delle piante). Poiché il mercato per il riutilizzo della CO₂ è attualmente limitato, la maggior parte della CO₂ catturata dovrà tuttavia essere necessariamente confinata.

Essa può esserlo in formazioni geologiche, quali i giacimenti già sfruttati di petrolio e di gas, le falde acquifere saline profonde ed i depositi di carbone non coltivabili. La CO₂ può anche essere fissata da rocce di composizione silicatica formando carbonati minerali.

3.1 Potenziali siti di immagazzinamento.

Le formazioni geologiche offrono una immensa capacità di immagazzinamento (si veda la tabella 1 seguente). Nonostante le ampie escursioni nella capacità, si può concludere che essa

sarebbe sufficiente per confinare le emissioni mondiali di CO₂ prodotte dall'uomo, per migliaia e verosimilmente centinaia di migliaia di anni.

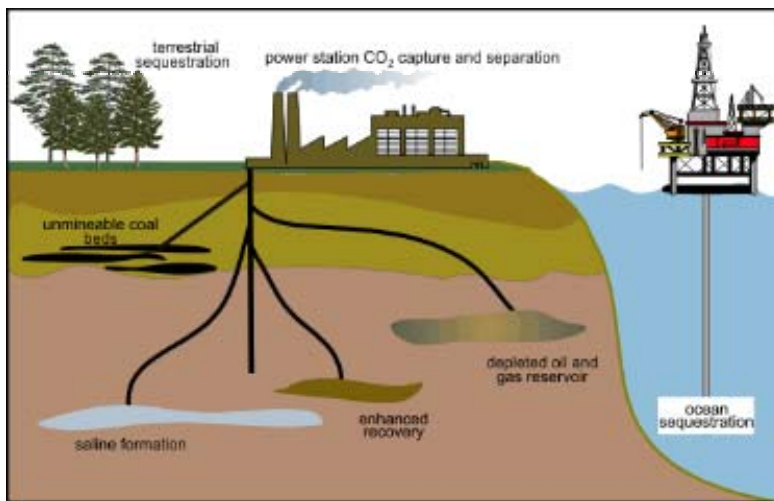


Figura 14. Schemi di sequestro geologico della CO₂

3.1.1. Profondità oceaniche

Lo stoccaggio negli oceani, opzione anch'essa in fase di ricerca e sperimentazione, si basa sulle caratteristiche di stato della CO₂ [35].

Procedendo in profondità negli oceani, la CO₂ entra nel campo di stabilità della fase liquida e rapidamente in quello di stabilità della fase idrata: queste sono le fasi che caratterizzano la CO₂ al di sotto dei 400 m circa.

Altra caratteristica importante è la densità della fase fluida, che tende a crescere fino a superare quella dell'acqua di mare tra i 2500 ed i 3000 m.

Al di sotto di questa profondità dunque il fluido tende a sprofondare e a stratificarsi sui fondali. Le ipotesi allo studio prevedono di formare laghi di CO₂ sui fondali profondi privi di correnti di fondo. Si stima che questa possibilità offra ampie capacità di stoccaggio e tempi di permanenza lunghi.

La CO₂ può essere iniettata all'interno di sedimenti marini porosi spessi alcune centinaia di metri e profondi almeno 3000 m. Si ritiene che la situazione possa restare stabile permanentemente, anche in presenza di perturbazioni geomeccaniche. Alle alte pressioni e basse temperature delle formazioni presenti nei fondali oceanici la CO₂ si mantiene allo stato liquido e può stratificarsi al disotto del fluido che occupa la porosità sovrastante rendendo il deposito di CO₂ gravitazionalmente stabile.

L'anidride carbonica può essere depositata direttamente nell'oceano formando un lago sul fondo. Questa soluzione tuttavia potrebbe avere conseguenze pericolose dal punto di vista ambientale a causa dell'assenza di confinamento del deposito.

Resta da risolvere dal punto di vista sia tecnico che economico il problema del trasferimento in profondità della CO₂ allo stato liquido per mezzo di tubazioni.

Lo smaltimento consisterebbe nel pompare il gas sotto qualche centinaio di metri di sedimenti, a 3 km di profondità, dove, come si è sopra detto, la bassa temperatura e la pressione basterebbero a liquefare la CO₂ che, in quello stato, sarebbe più densa dell'acqua marina e rimarrebbe confinata anche in caso di forti scosse sismiche.

Al riguardo, è da tener presente che, così come nelle falde acquifere, anche nelle profondità marine la CO₂ ha il vantaggio di restare disciolta nell'acqua. A parte i costi, l'idea sembra attraente: la capacità di stoccaggio degli abissi oceanici è praticamente infinita, e - per quanto si sa attualmente - le correnti e gli scambi di acqua tra la superficie del mare e gli strati profondi sono molto limitati o comunque individuabili e evitabili.

Tuttavia, i problemi da risolvere sono ancora troppo grandi e riguardano l'impatto di questo fluido con l'ecosistema marino profondo, in quanto non si conosce la reattività delle fasi fluide ed idrate con l'idrosfera e la biosfera.

Si conosce infatti ancora troppo poco sull'ecosistema marino nel suo complesso, per poter escludere che non ci saranno - magari a lungo termine - impatti negativi della presenza di CO₂ sulla fauna e sulla flora sottomarina, e quindi sulle catene alimentari che assicurano la sopravvivenza di gran parte dell'umanità. Né si può escludere che a lungo tempo vi siano variazioni chimico-fisiche presso i fondali prescelti.

Infine manca una legislazione internazionale che definisca vincoli e responsabilità degli operatori.

Questi problemi, ben lungi dall'essere risolti, rendono lo stoccaggio nei mari profondi una possibilità allo stato attuale non percorribile in tempi brevi.

3. 1.2. Carbonatazione di rocce basiche

Il sequestro della CO₂ avviene in maniera spontanea attraverso processi naturali di carbonatazione di sostanze minerali contenute in rocce basiche con poca silice libera e presenza di silicati di magnesio e altri elementi (serpentiniti, ofioliti, cloriti). Tale processo indica che le rocce serpentinitiche sono potenzialmente capaci di catturare notevoli quantità di CO₂ in particolar modo se presenti in zone termicamente anomale, come ai margini di campi geotermici.

La carbonatazione di minerali è una reazione chimica tra la CO₂ ed alcuni minerali naturali che contengono cationi bivalenti (per esempio, silicati di Ca, Mg, Fe) per formare carbonati stabili.

I processi di mineralizzazione della CO₂ presenta le migliori garanzie in termini di durata e minimizzazione degli impatti ambientali; inoltre possono essere impiegati sia minerali ultrafemici come olivina e serpentino, ma anche rifiuti solidi, residui da vari processi, ad esempio: scorie di acciaieria oppure ceneri di impianti di termovalorizzazione o di combustione del carbone.

Questo metodo, ancora in fase di sperimentazione, ha un impatto potenzialmente positivo, in quanto i suoi sottoprodotti sono economicamente interessanti e dunque sarebbe possibile limitare considerevolmente la quantità di rifiuti finali al termine della produzione.

Tuttavia, la reazione chimica, sebbene sia esotermica, è molto lenta in condizioni naturali e necessita, per realizzarsi in tempi utili, di un impiego di energia tale da rendere questo metodo per lo stoccaggio della CO₂ poco attraente allo stato attuale dello sviluppo tecnologico.

Dal punto di vista economico, la prospettiva di immobilizzare la CO₂ prodotta dalle attività antropiche mediante la carbonatazione dei minerali di Ca e Mg contenuti nelle rocce ultrafemiche è ancora oggi difficilmente perseguibile per le elevate quantità e gli alti costi di approvvigionamento dei materiali necessari. Infatti, per la carbonatazione di 10.000 t/giorno di CO₂ sarebbero necessarie 23.000 t/giorno di roccia con un costo stimabile intorno a 20 Euro la tonnellata. Ancora oggi non esistono impianti di tal genere.

3.1.3. Immagazzinamento in giacimenti di petrolio e di gas naturale:

Questi siti sono considerati sicuri per il confinamento geologico della CO₂, in quanto hanno già contenuto petrolio, gas naturale e spesso CO₂ per milioni di anni.

Il pompaggio di CO₂ in alcuni di essi può consentire di estrarre una ulteriore parte del petrolio e del gas residui nel giacimento: infatti l'iniezione di CO₂ in pressione nel giacimento può facilitare la produzione, innalzando sensibilmente il fattore di recupero dei fluidi utili, perché la CO₂ si "dissolve" nel petrolio rendendolo meno viscoso e facendolo più facilmente fluire durante l'estrazione.

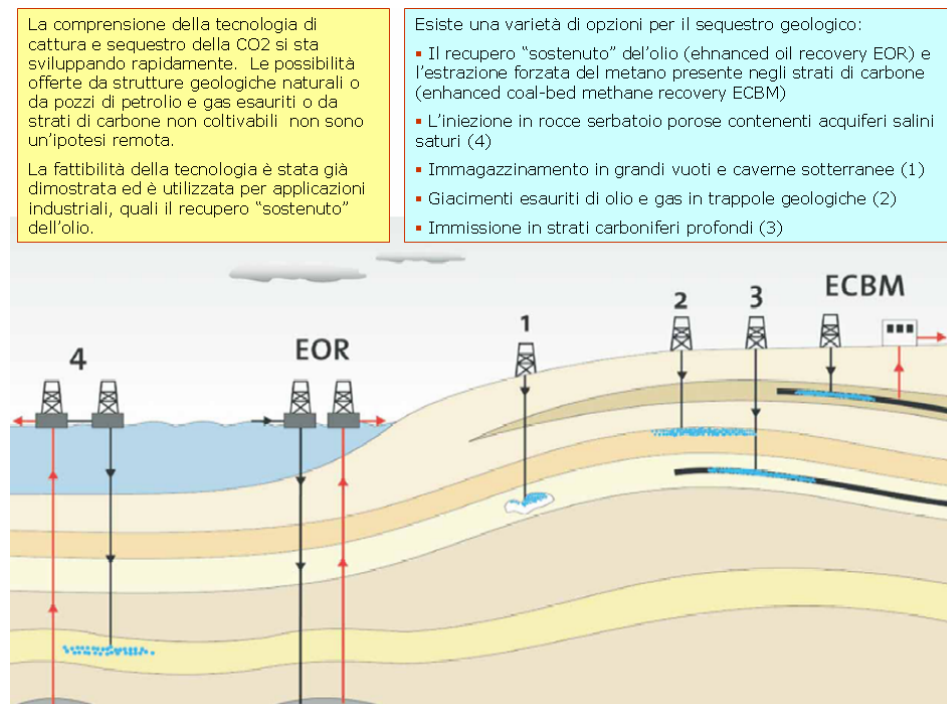


Figura 15. Opzioni per il sequestro geologico della CO₂

Tale processo, noto come "recupero incrementato di petrolio e di gas" (EOR - *Enhanced Oil Recovery*), è stato largamente impiegato e verificato (prevalentemente negli USA), ma con lo scopo di aumentare la produzione di idrocarburi e non quello di confinare la CO₂ impiegata. Il guadagno derivante da questa produzione aggiuntiva può essere utilizzato per compensare i costi del confinamento della CO₂.

In Canada, viene praticata da molti anni la re-iniezione di gas acido (un prodotto residuale della raffinazione di gas naturale, costituito principalmente da CO₂ e H₂S) nei giacimenti di petrolio/gas e nelle falde acquifere saline profonde.

Nelle tecniche EOR, ad esempio, di regola si iniettano quantitativi di CO₂ molto minori rispetto alle capacità di stoccaggio dei giacimenti. Inoltre, tali tecniche sono adottate prevalentemente nei bacini sedimentari di produzione di petrolio e solo nei casi in cui i costi di investimento siano ripagati dal maggior petrolio estratto (si utilizza CO₂ acquistata, non catturata in un'ottica di riduzione delle emissioni).

In realtà è possibile che gli spazi occupati in precedenza dagli idrocarburi vengano occupati dall'acqua, che può entrare nei giacimenti sia artificialmente che naturalmente, il che ridurrebbe di molto le capacità di stoccaggio CO₂ del giacimento.

Nel complesso, comunque, le potenzialità mondiali di confinamento geologico della CO₂ in giacimenti già sfruttati di petrolio e di gas sono cospicue: pari a circa 900 - 1.300 miliardi di tonnellate secondo le valutazioni IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), fino ad oltre 1.800 Gt secondo altri.

3.1.4. Le falde acquifere saline profonde

Si tratta di formazioni sotterranee, tipicamente di arenaria, contenenti acqua salata, da qualche decina di grammi per litro fino a 100 g/l, rivestite di uno strato di argilla impermeabile. L'idea di confinarvi la CO₂ trova quindi giustificazione nel fatto che la risorsa idrica in questione non potrà mai essere sfruttata per scopi civili (converrebbe prelevare direttamente acqua di mare, che ha salinità di circa 30 g/l) e, quindi, il suo impiego quale contenitore di CO₂ non determina perdita di risorse.

Inoltre in queste falde non ci sono organismi viventi e pertanto queste formazioni offrono un enorme potenziale di confinamento senza causare nessun problema ecologico né di compromissione delle risorse idriche: sono presenti nella maggior parte dei paesi, spesso vicine alle aree industriali in cui si producono grandi quantità di CO₂, e sono generalmente molto ampie.

L'iniezione di CO₂ in queste formazioni è simile a quella nei giacimenti petroliferi e di gas. Il progetto norvegese "Sleipner", dove circa 1 milione di tonnellate di CO₂ vengono catturate su una piattaforma di estrazione petrolifera nel Mare del Nord e reiniettate ogni anno in una falda acquifera salina a circa 1.000 m sotto il fondo del mare, ha dimostrato su scala industriale la fattibilità tecnica ed economica della cattura e del confinamento geologico della CO₂.

Per una corretta valutazione dei quantitativi di CO₂ stoccabili in un acquifero salino vi sono, tuttavia, numerose variabili da considerare. Infatti, le proprietà chimico fisiche dell'acqua e della CO₂ sono dipendenti da densità, viscosità e solubilità, che a loro volta dipendono da pressione, temperatura e salinità. La solubilità in acqua della CO₂ decresce all'aumentare sia della temperatura, sia della salinità. Inoltre, i quantitativi di CO₂ che possono essere disciolti in acqua dipendono dalle dimensioni e dalla forma dell'interfaccia gas/acqua.

Le reazioni chimiche di dissoluzione dei carbonati in presenza di CO₂ possono determinare l'aumento della porosità dell'acquifero e quindi un aumento dei quantitativi in esso stoccabili. Le reazioni con le rocce costituite da alluminosilicati possono anch'esse aumentare la capacità di stoccaggio per fissazione della CO₂ in composti stabili (*mineral trapping*).

Per quanto concerne invece la valutazione sull'idoneità di un acquifero salino allo stoccaggio della CO₂, le caratteristiche fisiche da considerare (oltre alla profondità che influenza i processi d'iniezione per le diverse condizioni di temperatura e pressione) sono principalmente due:

- la porosità, ovvero la capacità dello strato di contenere CO₂;
- la permeabilità, ovvero la capacità dell'acquifero di far fluire l'acqua e il gas al proprio interno e il grado di confinamento con gli acquiferi circostanti.

Al riguardo, le industrie del petrolio hanno sviluppato varie tecniche in tal senso, con punti di controllo per misurare la pressione, prelievi di acqua, misurazioni sismiche e della variazione della gravità terrestre, ecc.

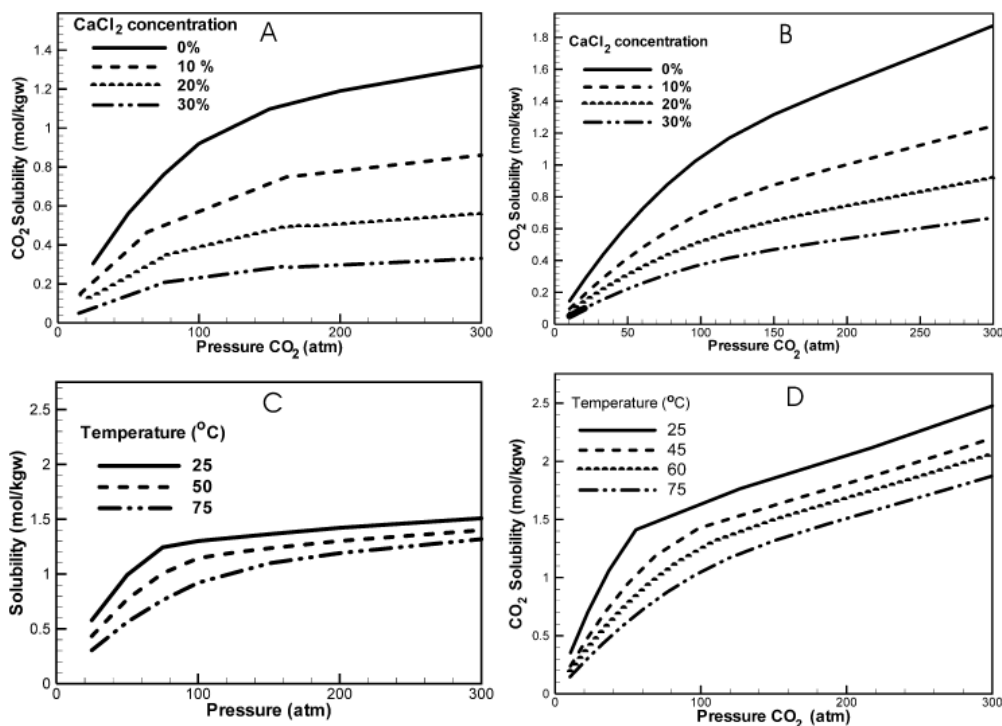


Figura 16 . Solubilità della CO₂ in acqua pura e salata con varie concentrazioni di CaCl₂ (White et al., 2005)

3.1.5. Gli strati profondi dei giacimenti di carbone

Esistono nel mondo giacimenti carboniferi o porzioni di essi che non possono essere economicamente coltivati, essendo troppo esigui o troppo profondi. Generalmente essi contengono una certa quantità di gas metano. Quando si inietta in essi la CO₂, è stato verificato che essa presenta un adsorbimento preferenziale con la superficie del carbone rispetto al metano che viene pertanto spiazzato e sostituito ad esso nella matrice di carbone.

Attraverso questa tecnica, il giacimento di carbone diventa un produttore di gas naturale, che può essere venduto per compensare i costi del confinamento della CO₂. Le vene carbonifere hanno contenuto metano per milioni di anni, quindi è molto verosimile che esse riescano a fissare la CO₂ e trattenerla per almeno decine di migliaia di anni.

Questa tecnica di confinamento è in fase di sperimentazione sul campo. A livello mondiale le capacità di stoccaggio geologico della CO₂ in miniere di carbone non altrimenti utilizzabili sono valutate in circa 150 miliardi di tonnellate.

La CO₂ verrebbe dapprima intrappolata negli interstizi della roccia, e una parte si dissolverebbe poi a poco a poco nell'acqua; l'abbassamento della pressione dovuto al processo di dissoluzione tende a stabilizzare il sito, e con il passare del tempo i rischi di "fughe" della CO₂ diminuiscono.

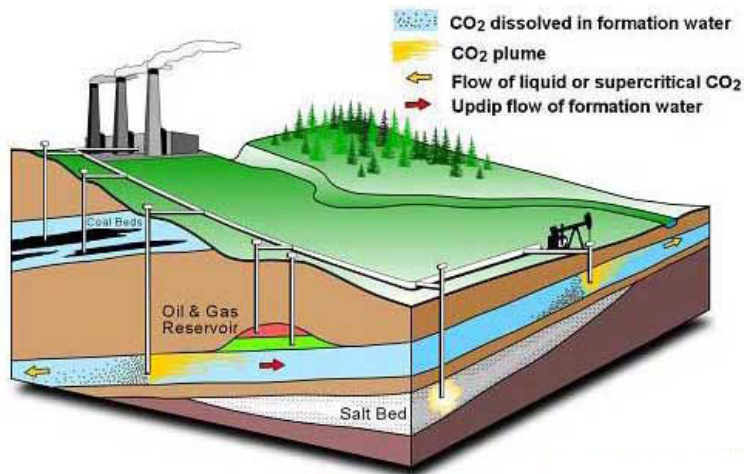


Figura 17. Schemi di sequestro geologico della CO₂

E' importante il controllo e il monitoraggio di temperatura e pressione durante processi di adsorbimento, per cui la capacità di stoccaggio della CO₂ può variare di molto da caso a caso. Di regola, comunque, si deve iniettare da 1 a 5 metri cubi di CO₂ per ottenere 1 m³ di metano.

Tabella 1. Capacità a livello mondiale delle varie opzioni per il confinamento della CO₂ (fonte: IEA-GHG, 2004)

Opzione	Capacità di immagazzinamento [Gt]
Falde acquifere saline profonde	400 - 10.000
Giacimenti già sfruttati di petrolio e di gas	930
Depositi di carbone	30
Emissioni mondiali di CO₂	25 Gt di CO₂ all'anno

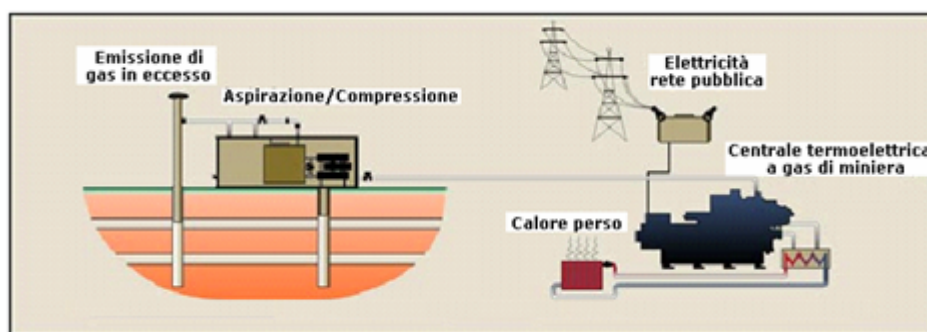


Figura 18. Schema del concetto ECBC

3.2 Costi della cattura, trasporto e confinamento geologico della CO₂

Catturare la CO₂ nelle centrali elettriche comporta un consumo di energia extra, e quindi un aumento dei costi di produzione dell'elettricità. Tale aumento dipende dal tipo di centrale elettrica (a carbone o a gas) e dai costi del combustibile.

Vari studi, tra i quali quello del programma Greenhouse Gas R&D dell'Agenzia Internazionale per l'Energia, hanno indicato che la cattura di CO₂ aumenta i costi dell'elettricità da 1,3 a 3 centesimi di Euro per kWh. Un diverso modo per esprimere questi costi è di riferirli alla quantità di CO₂ di cui si evita il rilascio nell'atmosfera. Attualmente la cattura di CO₂ ha un costo tra i 25 e i 60 €/t di CO₂ "evitata". Con il procedere delle ricerche ci si attende di dimezzare tali costi.

● **Le spese di trasporto** : sono relativamente modeste: trasportare in condotte la CO₂ per circa 100 km viene oggi a costare da 1 a 4 €/t di CO₂ "evitata".

● **I costi di confinamento** : della CO₂ dipendono fortemente dal tipo di serbatoio naturale in cui essa viene iniettata. In falde acquifere saline profonde o in giacimenti sfruttati di petrolio e di gas, i costi variano da 10 a 20 €/t di CO₂.

Se, grazie alla sua re-iniezione, si recupera petrolio o gas residuo, i costi possono risultare meno di 0 €/t . In altre parole, i benefici economici superano i costi, rendendo questa operazione conveniente.

3.3 Rischi della cattura e del confinamento della CO₂

Come per tutte le tecnologie, anche nella cattura e nel confinamento geologico della CO₂ esistono dei rischi. La domanda che dobbiamo porci è: (a) se tali rischi sono accettabili e (b) se essi sono comparabili con quelli dei sistemi alternativi per la riduzione della CO₂.

I rischi principali sono connessi al trasporto ed al confinamento della CO₂: ogni sito di confinamento dovrà essere scelto lontano da aree a rischio sismico per assicurare che le formazioni geologiche siano stabili.

Negli U.S.A. esiste una estesa rete di condotte di CO₂ (3.100 km). La statistica degli incidenti per tale rete indica dieci eventi dal 1990 al 2001 senza alcuna conseguenza per le persone. Sebbene, in linea di principio, un incidente possa avvenire quando la CO₂ viene trasportata in larga quantità, le conseguenze possono essere ridotte al minimo mediante misure di controllo e sicurezza ed il rischio di incidenti non è maggiore di quello nelle condotte di gas naturale, presenti in molti paesi europei.

Inoltre, non essendo la CO₂ esplosiva o infiammabile, come lo è il gas naturale, le conseguenze in caso di eventuali perdite sono da attendersi inferiori rispetto a quelle di gas naturale.

Il rischio principale correlato con il confinamento può manifestarsi con l'iniezione della CO₂ in un pozzo difettoso, con conseguente fuga di CO₂ verso la superficie. Le probabilità di una simile fuoriuscita della CO₂ immagazzinata in un serbatoio naturale sotterraneo è estremamente ridotta e paragonabile alla fuga di gas naturale da un pozzo, evento peraltro piuttosto raro.

Molti istituti nel mondo sono attualmente impegnati in ricerche sui seguenti argomenti correlati ai rischi:

- studio dettagliato dei processi fisici e chimici nei serbatoi naturali;
- procedure di selezione dei siti per il sequestro, inclusa l'analisi dell'attività sismica (terremoti);
- strumenti e metodi per prevedere il comportamento della CO₂ a lungo termine;
- tecniche di monitoraggio e di controllo;
- metodi di valutazione e procedure di gestione del rischio;

- procedure ottimizzate e normative di sicurezza;
- integrità dei pozzi.

3.4. Sicurezza ambientale

Nei giacimenti di gas il metano è stato conservato per centinaia di migliaia e anche milioni di anni senza esser immesso in atmosfera, pur trattandosi di un gas volatile che non interagisce con le formazioni geologiche in cui si trova e che per sua natura tende a migrare verso la superficie. È proprio per questo motivo che noi possiamo estrarlo ed utilizzarlo per usi domestici e industriali.

Tanto più, dunque, se negli stessi giacimenti ove si trovava il gas viene iniettata CO₂ si è praticamente certi che questa rimanga “intrappolata” per centinaia di migliaia e anche milioni di anni. La CO₂ infatti è più pesante dell’aria e la presenza di una roccia di copertura impermeabile (come quelle che caratterizzano i giacimenti di idrocarburi) sarebbe di per sé sufficiente a garantirne il sequestro definitivo.

Ma è la natura stessa della CO₂ (che è geochimicamente reattiva) a garantire tempi geologici di sequestro, e non solo nei giacimenti esauriti di idrocarburi, ma soprattutto negli acquiferi salini, che sono formazioni rocciose, porose e permeabili ai fluidi, di gran lunga più vaste e più diffuse dei giacimenti di idrocarburi.

Oltre gli 800 metri di profondità, infatti, (questa la profondità minima ipotizzata per lo stoccaggio geologico) la CO₂ acquista la densità di un liquido e, oltre a poter essere intrappolata da forze capillari negli interstizi della formazione rocciosa, reagisce con l’acqua e con i minerali presenti solubilizzandosi e trasformandosi, con il tempo, prima in bicarbonati in soluzione e poi in nuova roccia.

I geologi lo assicurano, ciò non modificherebbe le condizioni chimico fisiche in profondità perchè quelle stesse sostanze sono del tutto comuni nelle viscere della terra, dove trovano naturalmente dimora depositi di anidride carbonica e altri gas, oltre a composti a base di zolfo e azoto che col tempo vanno a formare le rocce.

4. APPROFONDIMENTI SULLE TECNICHE DI STOCCAGGIO DELLA CO₂ NEGLI STRATI PROFONDI DI CARBONE

4.1 Obiettivi

Sulla base di informazioni già raccolte, si individua l’area più idonea alla applicazione delle tecniche EBCM e si procede a definire le fasi principali di realizzazione di un progetto di ricerca sperimentale per l’applicazione di tali tecniche EBCM.

Visto il notevole risvolto che ha dal punto di vista ambientale, nel rispetto degli accordi internazionali mirati alla riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera, quali CO₂, e recupero e riutilizzo di metano CH₄ e allo sviluppo sostenibile, questa tecnologia verrà sicuramente sviluppata e diffusa in tutto il mondo.

4.2 Criteri di selezione dei siti

L'esperienza sino ad ora maturata nello sviluppo delle tecnologie di confinamento geologico della CO₂ suggerisce alcuni criteri per la selezione di un sito ambientalmente sostenibile ed economicamente conveniente, per l'applicazione delle tecniche CO₂-ECBM. In primo luogo il sito deve avere per quanto possibile le seguenti caratteristiche:

- omogeneità ed isolamento: il confinamento di carbone negli strati profondi del giacimento dovrebbe essere lateralmente continuo e stratigraficamente isolato, al fine di consentire il contenimento della CO₂ iniettata e di ottenere una efficiente distribuzione laterale del gas iniettato attraverso lo strato;
- Confinamento: i letti di carbone dovrebbero essere delimitati strati di rocce impermeabili;
- Struttura semplice: gli strati di carbone dovrebbero avere il minimo numero di faglie e pieghe, o comunque minori complicazioni della struttura geologica; faglie ancora attive e fratturazioni possono essere causa di migrazione di CO₂, sebbene i processi di diffusione e di convezione dei fluidi dal sottosuolo profondo verso la superficie siano molto lenti (in alcuni casi le faglie possono favorire lo stoccaggio di gas serra in quanto possono avere un effetto di compartimentazione dalle pareti ai letti di carbone profondi);
- Adeguata permeabilità primaria (interna al carbone stesso) e secondaria (dei clivaggi e delle microdiscontinuità) una moderata "cleat permeability" (permeabilità particellare) è necessaria per ottenere una effettiva produzione ECBM (1-5 mDarcy); permeabilità minori possono essere accettabili se il carbone ha una adeguata iniettabilità e spessore;
- Geometria del carbone: pochi e spessi letti di carbone sono preferibili a letti di carbone stratigraficamente dispersi e multipli;
- Condizioni di saturazione del GIP (gas in place): per un migliore rendimento nella estrazione di CH₄ con tecniche CO₂-ECBM, i carboni saturi con CH₄ sono preferibili a carboni sottosaturi.

4.3 Caratteristiche del carbone

Il carbone fossile è noto come combustibile fino dall'antichità, ed ha avuto il suo sviluppo come fonte primaria di energia in occasione della rivoluzione industriale. Esso è una vera e propria roccia sedimentaria ed è costituita dai resti di accumuli vegetali, modificati e diagenizzati dalle pressioni e temperature che si trovano in profondità nella crosta terrestre, attraverso una progressiva eliminazione, di componenti come idrogeno e ossigeno.

Conseguentemente si genera arricchimento indiretto di carbonio, che porta la roccia sedimentaria a raggiungere diversi livelli litologici a seconda della percentuale di carbonio presente.

Le zone più favorevoli per la formazione di depositi organici vegetali sono le pianure costiere, le lagune, gli acquitrini delle alte latitudini. In Russia, Canada, Nord Europa il clima freddo rallenta la decomposizione, ma anche in regioni calde umide si possono trovare giacimenti nati per la notevole presenza di vegetali.

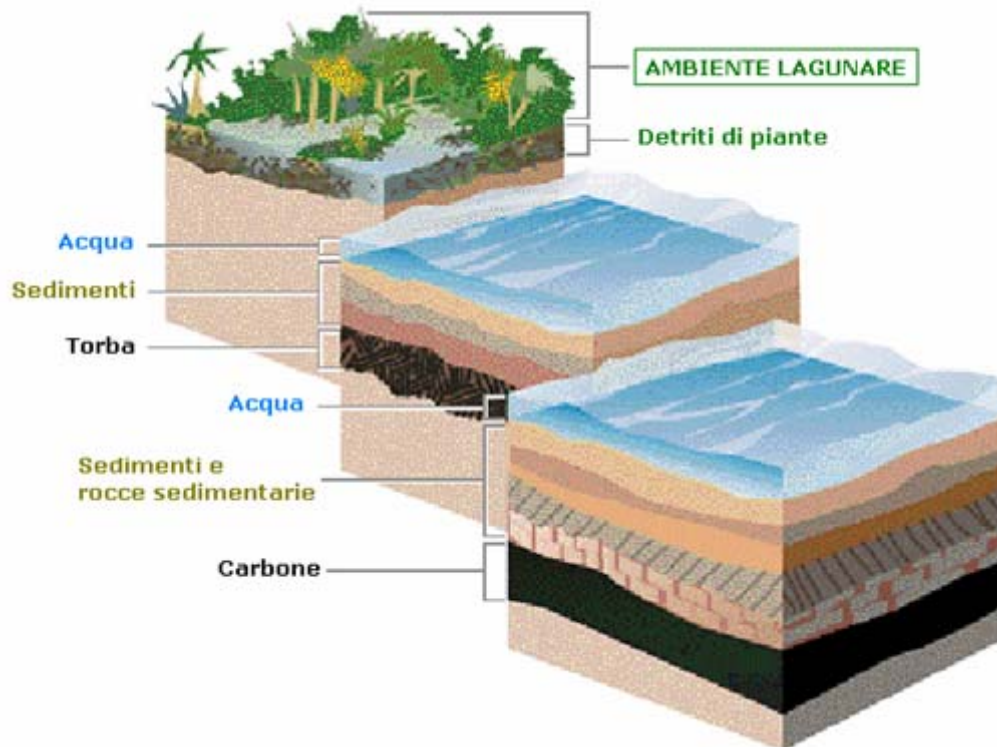


Figura 19. Schema genetico del carbone

Quando questi accumuli vengono sepolti, inizia la fase di formazione del carbone che inizialmente sarà un fitto intreccio di resti vegetali chiamato torba dove le condizioni anaerobiche dell'ambiente impediscono l'ossidazione e la decomposizione batterica. La torba così composta ha un periodo di trasformazione di circa 80 milioni di anni.

Con l'aumentare della profondità aumenta anche la temperatura e il materiale organico subisce una maturazione, cioè una eliminazione graduale dei componenti, aumentando sempre più la quantità di carbonio passando dalle torbe alle ligniti, ai litantraci fino alle antraciti dove il contenuto di carbonio raggiunge il 95% e quindi il suo potere calorifico è molto più alto; è per questo che le antraciti sono il tipo di carbone più pregiato.

Le ligniti possono presentare in alcuni casi ancora la struttura del legno da cui hanno avuto origine, e il periodo di trasformazione è di circa 80 milioni di anni. Il litantrace ha periodi di formazione di circa 250 anni, mentre l'antracite risale a 400 milioni di anni, durante il quale la raffinazione del carbone diventa via via più spinta. Se il materiale subisce una ulteriore eliminazione delle particelle rimarrà solo carbonio puro che dà vita alla grafite che non trova un impiego come combustibile.

Nel caso che movimenti tettonici riportino il materiale in superficie il processo di maturazione del carbone si arresta immediatamente e il materiale inizia a degradarsi. Questo rappresenta infatti un problema nelle cave a cielo aperto o in miniere a bassa profondità.

Dal punto di vista dell'utilizzatore interessa evidenziare i seguenti aspetti:

- Il carbone in condizione ambiente non è normalmente auto-innescante, per cui non è spontaneamente infiammabile, né esplosivo, né particolarmente inquinante per il suolo o per l'acqua;
- Il carbone fa parte delle sostanze sicure per il trasporto via mare, come sancito nel 1997 dalla International Maritime Organization, al contrario di gas e petrolio. La sua elevata

sicurezza fa sì che il 99,4% del carbone importato in Italia arrivi via mare, e qualora del carbone venisse riversato in mare, non si potrebbe parlare di disastro ecologico come invece è più volte capitato per il petrolio e i suoi derivati;

- Il carbone può essere facilmente stoccato, manipolato a terra, e trattato con basso rischio;
- Il carbone è distribuito in riserve esistenti in più di 100 Paesi, sufficienti al bisogno energetico dell'umanità per oltre 250 anni, contrariamente al petrolio e al gas, i cui giacimenti sono distribuiti in pochi paesi e le cui riserve basteranno per meno di mezzo secolo;
- Il carbone, presente in grandi quantità nel pianeta, non si presta facilmente alle manovre speculative alle quali invece sono soggetti petrolio e gas, che ne fanno variare il prezzo nei mercati in maniera spesso incontrollata.

Nell'ultimo anno, nel mondo, sono stati effettuati oltre 5.000 miliardi di euro di investimenti per l'adeguamento ambientale delle centrali a carbone. Questo processo ha portato la produzione di energia elettrica da carbone in Italia a standard di eccellenza ambientale, con un rendimento del 39% rispetto al 35% della media europea ed al 25% dell'Europa continentale. Gli ultimi studi dell'Agenzia internazionale dell'energia prevedono nel 2020 un rendimento medio europeo del 40%: si può dire che le centrali italiane hanno raggiunto questo obiettivo con ben 20 anni di anticipo.

4.4 Stima della capacità di stoccaggio della CO₂ nei bacini carboniferi

Il carbone ha una notevole capacità di immagazzinare gas per adsorbimento nella superficie e nelle sue cavità porose. La capacità di stoccaggio è direttamente proporzionale alla pressione dei pori.

Tuttavia non è semplice stimare la reale quantità di immagazzinamento, anche se esistono diverse teorie a tal proposito che propongono cifre dell'ordine di 10 gigatonnellate. C'è da sottolineare che sono stati presi in considerazione soltanto i siti contenenti metano CH₄, poiché tenendo conto di tutte le possibili riserve, l'indice della potenziale capacità di stoccaggio di CO₂ dovrebbe essere molto maggiore (fino ad arrivare a picchi di 37.8 Gt).

Secondo alcuni studiosi negli Stati Uniti, paese che sembra essere molto predisposto per accogliere tali progetti, un giacimento può immagazzinare fino a 0.06 tonnellate di CO₂ per tonnellata di carbone a 5 MPa di pressione, in condizioni ideali e utilizzando tutte le riserve.

Il volume disponibile per il sequestro, ma anche per determinare quale sia la frazione di stoccaggio disponibile che sarà occupata dalla CO₂, dipenderà fortemente dall'eterogeneità, dall'interazione delle forze viscoso e gravitazionale e da altri fattori.

4.5 Stima della produzione di metano

Sulla base delle ipotesi, due moli di biossido di carbonio vengono assorbite dal carbone per ogni mole di CH₄ disimpegnata. Tuttavia le stime sono molto complicate dovute alla difficoltà di ottenere campioni di carbone che non hanno perso ogni traccia di CH₄ durante il processo di campionamento, nonché complicazioni di laboratorio per la determinazione del gas dovute al fatto di poter esserci matrici carbone durante l'analisi.

Altri fattori che possono influire durante l'analisi di laboratorio sono la dimensione delle particelle, il contenuto di umidità, la pressione, la composizione, e il grado di stabilità o maturazione.

Alcune formazioni di carbone sono caratterizzate da un alto grado di salinità, che può dare un impatto significativo riguardo la solubilità della CO₂. La solubilità diminuisce di tre o quattro volte quando la concentrazione di CaCl₂ aumenta da zero a 30.

La dissoluzione della CO₂ nel carbone in acqua è importante, perché può portare ad un incremento di acidità dell'acqua. La questione è stata affrontata teorie sperimentali che coprono una vasta gamma di temperature e pressioni.

4.6. Il concetto ECBM

ECBM è l'acronimo di Enhanced Coal Bed Methane, cioè la tecnologia che prevede il recupero del metano dai giacimenti di carbone in sottosuolo. La prima tecnologia di questo tipo utilizzata in campo minerario (CBM) prevedeva esclusivamente il recupero del metano per depressione attraverso dei pozzi realizzati dalla superficie.

Il sistema avanzato ha una efficienza superiore in quanto oltre ai pozzi di estrazione in aspirazione sono previsti pozzi di iniezione di CO₂. La CO₂, iniettata nel letto di carbone, si adsorbe preferenzialmente sulla matrice del carbone spostando il metano presente. Il metano liberato diffonde poi nel sistema dei clivaggi, e migra fino ai pozzi di produzione.

4.6.1. Configurazione dell'impianto ECBM

Per definire la configurazione dell'impianto sperimentale ci si è basati sulla disposizione di impianti già esistenti. Una volta che è stata decisa l'ubicazione del test site si passerà allo sviluppo del progetto che nel caso più semplice consiste nella realizzazione di un pozzo di iniezione e di uno di estrazione rispettivamente di CO₂ e CH₄. La CO₂ prodotta dagli impianti di potenza individuati nell'area viene compressa e può essere trasportata nel sito ECBM_test site mediante una tubazione dedicata (CO₂-dotto) o trasportata mediante camion ed infine stoccata in appositi serbatoi in prossimità dell'impianto pilota.

In entrambi i casi la CO₂ si presenta allo stato criogenico (T = 27°C e P = 12-15 bar) e, prima dell'iniezione dovrà passare attraverso un impianto di trattamento.

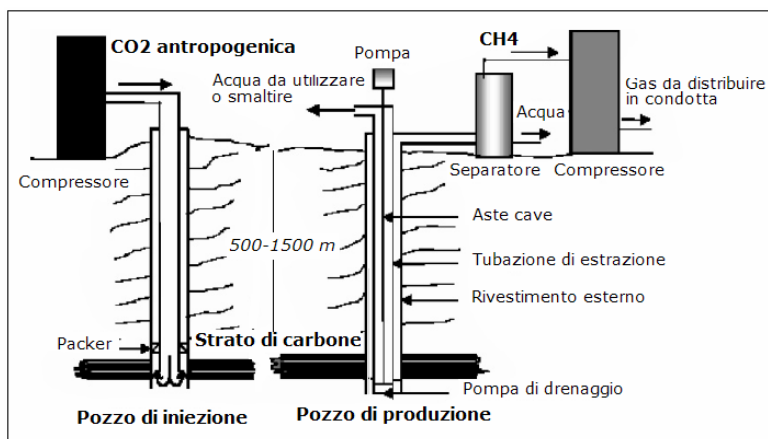


Figura 20. Schema tipico di un impianto ECBM

L'impianto è costituito da un' unità di pompaggio per l' iniezione della CO₂ da un riscaldatore e dai sistemi di regolazione e controllo della pressione nonché dei sistemi di sicurezza contro le sovrappressioni.

I sistemi presenti in questa configurazione consentono di garantire le condizioni di pressione e temperature necessarie al processo di iniezione e consentire una condizione supercritica della CO₂ all'interno del reservoir.

Tali condizioni sono monitorate da un apposito pannello di controllo. In particolare il riscaldatore consente di aumentare la temperatura della CO₂ criogenica al di sopra di 10°C per evitare situazioni di stress all' interno del pozzo di iniezione, dovuti a fenomeni di contrazione e dilatazione delle tubazioni.

4.6.2. Applicazioni nel mondo

L'ECBM è una tecnologia in fase di continuo studio, perfezionamento ed evoluzione, e in paesi come Canada, Australia e Stati Uniti è già utilizzata con successo. In Europa le applicazioni sono attualmente molto limitate, e riferite ad alcuni impianti pilota installati soprattutto nel Nord.

Tabella 2. Principali risorse mondiali note di metano estraibile da giacimenti di carbone (White et al, 2005)

country	CBM Resources (Tcf)	
	in-place	recoverable
Russia	550–1550	N/A
China	350–1150	70
United States	500–1730	150
Australia	310–410	60
Canada	570–2280	140
Indonesia	210	30
Western Europe	120	N/A
Southern Africa ^b	100	20
India	90+	20
Poland/Czech Republic	70	N/A
Turkey ^b	50	10
Ukraine	50	N/A
Kazakhstan ^b	40	10
total	3010–7840	510

Un importante impianto che tratta significative quantità di CO₂ si trova in Polonia, ed è stato realizzato grazie ad una partnership di diversi investitori privati e finanziamenti comunitari.

Visto il notevole risvolto che ha dal punto di vista ambientale, nel rispetto degli accordi internazionali mirati alla riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera e allo sviluppo sostenibile, questa tecnologia verrà sicuramente sviluppata e diffusa in tutto il mondo.

4.6.3. Aspetti importanti

I maggiori aspetti che interessano le tecniche dello sviluppo degli impianti EBCM sono i fenomeni di desorbimento che trovano origine da un aumento della temperatura una diminuzione della pressione al suo interno. Per questo motivo è importante avere una

conoscenza approfondita dei movimenti tettonici di sollevamento a livello regionale che hanno interessato il bacino carbonifero nel suo passato geologico.

Gli aspetti di maggiore interesse che dovranno essere considerati sono:

- lo stadio geologico in cui i letti di carbone hanno intrappolato i fluidi e i gas nella loro posizione attuale
- l'estensione areale dei fluidi intrappolati e la susseguente infiltrazione di acque sotterranee la ricerca dell'elemento che influisce sulla pressione idrostatica nonché la quantità e la velocità dell'adsorbimento-desorbimento della CO₂ e del CH₄.

5. PROPRIETA' CHIMICO FISICHE DEL CARBONE

Il carbone è una miscela di materie inorganiche minerali e materiale organico in una complessa rete tridimensionale che può cambiare durante i processi di adsorbimento e desorbimento complicando le cose notevolmente.

La capacità di trasporto CO₂ attraverso lo strato di carbone dipende sia dalla permeabilità dello stesso, i cui flussi sono regolati dal flusso di Darcy e dalla diffusione di Fick. Ancora, il tenore di umidità può influire sulla capacità e sul tasso di CO₂ adsorbito e di CH₄ desorbito.

La capacità di contenimento della CO₂ nel carbone è legato non solo alle proprietà di carbone, ma anche alla conservazione in situ e al rapporto tra pressione e temperatura, il quale è generalmente espresso con le isoterme di adsorbimento.

5.1 Proprietà degli strati di carbone: valutazione relativa alla potenzialità di acquisizione della CO₂

Molte proprietà del carbone sono importanti ai fini dell'adsorbimento/desorbimento di gas. Il problema è reso complicato dal fatto che il carbone grezzo è composto da una varietà di minerali inorganici e da materiali di origine organica disposti nello spazio tridimensionale secondo uno "stile" diverso a seconda della genesi del giacimento e delle successive vicissitudini geologiche. Tali caratteristiche possono inoltre modificarsi durante lo stesso processo di adsorbimento/desorbimento.

La mobilità della CO₂ attraverso lo strato di carbone dipende sia dalla permeabilità in grande dello strato stesso (flusso secondo Darcy) sia dalla permeabilità intrinseca della matrice carboniosa (diffusione secondo Fick).

La potenzialità di stoccaggio e il tasso di assunzione della CO₂ da parte del carbone sono anche influenzati da altre proprietà del carbone quali il rango, la composizione macerale, e il contenuto di umidità.

La capacità di ritenzione della CO₂ è inoltre determinata non solo dalle proprietà intrinseche del carbone, ma anche dalla pressione e dalla temperatura in situ. Il relativo legame funzionale è rappresentato dalle isoterme di adsorbimento.

Ai fini dell'applicabilità della tecnologia ECBM il carbone deve presentare alcuni requisiti sui quali si discuterà nel seguito in modo sintetico.

5.1.1. *Potere calorifico*

Il potere calorifico del carbone dipende dallo stadio di sviluppo del processo di carbonizzazione della sostanza organica originaria e dal contenuto di materie minerali e dell'umidità.

Calcolato sulla sostanza secca e priva di ceneri il potere calorifico medio DAF per le diverse categorie di combustibili è riportato nella tabella 3 seguente in raffronto con quello di altri combustibili fossili di impiego corrente per la produzione di energia.

Il potere calorifico non ha una diretta influenza sui fenomeni che avvengono durante il processo di iniezione della CO₂ e di spiazzamento del metano ma esso contribuisce a completare le conoscenze sulle caratteristiche del carbone e in particolare sul rango e sulle proprietà ad esso collegate.

Tabella 3. *Potere calorifico dei principali combustibili fossili*

Combustibili solidi	Potere calorifico inferiore [kcal/kg]
Carbone Sulcis (Carbone sub-bituminoso)	5.000
Carbone (Antracite)	8.000
Carbone (Litantrace)	7.300
Lignite	4.500
Torba	4.000
Carbone di legna	8.000
Biocombustibile	6.120
Legna umida (40%)	2.300
Legna asciutta (15%)	3.490
Altri Combustibili	Potere calorifico inferiore [kcal/-]
Metano [m3]	8.500
Gasolio [l]	10.000
GPL [m3]	9.000 c
Energia elettrica [kWh]	860

5.1.2. *Densità*

La misura della densità del carbone è particolarmente importante nella stima della quantità di CO₂ immagazzinabile perché in base ad essa si determina il volume dei vuoti.

Tuttavia la misura di una proprietà così semplice per la maggior parte delle sostanze solide riesce spesso difficile e incerta nel caso del carbone e risente della tecnica di determinazione adottata.

D'altro canto una misura affidabile e sufficientemente precisa della densità è necessaria e particolarmente importante per la definizione delle isoterme e per il calcolo delle quantità specifiche di CO₂ che possono essere immagazzinate negli strati di carbone.

Possono essere determinati tre diversi tipi di densità per il carbone riferite al materiale privo di umidità e di materie minerali: la densità reale (che prende in considerazione solo il volume della frazione solida priva di pori), la densità particellare (massa dell'unità di volume del solido inclusi pori e microfratture) e la densità apparente (che prende in considerazione il volume totale del terreno, compresi quindi tutti gli spazi vuoti).

La densità reale viene misurata attraverso il dislocamento di un gas con bassa tendenza ad adsorbirsi sulla superficie. In genere viene usato l'elio che non penetra nei pori del carbone di dimensioni $< 4,2 \text{ \AA}$ a temperatura ambiente.

La densità reale può essere correlata al rango del carbone e in particolare al contenuto di C come indicato in figura 21.

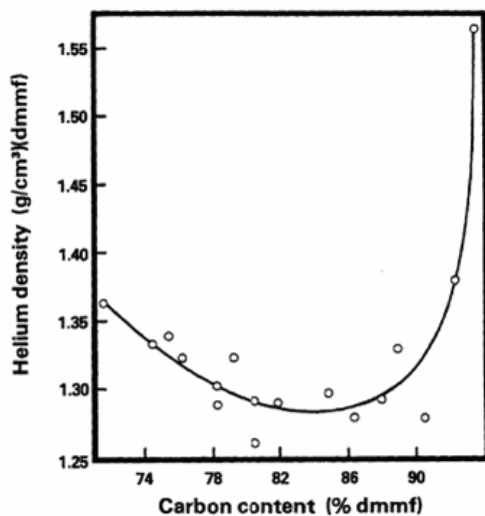


Figura 21. Variazione della densità con elio dei carboni in funzione del contenuto di C (Mahajan e Meyers, 1982)

La densità particellare è in genere misurata attraverso l'analisi porosimetrica usando mercurio che viene forzato a penetrare i pori di dimensione decrescente, supposti di forma cilindrica, aumentando la pressione.

La densità particellare è determinata in corrispondenza della pressione minima alla quale il mercurio riempie solo gli spazi tra le particelle di campione macinato, senza penetrare nei pori interni del carbone.

La densità apparente è determinata con metodi picnometrici usando solventi organici.

5.1.3. Superficie specifica

La superficie specifica del carbone, strettamente legata alla porosità e soprattutto alla porosimetria, che descrive la tipologia e la distribuzione statistica delle dimensioni medie dei pori, è di importanza determinante poiché essa fornisce i "siti" per l'adsorbimento della CO_2

Essa si misura attraverso esperimenti di adsorbimento di gas quali azoto o anidride carbonica. Recentemente si è deciso di scegliere la CO_2 per la definizione del metodo standard di misura.

Si osserva che il metodo con la CO_2 fornisce valori più elevati della superficie specifica del carbone, rispetto ad altri adsorbenti, per effetto della sua forte capacità di imbibizione.

La superficie specifica dei carboni varia tipicamente tra 110 e 425 m²/g e non sembra ci sia un'evidente correlazione con il contenuto di C come si evince dal diagramma di figura 22.

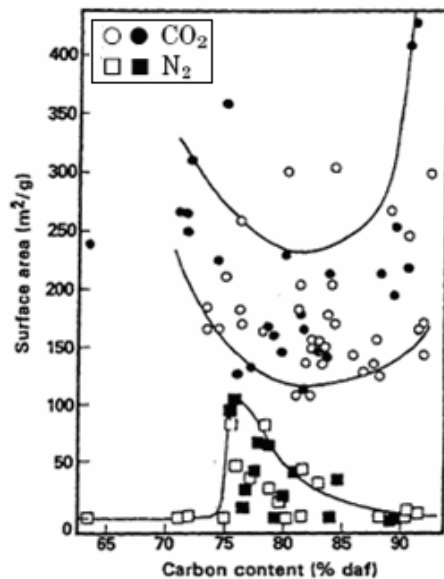


Figura 22. Variazione della superficie specifica dei carboni in funzione del contenuto di C su campioni daf (dry ash-free) con il metodo di adsorbimento di anidride carbonica o azoto (Mahajan, 1989)

5.1.4. Porosità

Il carbone è altamente poroso. I pori variano per dimensione dall'ordine del micrometro all'Angström, classificati in quattro gruppi: macropori (>500 Å), mesopori (20-500 Å), micropori (8-20 Å), e submicropori (<8 Å).

Uno strato di carbone è composto da fratture ravvicinate che si sono formate durante il processo di carbonizzazione. La loro spaziatura può variare da qualche millimetro a diversi centimetri. Le discontinuità sono interconnesse e si ramificano in una rete spaziale nella quale i gas attraversano e la matrice organica del carbone nella quale si stabilizzano (iniezione di CO₂) o dalla quale vengono rimossi (estrazione di metano).

Di conseguenza uno dei fattori che influiscono sulla migrazione del gas attraverso la matrice carboniosa è il numero totale di fessure per unità di volume e il loro grado di connessione.

Il volume totale di pori aperti nel carbone per unità di massa può essere calcolata attraverso la formula: $V_p = 1/\rho_{Hg} - 1/\rho_{He}$, essendo ρ_{Hg} e ρ_{He} le densità misurate con mercurio o con elio, rispettivamente.

5.1.5. Diffusività, permeabilità

Si può distinguere tra permeabilità intrinseca del carbone, che dipende essenzialmente dalla natura della sostanza organica, e la permeabilità dello strato di carbone, usata per descrivere il trasporto di gas attraverso il sistema di fratture presenti nel giacimento.

E' evidente che il successo di un'operazione di sequestro geologico della CO₂ in strati di carbone dipende dalla capacità del carbone di consentire una buona mobilità della CO₂ attraverso gli spazi liberi intercomunicanti.

Lo stesso vale per la produzione di metano secondo la tecnologia ECBM, anche se i due gas seguono un cammino diverso: dal pozzo di iniezione all'interno del giacimento carbonifero la CO₂ e da questo al pozzo di estrazione per il CH₄ a seguito di un processo di desorbimento, diffusione attraverso i clivaggi e trasporto attraverso il sistema di fratture.

A seconda del bilancio tra la quantità di gas desorbito e quella che può essere trasferita attraverso i clivaggi del carbone, il flusso è controllato dalla pressione (secondo la legge di Darcy) se prevale la prima, ovvero dalla diffusione (secondo il modello di Frick) se prevale la seconda. In pratica si può ammettere che l'estrazione del metano avviene con una combinazione delle due modalità di flusso.

Durante le prove di estrazione di metano attraverso pozzi si è generalmente osservata una rapida e considerevole diminuzione della permeabilità dello strato (fino a 5 volte) a seguito di un rilascio di pressione. Questo non succede se si applicano le tecniche ECBM o si iniettano gas in pressione come l'azoto.

Considerazioni teoriche corroborate da evidenze sperimentali portano infatti a concludere che:

- (1) le misure di permeabilità sono tendenzialmente molto sensibili alla pressione idrostatica di confinamento.
- (2) un aumento della pressione di confinamento può causare una diminuzione della permeabilità anche di 3 ordini di grandezza;
- (3) la permeabilità decresce esponenzialmente in funzione della tensione di compressione alla quale il carbone è sottoposto;
- (4) ripetute le prove sullo stesso campione in funzione di cicli di stress hanno mostrato come la permeabilità è sensibile all'evoluzione "storica" delle tensioni.

In altre esperienze si è riscontrato che in caso di mancato desorbimento del metano la permeabilità non subisce variazioni; al contrario se la pressione diminuisce a seguito del desorbimento la permeabilità aumenta considerevolmente. Questo fatto è dimostrato dall'andamento delle curve di figura 23.

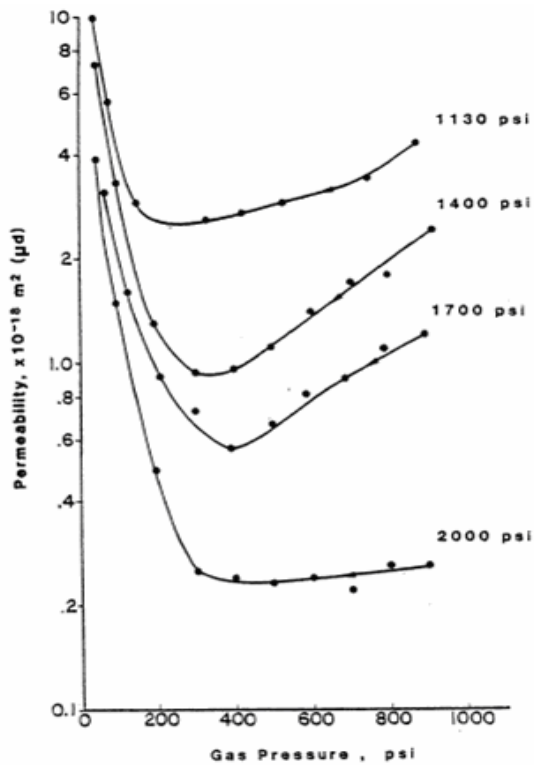


Figura 23. Andamento della permeabilità in funzione della pressione per diversi livelli di stress (Harpalani e Zhao, 1989)

Alle variazioni di permeabilità in funzione della pressione del gas corrispondono variazioni del volume di gas che resta adsorbito nel carbone come mostrato nel diagramma di figura 24.

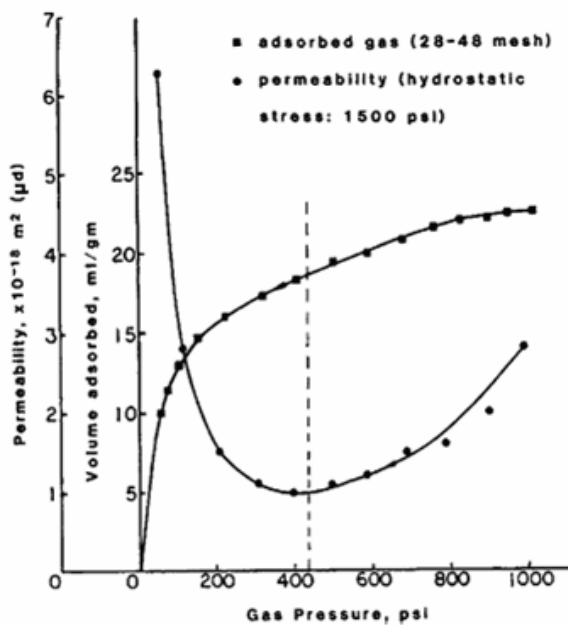


Figura 24. Andamento della permeabilità in funzione della pressione per diversi livelli di stress (Harpalani e Schraufnagel, 1990)

5.1.6. Il meccanismo di trasporto

Il trasporto del gas attraverso lo strato di carbone contenente generalmente acqua avviene secondo un processo nel quale si possono individuare due stadi.

- 1- A seguito della riduzione di pressione dovuta alla rimozione dell'acqua che riempie gli spazi liberi nel carbone, il gas è desorbito e migra attraverso la microporosità della matrice carboniosa secondo un modello dominato dalla diffusione
- 2- Una volta raggiunto il sistema di clivaggi il gas si muove verso il pozzo di estrazione insieme all'acqua e alle sostanze in essa disciolte. Il flusso è di tipo laminare dominato dalla legge di Darcy.

Il regime di trasporto dipende anche dalla distanza tra la zona di desorbimento e il pozzo di estrazione: se la "distanza di richiamo" (raggio di influenza del drenaggio) aumenta, il regime del flusso si sposterà progressivamente passando dal modello controllato dalla diffusione a quello dominato dal modello di Darcy nel quale diventa importante la permeabilità dello strato determinata dall'intensità dei clivaggi.

La produzione di gas comporta una iniziale riduzione di pressione per attivare il flusso a seguito della rimozione dell'acqua interstiziale intrappolata nel sistema dei clivaggi.

Con la riduzione della pressione dovuta della rimozione acqua dal livello originario nel serbatoio al valore critico corrispondente alla pressione di saturazione, il gas è desorbito e può migrare attraverso il sistema interconnesso di micropori e in seguito convogliato nelle tubazioni di drenaggio.

5.1.7. Rango del carbone, composizione macerale e contenuto di materie minerali

Diversi studi hanno dimostrato che la permeabilità e la porosità sono correlate al rango del carbone: tipicamente i carboni di alto rango presentano una bassa permeabilità. Inoltre anche la capacità di adsorbimento di gas dipende dal rango.

Nei carboni di basso rango quale il Sulcis la porosità è principalmente dovuta ai macropori. L'accessibilità del sorbato alla matrice carboniosa diminuisce al crescere del rango. Tuttavia nei carboni di basso rango l'affinità all'acqua è maggiore di quella nei confronti del metano.

In molti progetti commerciali di estrazione del metano si è riscontrato che i carboni di rango intermedio presentano una buona permeabilità e un massimo contenuto di gas.

Il rango è importante anche per quanto riguarda la diffusione della CO₂ nella matrice carboniosa. I carboni marcatamente bituminosi richiedono una maggiore energia di attivazione rispetto alle antracite perché avvenga il desorbimento del sorbato.

L'umidità inerente, maggiore nei carboni giovani di basso rango, comporta una diminuzione della capacità di adsorbimento e ritenzione del metano.

Peraltro, la capacità di adsorbimento è generalmente più alta nei carboni ricchi di vitrinite, caratterizzati da alta permeabilità. Per quanto concerne la capacità di sequestro della CO₂, è stato dimostrato che le bande di vitrinite presenti nel carbone, indipendentemente dal rango, hanno una superficie specifica che può arrivare fino a 220 m²/g, molto maggiore di quella della fusinite (intorno a 35 m²/g). La capacità della sola vitrinite corrisponde quindi approssimativamente alla capacità dell'intero carbone di imbibire la CO₂.

La questione riguardante l'influenza del rango sulla capacità di immagazzinamento di gas resta ancora controversa anche per l'influenza incrociata di diversi fattori non direttamente correlabili al rango.

Infatti, nonostante si sia spesso ritenuto accettabile che le maggiori capacità competano ai carboni di rango più elevato, l'esperienza dimostra che la correlazione tra capacità di adsorbimento del metano e il rango del carbone è al più molto debole come mostra il diagramma di figura 25 che peraltro presenta un andamento conforme a quelli della densità e della superficie specifica in funzione del rango del carbone.

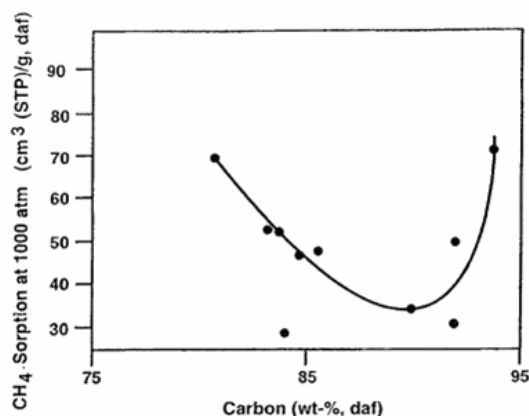


Figura 25. Cambiamento dell'accessibilità del metano ai siti di adsorbimento nella matrice del carbone in funzione del contenuto di carbonio, indice del rango (Levine, 1993)

Il contenuto di materia minerale nel giacimento di carbone (tipo e proporzione) sembra avere un effetto trascurabile sulla capacità di adsorbimento del metano.

5.1.8. Restringimento e dilatazione del carbone

Il carbone non ha una matrice rigida e solida, ma è un polimero che subisce l'azione del gas o del solvente con il quale viene a contatto. La sua matrice si restringe a contatto con l'acqua o per desorbimento degli idrocarburi e si gonfia se un gas è adsorbito sulla sua superficie e all'interno dei pori.

Spesso questo comportamento del carbone, si traduce in una certa irreversibilità del processo. E' stato ipotizzato che una contrazione di volume del 20% può essere spiegata con il collasso dei macropori con dimensione intorno a 70 Å che quindi non potranno più trattenere acqua.

Si è inoltre accertato che il fenomeno di ritiro presenta una certa anisotropia e pertanto si manifesta in modo diverso a seconda della direzione. Il ritiro è tendenzialmente maggiore nei carboni con un più elevato contenuto di umidità.

Per quanto concerne il rigonfiamento a seguito di iniezioni di CO₂, i risultati sperimentali su diversi campioni di carbone mostrano che l'entità del rigonfiamento dipende dalla pressione di iniezione della CO₂ e cresce considerevolmente per pressioni dell'ordine di alcuni MPa quali quelle che corrispondono alle pressioni litostatiche alla profondità di diverse centinaia di metri. Il rigonfiamento non è totalmente reversibile ed è pertanto sensibile a cicli alternati e ripetuti della pressione a seguito della maggiore quantità di CO₂ che resta intrappolata nei micropori.

Anche la velocità di espansione dipende dalla pressione: in un campione di lignite il raggiungimento dell'espansione di equilibrio può essere quasi istantaneo.

L'adsorbimento/desorbimento di gas influenza ovviamente anche la permeabilità dello strato. Nel corso dell'estrazione del metano la matrice del carbone subisce infatti una contrazione in funzione della temperatura e della pressione.

Questo non avviene con continuità fin dall'inizio dell'estrazione del gas e per piccoli decrementi della pressione. Alcuni esperimenti hanno infatti consentito di individuare una pressione critica al di sotto della quale il ritiro comincia a diventare significativo con conseguente incremento della permeabilità.

5.1.9. Isotherme di adsorbimento

La capacità di ritenzione del gas di uno strato di carbone può essere stimata con metodi diretti che consentono di misurare la quantità di gas rilasciata da un certo volume di carbone all'interno di un contenitore sigillato.

In alternativa o ad integrazione delle informazioni ottenibili con esperimenti diretti si può ricorrere a prove di laboratorio su campioni di carbone per la costruzione delle isoterme di adsorbimento/desorbimento.

Le isoterme di adsorbimento (quantità adsorbita in funzione della pressione a temperatura costante) possono essere ottenute con diversi metodi tra i quali i più comunemente usati sono quelli gravimetrico, monometrico (volumetrico) e cromatografico. La precisione di ciascun metodo dipende dalla accurata progettazione dell'apparecchio di misurazione e dall'attenzione riposta nel controllo delle condizioni sperimentali.

Col metodo monometrico si calcola la quantità di CO₂ adsorbito attraverso l'equazione dei gas reali in cui compare il fattore di compressione dei gas (Z) calcolata per ogni pressione di equilibrio, ottenendo una curva o isoterma di adsorbimento.

Con il metodo gravimetrico si misura l'adsorbimento osservando i cambiamenti di peso con una microbilancia.

Infine col metodo cromatografico l'isoterma di adsorbimento può essere ottenuta dalla curva di spiazzamento del gas.

Sono possibili sei diversi tipi di isoterme di adsorbimento rappresentati dai grafici di figura 26.

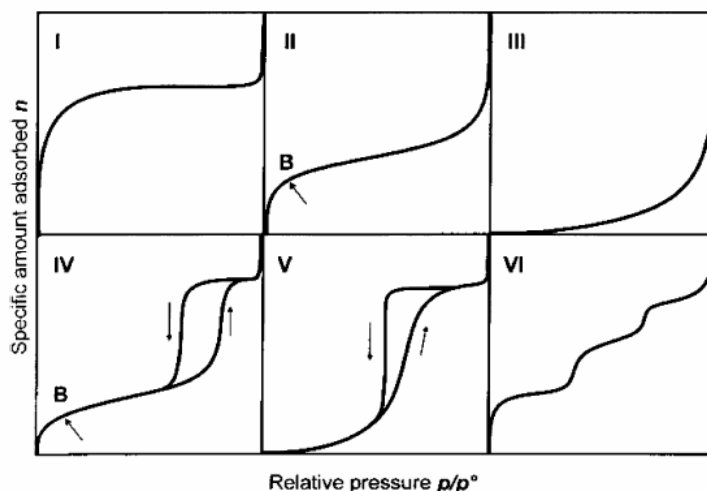


Figura 26. Tipologia di isoterme di adsorbimento (Singh et al. 1985)

La quantità di gas che può essere estratta da un campione solido dipende dalla massa del materiale, dalla temperatura, dalla pressione e dalla natura del solido e del gas.

Con riferimento alla figura 19, l'isoterma di tipo I si produce quando le molecole di adsorbato formano un monostrato su un solido non poroso o quando l'adsorbimento è dominato da un processo di riempimento dei micropori (isoterma secondo il modello di Langmuir).

L'isoterma di tipo II dalla tipica forma a S, è osservata nel caso di formazione di strati multipli di molecole per adsorbimento in macropori o sulla superficie di un materiale non poroso.

L'isoterma di tipo III si ottiene nei casi di interazioni deboli tra adsorbente e adsorbato in macropori o su materiali non porosi.

L'isoterma di tipo IV simile a quella di tipo II è tipica di un adsorbente con prevalente presenza di mesopori. Il ciclo di isteresi è collegato a fenomeni di condensazione capillare.

L'isoterma di tipo V è osservata nel caso di adsorbente non poroso o con macropori ed è simile a quella di tipo III con la sola differenza che compare un ciclo di isteresi.

Infine l'isoterma di tipo VI con andamento a scalini, pur essendo molto rara, è presentata per completezza.

Le isoterme di adsorbimento di CO₂ e metano su carbone seguono generalmente l'andamento del tipo I.

L'adsorbimento è un processo chimico-fisico complesso. Il termine implica la condensazione di gas su superfici libere mentre per designare la penetrazione di molecole di gas nella massa solida si preferisce usare il termine assorbimento (sinonimo di imbibizione).

I carboni sono capaci di adsorbimento seguito da assorbimento e possibile riorganizzazione della intricata struttura macromolecolare (figura 27).

Pertanto le misure dei parametri del fenomeno possono avere una forte componente temporale.

Nell'adsorbimento di tipo chimico l'adsorbato è connesso alla superficie solida con un legame chimico diretto, con un'energia dello stesso ordine di grandezza del calore di reazione (15-100 kcal/mol).

Nell'adsorbimento di tipo fisico agiscono forze di Vanderwaals e elettrostatiche e pertanto il legame è reversibile. Il processo è esotermico e l'energia coinvolta un ordine di grandezza minore (2-10 kcal/mol). La forza di legame tra l'adsorbato e il solido può essere stimata attraverso il punto di ebollizione.

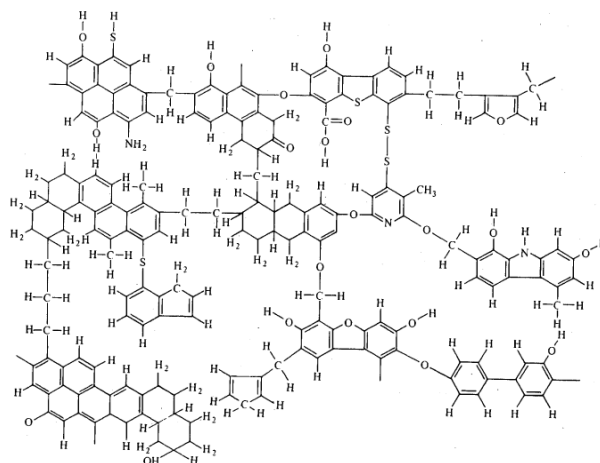


Figura 27. Tipica struttura di una macromolecola di carbone

E' verosimile che l'adsorbimento sia monostrato a bassa pressione e diventi multistrato a pressioni elevate.

L'adsorbimento è il principale meccanismo di sequestro dei gas negli strati di carbone. Esso è descrivibile per mezzo di diversi modelli matematici a seconda delle modalità di sviluppo del processo.

L'adsorbimento di CO₂ sul carbone è stato studiato da molti anni generalmente in condizioni di bassa pressione e temperatura. Le informazioni messe a disposizione dalla ricerca, pur essendo utili per le valutazioni relative al sequestro geologico, si riferiscono tuttavia a condizioni ben lontane da quelle incontrate negli strati di carbone nelle parti non coltivabili dei giacimenti, caratterizzate da alte pressioni e temperature elevate per le quali le informazioni sono ancora relativamente scarse. Carente è infatti la conoscenza sui fenomeni di assorbimento nella porosità del carbone e mancano dati quantitativi sul fenomeno di rigonfiamento.

La simulazione del processo che avviene nelle operazioni ECBM richiede la costruzione di modelli matematici affidabili capaci di descrivere il comportamento dell'anidride carbonica e del metano nel processo di adsorbimento binario. Pertanto la comprensione dei fenomeni e la conoscenza dettagliata delle isoterme della CO₂ e del CH₄ sono di importanza determinante per l'individuazione e lo sviluppo ottimale delle tecniche di sequestro della CO₂ con contestuale produzione di metano.

I risultati della simulazione consentiranno di stimare la capacità di immagazzinamento della CO₂ degli strati di carbone e di valutare l'economicità del processo, nonché di definire le condizioni operative più favorevoli.

La capacità di adsorbimento dei due gas da parte del carbone è funzione diretta della temperatura e della pressione: maggiori pressioni comportano un aumento della capacità di sequestro che invece diminuisce all'aumentare della temperatura.

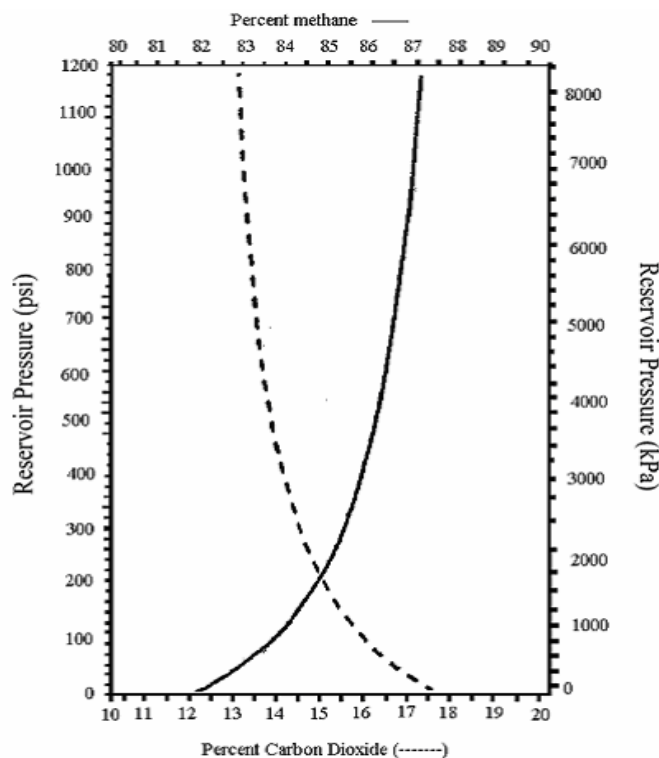


Figura 28. Variazione tipica della composizione dei gas nello strato di carbone al decrescere della pressione (Scott, 1993)

Sul tema sono state condotte diverse ricerche e proposte equazioni con conclusioni talora contraddittorie, tanto da richiedere ulteriori indagini per chiarire gli aspetti controversi del problema.

In ogni caso resta assodato che la composizione di gas presenti nello strato di carbone varia con la pressione come rappresentato dalle curve di figura 28.

La variabilità dipende dalle isoterme di desorbimento di CH_4 , CO_2 (e N_2) per il tipo di carbone che costituisce lo strato "serbatoio".

E' interessante notare che la quantità di ciascun gas adsorbito nel carbone non è proporzionale alla quantità dello stesso gas allo stato libero.

La CO_2 e gli idrocarburi più pesanti del metano sono trattenuti nel carbone con forze intermolecolari maggiori di quelle che legano CH_4 e N_2 . Al crescere della pressione le quantità adsorbite aumentano per tutti i tipi di gas. Tuttavia, a qualunque livello di pressione, più CO_2 è adsorbita nel carbone rispetto al metano e all'azoto nell'ordine, come mostrato dalle curve di figura 29.

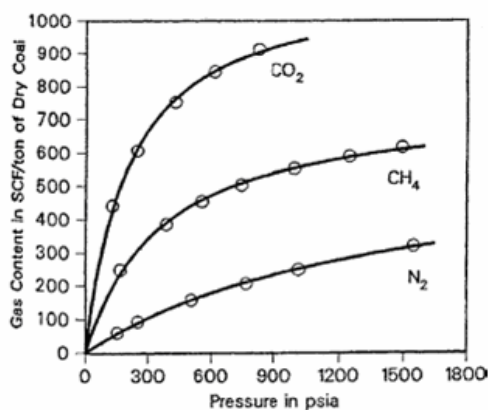


Figura 29. Adsorbimento/assorbimento di gas puri nel carbone in funzione della pressione (Yee et al.,)

Nel caso di miscele binarie o ternarie di gas è in linea di principio ipotizzabile che ci potrà essere competizione reciproca e pertanto l'adsorbimento sul carbone di ciascuno dei componenti dovrebbe essere influenzato dalla presenza e concentrazione degli altri.

Il problema è stato studiato scientificamente ricorrendo a equazioni e modelli con verifiche sperimentali. Si è tuttavia trovato che le quantità di gas adsorbiti non differivano di molto se immessi a contatto col carbone isolatamente o in miscela, segno che la competizione è scarsa e prevale sempre il gas più affine con la stessa forza di legame indipendentemente dalla presenza degli altri.

Si è potuto stabilire che il rapporto delle quantità adsorbite nel caso dei gas singoli e delle miscele ternarie si mantiene proporzionale a 4:2:1 per CO_2 , CH_4 e N_2 , rispettivamente.

La presenza dell'acqua nel carbone ha un'influenza importante nei fenomeni di adsorbimento. L'acqua può agire in diverse forme. Oltre all'acqua che fluisce liberamente attraverso le discontinuità e gli interstizi è da considerare anche l'acqua associata alle fasi organiche e inorganiche dello strato di carbone. L'acqua inorganica è principalmente dovuta all'idratazione di alcuni componenti minerali e si ritiene non abbia influenza sui fenomeni di "swelling".

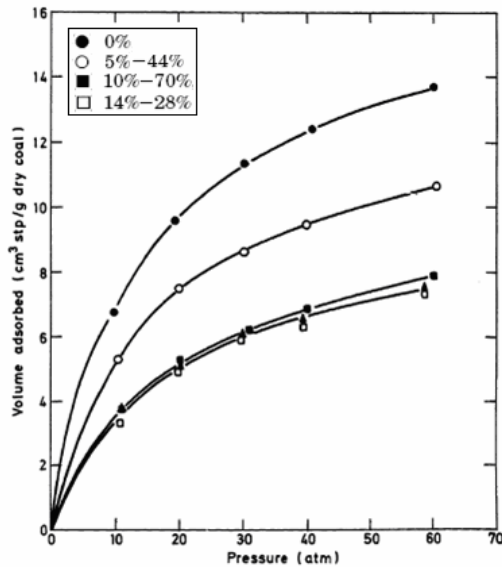


Figura 30. Influenza dell'umidità nelle isoterme di adsorbimento del metano alla temperatura di 30 °C su un carbone americano (Joubert J.I. et al.,)

L'acqua organica può congelare o meno a seconda della forma di legame con la matrice carboniosa e può influenzare più marcatamente il processo di rigonfiamento che si manifesta nel carbone. Le due forme coesistono con distribuzione continua.

Il contenuto di umidità ha un ruolo significativo nella capacità di adsorbimento del metano da parte del carbone come mostrato dalle curve di figura 30.

Molti carboni giovani di basso rango presentano una maggiore affinità con l'acqua rispetto al CH₄ e pertanto sono in generale scarsamente metaniferi. Questo potrebbe essere il caso del Sulcis (le miniere sarde sono poco "grisutose" e questo non è un fattore favorevole per il successo delle tecniche ECBM). Il contenuto di umidità del carbone influenza inoltre la quantità di CO₂ che può essere imbibita nel carbone poiché le molecole di acqua occludono i pori sottraendo volume utile per il gas.

Anche la presenza di composti di vario tipo nella matrice carboniosa (ceneri inerenti) può ridurre la capacità del carbone di accumulare e trattenere gas a causa dell'occlusione dei micropori presenti nel carbone.

I due principali fattori che controllano la quantità di CH₄ nel carbone sono rappresentati dalla pressione di confinamento, dipendente dalla profondità dello strato e la superficie specifica dei micropori. Se le condizioni di temperatura e pressione sono favorevoli, il carbone può trattenere una quantità di metano fino a 5 volte quella immagazzinabile nei normali serbatoi di gas di uguale volume.

Infine è stato dimostrato che la capacità di adsorbimento del metano decresce al crescere della temperatura oltre che del contenuto di umidità.

6. MODALITA' DI RECUPERO DEL CH₄ CON LE TECNICHE CBM E ECBM

Gli strati di carbone possono essere generalmente fratturati, saturati con acqua e moderatamente compressi. In essi la maggior parte del gas è trattenuto nella struttura dei micropori per mezzo di legami di tipo fisico.

Confrontati con i normali serbatoi di gas in rocce porose, gli strati di carbone presentano una bassa porosità efficace e un'elevata comprimibilità. La quasi totalità dei gas è adsorbito mentre solo una minima parte (< 5%) occupa le fratture o è in soluzione nell'acqua.

6.1. Procedure operative

Pertanto il gas prodotto dal carbone è il risultato di un processo di desorbimento e diffusione seguito dal flusso libero attraverso il sistema di clivaggi. L'adsorbimento fisico può essere reso reversibile con una parziale riduzione della pressione idrostatica per mezzo di un'azione di drenaggio dell'acqua presente nello strato.

All'inizio del pompaggio dell'acqua con parziale trascinamento di gas si registra una fase transitoria fino al raggiungimento della condizione di regime pseudo-stabile che corrisponde al minimo della pressione in fondo al pozzo di estrazione. A questo segue uno stadio caratterizzato da una costante diminuzione della produzione di gas e della portata di acqua, durante il quale decresce la permeabilità all'acqua mentre aumenta la permeabilità al gas con modalità soggetta ai vincoli esterni.

Segue un terzo stadio nel quale la produzione di gas raggiunge un livello massimo mentre la portata d'acqua diventa trascurabile. Alla durata di questo stadio è legato il successo economico dell'operazione. La vita produttiva di un pozzo può variare tra 0 e 20 anni a seconda delle condizioni.

6.2. Valutazione delle prospettive di estrazione del metano

Per valutare le prospettive di un'operazione CBM occorre conoscere la quantità totale di gas in posto e la quantità estraibile (produttività del serbatoio). Questi dati possono essere ricavati sperimentalmente attraverso indagini in foro (well logs) prove tecnologiche su testimoni di sondaggi (carote) e prove dirette di estrazione per determinare l'area di influenza del pozzo e la permeabilità del sistema dei clivaggi e fratture.

Le indagini geologiche servono per definire parametri importanti quali: spessore degli strati, densità, grado di continuità, estensione del giacimento carbonifero, caratteristiche petrografiche, presenza di faglie e fratture.

Ai fini della valutazione dei risultati attesi dai quali dipende il successo dell'operazione industriale occorre conoscere i dati che legano pressioni, volumi e temperature in base ai quali può essere stimata la produzione di gas.

In pratica, la produttività di un pozzo dipende, oltre che dalle proprietà fisiche degli strati di carbone (quantità di gas presente, spaziatura e continuità del sistema di clivaggi, permeabilità e isoterme di desorbimento), anche dalle modalità di estrazione applicate nello sviluppo del progetto (spaziatura e tipo di pozzi, tecniche di stimolazione dell'estrazione).

Importanza particolare deve essere attribuita a tecniche di allargamento dell'estremità aperta dei pozzi e al ricorso alla fatturazione idraulica per aumentare la permeabilità dello strato.

La tecnologia della perforazione guidata, mutuata dall'industria petrolifera, grazie alla quale i pozzi possono essere deviati fino ad assumere una direzione orizzontale e svilupparsi all'interno dello strato di carbone, può consentire di aumentare considerevolmente l'area di influenza di singoli pozzi con il vantaggio di poterli diradare con notevole risparmio sui costi.

Il vantaggio conseguibile con i pozzi "aperti" rispetto a quelli "rivestiti" è messo in evidenza dalle curve di figura 31.

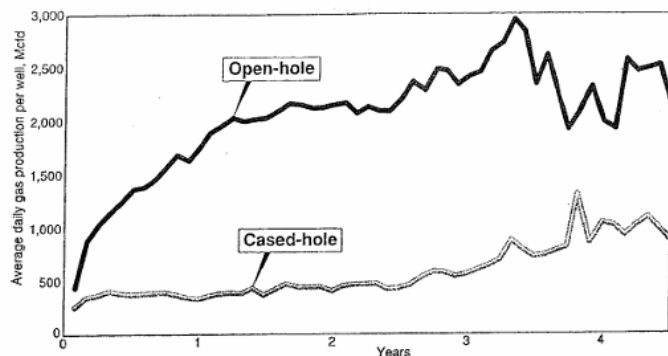


Figura 31. Confronto relativo della produttività media dei pozzi aperti e rivestiti (Stevens et al., 1996)

Quanto sopra detto resta valido anche (e a maggior ragione) nel caso delle tecniche ECBM nelle quali l'estrazione di metano è stimolata dalle iniezioni di anidride carbonica che presenta maggiori affinità per il carbone, come discusso a proposito delle isoterme di adsorbimento.

Ovviamente è molto importante lo studio attento della spaziatura e della disposizione areale dei pozzi considerando che è opportuno assicurare un certo grado di interferenza per ottenere uno sfruttamento quasi integrale del metano estraibile.

Un'interessante tecnologia di preparazione è rappresentata dal concetto dei pozzi "cavitati" in fondo ai quali si induce una forte azione dinamica con getti misti di aria/acqua o di acqua ad alta velocità, seguita da una rapida depressurizzazione per favorire la rottura del carbone e l'estrazione dei frammenti ottenendo così un allargamento del fondo del pozzo e un aumento della sezione utile di drenaggio.

6.3. Andamento delle produzioni in funzione del tempo

E' ormai assodato che ai fini dell'immagazzinamento di CO₂ negli strati di carbone è essenziale che l'iniezione sia accompagnata dal desorbimento e dall'estrazione del metano con conseguente liberazione di spazio disponibile per l'adsorbimento/assorbimento della CO₂.

Questo fatto è mostrato dai diagrammi di figura 32.

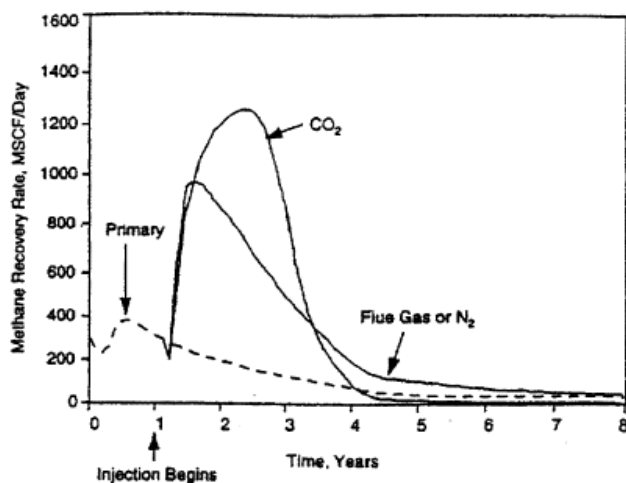


Figura 32. Confronto relativo tra le diverse tecniche di recupero del metano dagli strati di carbone in funzione del tempo (Gunter et al., 1997)

Emerge chiaramente il vantaggio di stimolare l'estrazione di metano con iniezioni di CO₂ pura o di azoto o di effluenti non trattati da centrali termoelettriche contenenti azoto e anidride carbonica, rispetto all'estrazione primaria senza iniezione di gas. Il confronto è fatto nell'ipotesi di un pozzo di iniezione e quattro pozzi di estrazione, disposti secondo uno schema a 5 punti, alle condizioni seguenti:

- pressione di iniezione 2000 psia (~14 MPa)
- pressione del serbatoio 1500 psia (~10 MPa)
- permeabilità 10 mD
- porosità 0,5%
- spessore dello strato 3 m
- area di drenaggio 46 acri (18,6 ha)

Nel caso di estrazione primaria la produzione di metano resta molto bassa e la grande proporzione di gas resta nel serbatoio. Il recupero inizia identificando la zona più favorevole con un contenuto di CH₄ sufficientemente alto e economicamente valido. Il serbatoio è raggiunto con pozzi verticali o possibilmente deviati e la zona circostante eventualmente fratturata per facilitare il drenaggio.

Si consente quindi al serbatoio di rilasciare naturalmente la pressione originaria col passare del tempo.

La produzione può essere incrementata con il pompaggio dell'acqua che causa il ritiro della matrice carboniosa per collasso dei pori. Il processo può essere in parte reversibile per i carboni di alto rango, al contrario dei carboni di basso rango per i quali il ritiro è definitivo e irrecuperabile e si manifesta con fratture visibili dopo il drenaggio dell'acqua. Il recupero primario di CH₄ può variare da 20 a 60%.

Qualitativamente l'evoluzione di un pozzo di estrazione è mostrata in figura 33.

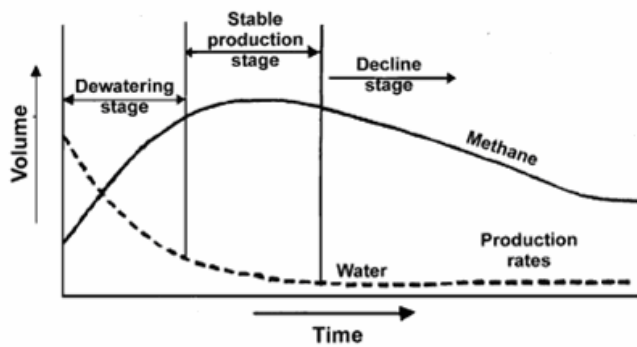


Figura 33. Evoluzione tipica di un pozzo di produzione di metano (Kuuskraa e Brandeburg, 1989)

Adottando la tecnica ECBM con iniezione di CO₂ il recupero aumenta sensibilmente rispetto al livello raggiungibile con l'estrazione primaria soprattutto in una fase intermedia tra il primo e il quarto anno di produzione alle condizioni sopra indicate.

Nelle operazioni ECBM la natura delle isoterme di adsorbimento/desorbimento per la miscela di gas è di importanza determinante.

I risultati della costruzione delle isoterme in laboratorio indicano che i carboni di medio e alto rango possono adsorbire volumi di CO₂ in misura doppia rispetto al metano (2 moli di CO₂ per ogni mole di metano desorbito). Tale rapporto potrebbe salire fino a 10 (10 moli di CO₂ per ogni mole di metano desorbito) nel caso dei carboni di basso rango quale il Sulcis.

Risultanze di laboratorio corroborate da prove sul campo indicano che il rapporto potrebbe essere ancora maggiore a profondità dello strato inferiori a 800 m dalla superficie, alle quali la CO₂ gassosa si converte in CO₂ supercritica, come mostrato nel diagramma di stato dell'anidride carbonica riportato in figura 34.

D'altro canto, l'aumento di produzione stimolato dall'iniezione di CO₂ richiede più tempo per svilupparsi a causa della cattura della CO₂ nella zona intorno al pozzo che ne ritarda la penetrazione nello strato di carbone.

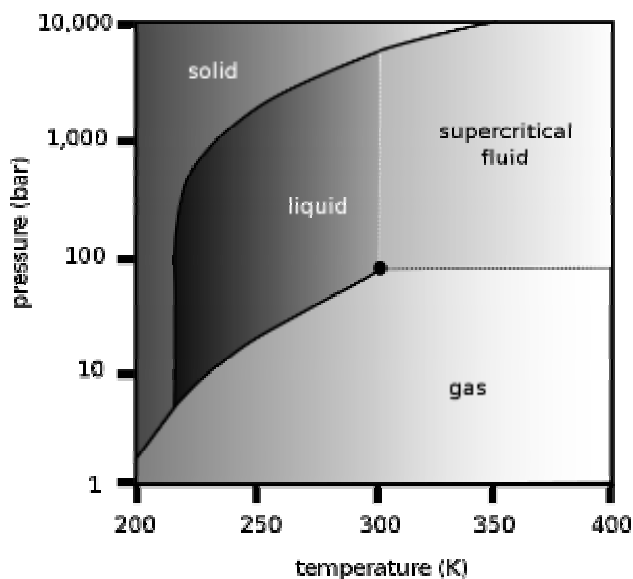


Figura 34. Diagramma di stato dell'anidride carbonica

Il fronte di scambio tra CH₄ e CO₂ si propaga secondo una curva ellittica a causa dell'anisotropia delle caratteristiche del carbone. Il processo termina quando l'avanzamento del fronte si arresta e la CO₂ si riversa nel pozzo di immissione.

Al fine di ottenere stime sulla produzione totale ottenibile dai pozzi, si usa eseguire opportuni test veloci e di basso costo consistenti in iniezione a stadi incrementando la portata di gas a intervalli di tempo costanti di almeno un'ora. L'analisi consiste nel rappresentare graficamente l'andamento della pressione di iniezione al termine di ciascuno stadio in funzione del tempo: la presenza di interruzioni della continuità della linea indica la formazione di fratture.

6.4 Criteri generali di scelta della zona di intervento

Sulla base delle conoscenze acquisite e dell'esperienza maturata si possono fornire seguenti requisiti che lo strato di carbone dovrebbe presentare per il successo dell'operazione ECBM con iniezione di CO₂:

- Strato-serbatoio omogeneo e isolato con buona continuità laterale e limitato verticalmente da formazioni di tetto e di letto impermeabili e non fratturate o con fratture impervie per evitare fughe di gas.
- Struttura semplice (pieghe dolci, fratture con piccolo o nessun dislocamento, ridotta presenza di intercalari).
- Permeabilità dello strato adeguata (1-5 mD) per consentire un facile passaggio dei gas
- Profondità ottimale. Le basse pressioni degli strati poco profondi possono limitare la quantità di CO₂ trattenuta che, desorbendosi dal carbone può essere riemessa in atmosfera. Al contrario pressioni troppo alte quali quelle corrispondenti a grandi profondità possono ridurre la permeabilità al disotto di limiti accettabili per un buon livello di produzione.
- Favorevole geometria del giacimento. Un "fascio produttivo" con pochi strati spessi è meglio di una deposito articolato in molti strati sottili.
- Condizioni di saturazione del metano. Ai fini del recupero un carbone non saturo darà luogo a minori produzioni di gas pur potendo ancora rispondere bene per quanto concerne il sequestro della CO₂, a proposito del quale diventano più importanti le restrizioni di tipo idrogeologico (il movimento dell'acqua all'interno dello strato può rimuovere la CO₂ e trasportarla fuori della zona di sequestro).
- Assenza di vuoti minerari al disotto della zona di iniezione onde evitare che si formino fratture di subsidenza che rappresentino possibili vie di fuga per la CO₂

7. IL BACINO CARBONIFERO DEL SULCIS

7.1 Geologia generale

La geologia e l'assetto stratigrafico del bacino appare idonea all'applicazione della tecnica ECBM il cui requisito fondamentale per l'applicazione è la presenza di letti di carbone alla profondità di circa 800 m. Nel bacino del Sulcis la potenza complessiva del "produttivo", comprese le lenti di argille carboniose, è di circa 150 m.

Lo spessore del carbone varia tra il 20 e il 40 % del totale e, nell'area di estrazione, possono essere stimate circa 250 Mt di carbone. Inoltre la buona capacità tampone e il pH delle numerose rocce (calcarei organogeni con intercalazioni marnose e calcareo marnose, ad elevata permeabilità per fessurazione e carsismo) è in grado di assicurare trappole "solubili" nel primo periodo di attività e trappole minerali nel lungo periodo.

Infine è da sottolineare che il sondaggio esplorativo eseguito da Carbosulcis nell'entroterra (on-shore) in località Monte Ulmus, ha evidenziato la presenza dei letti di carbone alla quota di -800 m (considerata la profondità minima per l'iniezione della CO₂).

7.2 Caratteristiche del carbone Sulcis

Il carbone Sulcis, così chiamato perché estratto dal giacimento minerario della zona omonima, è definito "carbone sub-bituminoso a lunga fiamma", secondo la classificazione americana ATSM D 338, che in funzione del grado di impurità classifica il carbone in antracite, bituminoso, sub-bituminoso e lignite. I parametri caratteristici del carbone Sulcis sono :

Tabella 4. Caratteristiche medie del carbone Sulcis

CARATTERISTICHE	VALORI
Umidità [%]	10,5
Materie volatili [%]	39
Ceneri [%]	16
Carbonio fisso[%]	52,5
Zolfo [%]	6,06
Potere Calorifico Inferiore [kcal/kg]	5000 - 6000

7.3 La miniera

L'insieme delle operazioni che portano a localizzare giacimenti carboniferi e a valutarne l'interesse minerario, si chiama prospezione mineraria.

Questo inizia con lo studio delle foto aeree per individuare zone geologicamente interessanti e prosegue con l'analisi dei campioni di terreno da cui trarre informazioni più dettagliate. Una volta individuato un giacimento, la sua posizione e la conformazione, si procede alla costruzione del cantiere-miniera. Se il carbone si trova a profondità non superiori ai 30 metri, viene estratto in miniere a cielo aperto, dove il giacimento è reso accessibile dopo l'eliminazione degli strati di suolo e roccia sovrastanti, solitamente con l'aiuto di cariche esplosive.

Per filoni di carbone a profondità maggiori di circa 30 metri, l'accesso al giacimento si ottiene

scavando miniere sotterranee, formate da almeno due gallerie, per il passaggio di minatori e macchinari, fino al giacimento.

Nelle miniere a cielo aperto, il carbone viene estratto dopo essere stato liberato dalle rocce sovrastanti. Nel caso di miniere sotterranee, l'estrazione si esegue con due modi: quello "dei pilastri abbandonati" e quello "delle lunghe fronti".

Il primo sistema consiste nell'estrarre carbone lasciandone però dei "pilastri" a sostegno del soffitto della miniera. Nel caso delle lunghe fronti, invece, si utilizza una serie di strutture di sostegno, dette "armature" mobili che sostengono il soffitto nell'area di escavazione. Man mano che l'estrazione procede, le armature vengono spostate e il soffitto frana.

Oltre alla modalità di coltivazione i due metodi provocano effetti diversi al suolo sovrastante. Infatti, all'asportazione del carbone, se la miniera non è sostenuta, segue un più o meno graduale abbassamento dei terreni sovrastanti (fenomeno di subsidenza). In aree soggette a vincoli ambientali, si preferisce, dunque, il metodo dei pilastri abbandonati, che dal punto di vista produttivo risulta più selettivo.

Altrove, quello delle lunghe fronti che, grazie a uno sfruttamento più intensivo della miniera, produce una quantità di carbone 4 - 5 volte superiore. Una volta estratto, il carbone viene trattato in modo da renderlo adatto alle esigenze commerciali [17]. In particolare, viene macinato, vagliato per ottenere le pezzature richieste dal mercato e lavato per eliminare le impurità.

7.4 Sondaggi

I sondaggi permettono di raccogliere informazioni utili al fine di operare una più attenta pianificazione della fase di coltivazione.

L'indagine viene eseguita attraverso la creazione di fori di piccolo diametro eseguiti per mezzo di apposite macchine rotative dette "sonde"; durante la perforazione del foro sonda vengono raccolti i dati relativi alle potenze dei vari strati attraversati, e, se necessario, vengono prelevati appositi campioni chiamati "carote", che vengono studiati e sottoposti a prove di laboratorio.

Lo studio sistematico di un'area prevede il reperimento di più campioni da realizzarsi con metodologie di sondaggio normalizzate.

Più fitto sarà il sondaggio e maggiori saranno i dettagli che si potranno trarre sul giacimento.

7.5 Sequestro della CO₂

Attualmente Carbosulcis sta lavorando ad un progetto per la "cattura" e "sequestro" della CO₂ attraverso la tecnologia ECBM. Gli altri soggetti impegnati ad accertare la fattibilità di questo progetto, direttamente o indirettamente coinvolti, sono l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia e la Sotacarbo con l'azionista ENEA, in collaborazione con l'Università di Cagliari e altri partners.

Le fasi di studio finora realizzate sono mirate alla possibilità di estrarre metano dagli strati carboniferi presenti a profondità maggiori, comprese tra 800 e 1200 m rispetto alle coltivazioni attuali e spostati verso il mare.

Allo stato attuale delle scarse conoscenze disponibili le prospettive possono essere considerate solo moderatamente incoraggianti, in quanto ancora basate più su speranze che non su riscontri oggettivi.

7.6. Idoneità del sito prescelto per il progetto ECBM

Tuttavia il giacimento del Sulcis presenta qualche scostamento rispetto ai requisiti essenziali che dovrebbe possedere il serbatoio ideale per operazioni di sequestro della CO₂ e contemporanea produzione di metano.

Nella zona conosciuta ed esplorata del bacino sulcitano, interessata da coltivazioni minerarie passate e attuali, la continuità laterale non appare assicurata per aree sufficientemente estese pari al dominio medio dei pozzi di iniezione/estrazione, il che costringerebbe a infittirne la maglia con conseguenti appesantimenti dell'economia del progetto.

La struttura degli strati è localmente complicata da pieghe talora molto pronunciate e da faglie con rigetto maggiore dello spessore degli strati. Gli intercalari all'interno degli strati possono rappresentare ostacoli o barriere al regolare flusso dei gas.

Il carbone Sulcis non può essere certamente classificato come saturo di metano e pertanto le prospettive di produzione di gas non appaiono particolarmente promettenti.

La circolazione di acqua negli strati potrebbe favorire il desorbimento della CO₂ iniettata dando luogo a possibili riemissioni.

Peraltro è da rilevare che nelle aree a mare (off-shore) dove lo spessore degli strati di carbone tende a diventare progressivamente più rilevante e continuo, si hanno molto probabilmente potenzialità di sviluppo maggiori.

E' del tutto evidente che la mancanza o la insufficienza delle informazioni sulle caratteristiche in profondità dell'area individuata per lo sviluppo del progetto ECBM non consentono di avanzare alcuna stima sulle prospettive di successo dell'operazione se non in condizioni di estreme incertezza, incompatibile con il rilevante impegno finanziario e con il rischio ambientale in caso di malfunzionamento del sistema.

L'alto livello di rischio all'attuale stato della conoscenza può essere ridotto entro limiti accettabili solo a seguito di indagini e ricerche adeguate, sul campo e in laboratorio, per accertare e quantificare tutti i parametri che entrano in gioco nel processo.

Un eventuale progetto comporterebbe l'esecuzione di pozzi orizzontali perforati da terra verso il mare sino a raggiungere gli strati di carbone profondi che appaiono più idonei per le tecniche CBM ed ECBM. Questa scelta minimizzerebbe inoltre l'impatto ambientale del progetto rispetto a realizzazioni di eventuali piattaforme off-shore.

8. PROBLEMI AMBIENTALI E TERRITORIALI DEL PROGETTO

8.1. Premessa

Particolare attenzione è stata dedicata allo *“Sviluppo di una tecnologia GIS per l'elaborazione di modelli idonei al monitoraggio dei siti di stoccaggio in sotterraneo di CO₂*

ed alla diffusione spaziale della stessa all'interno della serie geologica del bacino carbonifero del Sulcis”,

IL lavoro è stato diviso in tre fasi principali, ovvero la raccolta dei dati d'archivio, la realizzazione di un DSS (attualmente in fase avanzata di sviluppo) e, infine, lo studio delle più idonee soluzioni per il monitoraggio ambientale.

Durante la prima fase è stato raccolto e analizzato tutto il materiale presente negli archivi del DIGITA e in bibliografia, relativo all'area del bacino carbonifero del Sulcis-Iglesiente ed alle caratteristiche del carbone. Durante tale ricerca è stata condotta un'approfondita analisi delle informazioni riguardanti:

- le caratteristiche geologiche e morfologiche dell'area in esame;
- la stratigrafia;
- l'inquadramento tettonico-strutturale;
- il modello genetico del corpo mineralizzato;
- le caratteristiche chimiche, mineralogiche e petrografiche del carbone;
- le caratteristiche chimiche, mineralogiche e petrografiche delle rocce incassanti.

Partendo dai risultati della prima fase, è stato reputato opportuno far confluire queste informazioni all'interno di un DSS (Decision Support System) basato su tecnologia GIS.

Tale tecnologia si rivela particolarmente idonea nel caso in cui si vogliano sfruttare informazioni di tipo “geografico” come quelle in nostro possesso; inoltre, data a priori l'imprevedibile mole delle informazioni su cui si dovrà basare la progettazione della più idonea maglia di monitoraggio ambientale, la scelta del GIS, con le sue teoriche infinite capacità di gestione dei dati, rappresenta una scelta ottimale per il successo del progetto.

Il DSS, tuttora in fase di sviluppo, consentirà inoltre una corretta individuazione, all'interno della regione del Sulcis-Iglesiente, di una o più aree rispondenti ai requisiti di idoneità per lo stoccaggio della CO₂ in sotterraneo e su cui, in fase di dettaglio, indirizzare le ulteriori indagini *in situ*.

Nella versione attualmente funzionante del DSS, i parametri inseriti e interrogabili sono:

- morfologia superficiale (ottenuta tramite la creazione di un DTM dell'area in esame);
- geologia superficiale (ottenuta attraverso l'integrazione dei dati d'archivio ed inediti);
- profondità del giacimento (definita sulla base delle interpolazioni dei dati della profondità del tetto del corpo mineralizzato desunte dall'analisi dei dati dei sondaggi disponibili);
- tettonica fragile (desunto dall'andamento planimetrico delle strutture disgiuntive principali a media e piccola scala).

Sulla base di queste informazioni si è potuto procedere allo sviluppo di un modello tridimensionale di un settore della regione che, già in questa fase e nonostante la carenza dei dati dei sondaggi, permette una prima ipotesi di maglia per il posizionamento degli strumenti per il monitoraggio.

La modellizzazione dell'intera area prevedibilmente coinvolta nel processo di stoccaggio sarà di fondamentale importanza se si considera che le condizioni geologiche, quelle mineralogiche e strutturali, influenzeranno sia la scelta del più idoneo sito di stoccaggio della CO₂ in sottosuolo, sia le condizioni di eventuale risalita del *plume*.

Con la terza fase, sulla base dei modelli realizzati, potranno essere definite le soluzioni progettuali più idonee per il monitoraggio ambientale della CO₂ in sottosuolo e la costruzione di modelli spazio-temporali per la previsione dell'evoluzione del *plume*.

Poiché, come evidenziato fin'ora, i dati sperimentali costituiscono la base per la costruzione dei modelli su cui far operare il DSS, è evidente che la limitatezza riscontrata di dati

sperimentali (logs di sondaggi, analisi chimiche, geofisiche, ecc...) per l'area in esame rappresenta un forte limite allo sviluppo del sistema stesso.

8.2. Inquadramento dell'area

In campo ambientale, la conoscenza della geologia e della morfologia del territorio in studio è da considerarsi la base da cui partire per lo sviluppo di qualunque progetto. Per questo motivo, nelle pagine che seguono, verranno delineate le principali caratteristiche geografiche, geologiche e morfologiche dell'area in esame, così da costituire l'inquadramento per l'esposizione dei successivi step della ricerca.

8.2.1 Inquadramento geografico dell'area

Il Bacino Carbonifero del Sulcis occupa un'area della Sardegna Sud-Occidentale che si sviluppa con andamento pressoché meridiano fra l'insenatura di Fontanamare a Nord ed il Golfo di Palmas a Sud; verso Est il limite del Bacino è dato dagli affioramenti Paleozoici, mentre ad Ovest è costituito dalla linea di costa (figura 34).

L'estensione areale del bacino così delimitato è stimata in circa 200 Km² [29] ed interessa topograficamente parte del 1° Quadrante del Foglio 232 Isola di S.Pietro ed i Quadranti III e IV del Foglio 233 Iglesias della Carta d'Italia in scala 1:100.000.

Dal punto di vista cartografico tali aree sono inquadrate all'interno delle tavolette della carta IGM in scala 1:25.000 denominate rispettivamente: I° NE Nebida, I° SE Portoscuso, II° NE Calasetta, IV NO Iglesias, IV SO Cortoghiana, III NO Carbonia, III SO Golfo di Palmas; mentre, riferendosi alla Carta Tecnica della Regione Sardegna alla scala 1:10.000, essa resta individuata all'interno dei fogli 555 Iglesias e 564 Carbonia.



Figura 34. Inquadramento dell'area di studio

Dal punto di vista amministrativo l'area così individuata rientra nelle pertinenze dei territori dei comuni di Carbonia, Gonnese, Portoscuso e S.Giovanni Suergiu.

8.2.2 Inquadramento morfologico dell'area

La morfologia della regione è caratterizzata dalla presenza della copertura vulcanica di natura prevalentemente ignimbratica che mostra una giacitura generalmente tabulare sbandata verso SO con una pendenza media dell'8-10%.

Su tali espandimenti ignimbratici hanno operato sia gli agenti esogeni (precipitazioni, venti, irraggiamento solare) che hanno determinato un modellamento dei rilievi presenti, sia i processi endogeni che hanno determinato le principali strutture NS e EO.

In queste profonde incisioni e, soprattutto, negli acrocori formati in corrispondenza degli alti strutturali del Monte Sinni e del Monte Sirai, vengono messe a nudo le successioni di episodi ignimbratici stratoidi che danno luogo ad una evidente gradonatura, dovuta alla differente competenza dei vari livelli di ogni singolo evento.



Figura 35. Ricostruzione 3D dell'area del progetto

La fascia costiera a sud di Portoscuso-Portovesme mostra una morfologia piana dovuta all'accumulo di sedimenti recenti quali limi e sabbie. Tale area, seppure attualmente sede di un imponente polo industriale, mostra ancora caratteristiche paludose; analoga situazione si osserva nell'area a sud di Matzaccara.

A sud della città di Carbonia, sulle ignimbriti tabulari, giacciono le vulcaniti di natura andesitica caratterizzate da corpi lavici a forma di cupole che creano una morfologia più accidentata di tipo montuoso-collinare.

8.2.3. Inquadramento geologico-stratigrafico dell'area

La situazione geologica nella quale si rinviene il giacimento è schematizzata nella figura 36.

Una sezione stratigrafica generale della zona coperta dall'eruttivo, mostra le seguenti unità litologiche principali [29] (elencate dal basso verso l'alto):

- Basamento paleozoico scistoso in trasgressione;
- puddinga basale di 1,5-2 metri fortemente cementata con ciottoli di calcare mesozoico, quarzo, scisto.
- Calcari a miliolidi con potenza da 4 a 25 m;
- Formazione carbonifera (formata da alternanze di Calcari, Calcari marnosi e Marne, Argille, Scisti e Carbone) con potenze complessive da 15 a 140 m;
- Arenarie intercalate ad Argille, talora inferiormente tendenti a resti vegetali, dette "Arenarie Produttive", e superiormente senza fossili dette "Arenarie Sterili";
- alternanze di Conglomerati e Argille con potenze di 25-30 m;
- Vulcaniti del Complesso Trachitico.

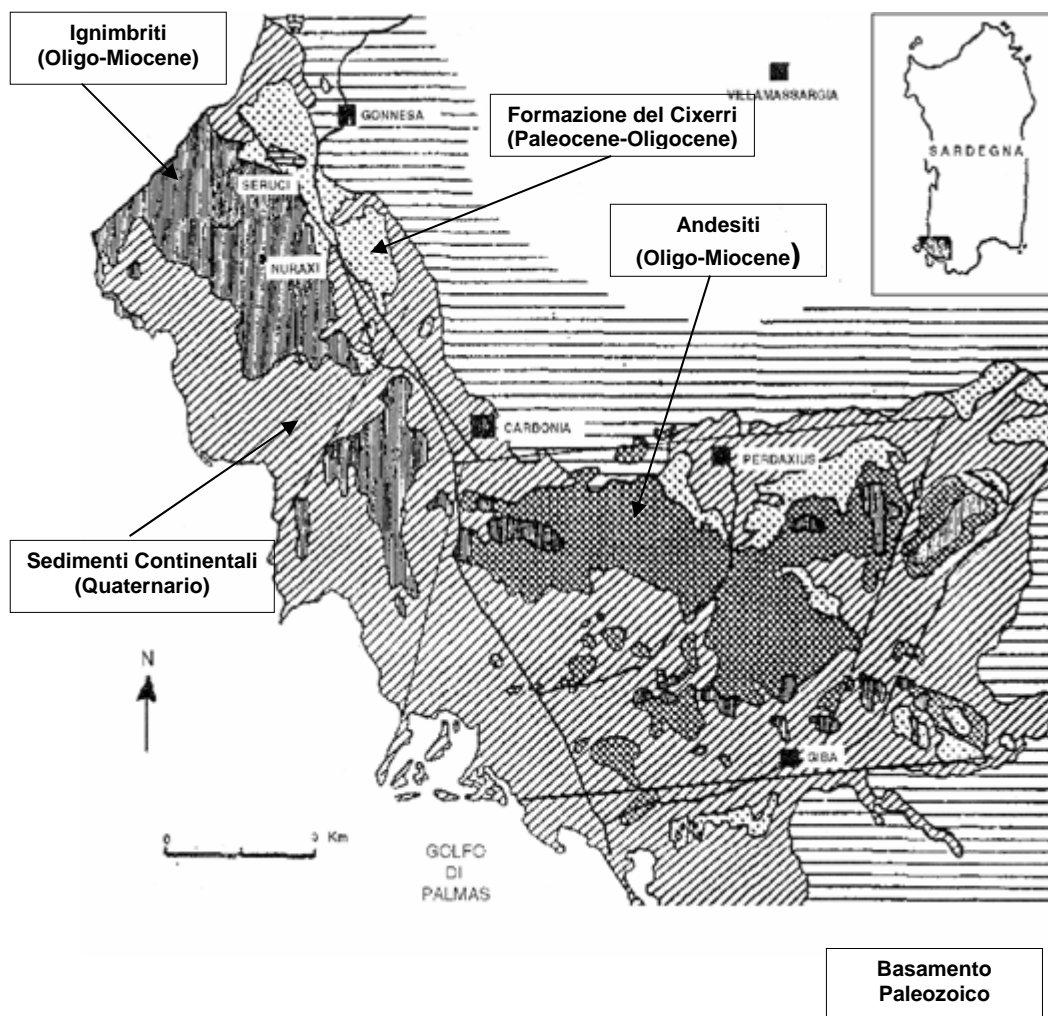


Figura 36. Inquadramento geologico schematico

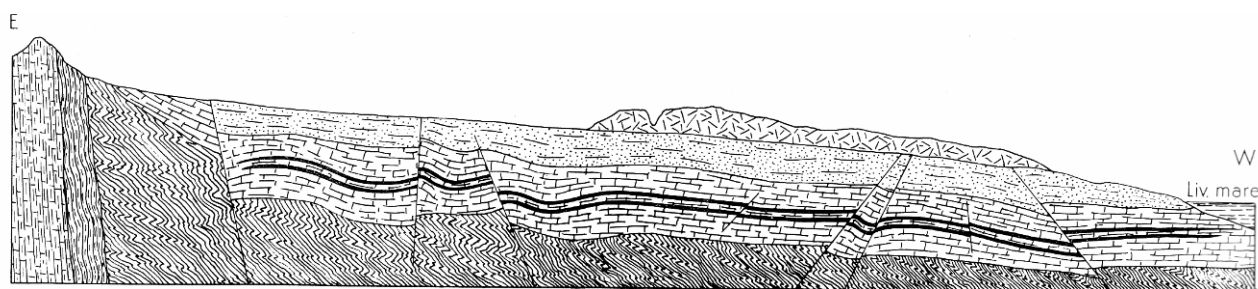


Figura 37. Profilo geologico generale del bacino carbonifero del Sulcis

8.2.4. Inquadramento strutturale dell'area

Dal punto di vista strutturale l'area risulta interessata da un complesso sistema di strutture disgiuntive e da blande azioni plicative, indice degli sconvolgimenti tettonici che ne hanno interessato l'evoluzione.

Le zone di frattura, essendo zone di estrema debolezza, influenzano strettamente gli schemi di drenaggio superficiale e profondo, dipendente dall'assorbimento selettivo esercitato, nei confronti di acque superficiale, dalle zone di breccia o comunque dalle discontinuità collegate con le linee di frattura di qualsiasi genere, siano esse faglie o semplici fratture senza spostamento.

Studi bibliografici [14], condotti sulla base di indagini in *situ* e di analisi delle foto aeree, individuano un complesso campo di frattura, nel quale sono stati individuati i seguenti elementi strutturali:

1. Linea di Matoppa con direzione E-O. Nella zona di Masua, coincide con l'incisione del canale di Matoppa. La sua prosecuzione orientale si indebolisce nel settore settentrionale di Monte S.Pietro (661 m), oltre il quale esce dalla base topografica.
2. Linea di Nebida con direzione N-NNO/S-SSE. Proviene dalla valle di Acquaresi e giunge fino alla zona di Monte Prelau, a NNO di Gonnese
3. Linea di Fontanamare, parallela alla precedente. Da Fontanamare scende fino a Serra Pirastu (110 m) a ovest di Gonnese. La prosecuzione meridionale di questa frattura non è molto chiara, anche se è certo, sulla base di altri studi condotti in precedenza, che essa continui in direzione per parecchi km. La prosecuzione verso N coincide con l'andamento della costa.
4. Linea di Gonnese, con direzione ENE-OSO.
5. Linea di S. Giovanni, con direzione circa NE-SO. Delimita a settentrione il Monte S.Giovanni. Il suo estremo NE si perde nella zona delle discariche di Monteponi.
6. Linea Monte Scorra, con direzione E-O. Dalla zona di Campumari, giunge fino a Campo Pisano. Il suo estremo occidentale si perde sotto il lembo post-paleozoico di Campumari, che non ne viene dislocato; sulla costa ad ovest di Campumari, si osservano numerose zone di frizione nelle rocce paleozoiche, ma una loro correlazione con la frattura descritta è alquanto problematica. Si deve inoltre tener presente la probabilità che essa venga spostata dalla linea di Nebida. Le soluzioni di continuità sono dovute alla zona delle discariche di Monteponi, e ad un tratto non chiaro negli scisti della Valle di Iglesias.
7. Linea di Monte Scorra II, vicariante della precedente, con percorso tendenzialmente ONO-ESE. È limitata al settore occidentale dell'area in esame.

8. Linea della Gran Sorgente, con direzione N-S. Nel settore meridionale, si arresta contro la linea di S.Giovanni. In questa zona, inoltre, presenta una biforcazione, peraltro non del tutto chiara.
9. Linea S.Giorgio, con direzione ONO-ESE. Dalla zona di S.Giovanneddu, giunge fino alla miniera di S.Giorgio.
10. Linea di Palmari, con direzione ENE-OSO, ripetutamente dislocata, che va da Iglesias a Monteponi.
11. Linea Canonica, con direzione NO-SE. Provenendo dalla valle del R.Canonica, si perde sotto le alluvioni del Cixerri a est di Campo Pisano.
12. Linea di Funtana Perda, da Campo Pisano verso sud
13. Linea del Marganai, che da Iglesias raggiunge la valle del Corongiu.

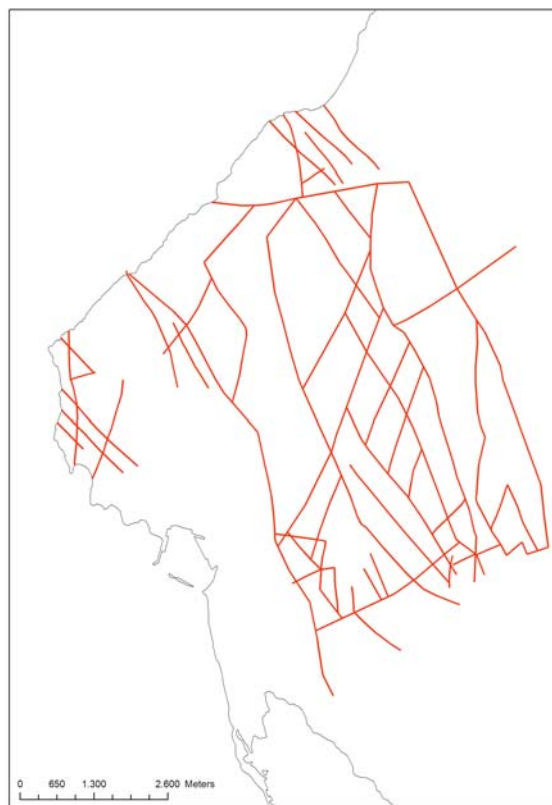


Figura 38. Ricostruzione strutturale schematica

Una fitta popolazione di fratture accompagna quelle principali citate. È opportuno notare come esse si affollino in tre settori ben delimitati: Monteponi-Iglesias, Monte S.Giovanni-Cuccuru Matteus, Nebida-P.ta Mezzodi.

Le grandi fasce di rocce carbonatiche, si presentano dislocate in blocchi da fratture a raggera le quali sembrano convergere verso un centro ideale comune. A queste fratture radiali si accompagnano numerose fratture tangenziali ubicate in preferenza nella fascia esterna degli affioramenti calcareo-dolomitici, verso il contatto con gli scisti.

Questa disposizione degli schemi di frattura è verosimilmente collegata al forzamento tettonico responsabile dell'inarcamento degli orizzonti carbonatici. Essi sono stati soggetti, di

volta in volta, a fenomeni distensivi, compressivi e nuovamente distensivi (collassi tardivi) particolarmente evidenti nelle arenarie.

Tali azioni plicative e disgiuntive hanno creato condizioni riferibili a fenomeni trascorrenti e in particolare trassensivi che presumibilmente hanno permesso lo sviluppo di bacini di pull-apart, come lo schema strutturale di figura 38 suggerirebbe. Tale ipotesi sarà comunque attentamente studiata non appena possibile, data la sua particolare importanza per la progettazione della rete di monitoraggio.

La presenza di queste fratture nel territorio è, come già evidenziato, la testimonianza più palese degli sconvolgimenti tettonici a cui quest'area è stata soggetta nel corso delle ere geologiche. Tali fenomeni tettonici, com'è ovvio, rappresentano delle zone di debolezza che potrebbero dare luogo a fenomeni di risalita della CO₂.

Per questo motivo la corretta modellizzazione dell'andamento strutturale rappresenta un requisito fondamentale per l'individuazione delle aree idonee (in termini di permeabilità e di compattezza) ad essere utilizzate come serbatoi per la CO₂ e per la progettazione della già citata rete di monitoraggio

8.2.5. Inquadramento giacimentologico dell'area

Un qualunque giacimento minerario, e in special modo quelli carboniferi, è inserito in contesti geologici spesso molto complessi, la cui esatta conoscenza diventa assolutamente necessaria per differenti ordini di motivazioni. A partire da quelle legate alla razionale valorizzazione fino a quelle, come in questo caso, legate all'individuazione all'interno del corpo minerario, dell'esistenza di particolari condizioni geologiche, mineralogiche e/o strutturali.

In particolare, lo sfruttamento del corpo minerario del giacimento carbonifero sulcitano per gli scopi della ricerca, non può prescindere dall'analisi di alcune problematiche legate a:

- condizioni petrogenetiche che ne hanno influenzato l'elevato contenuto in S;
- condizioni strutturali, testimoniate dalla presenza di un vasto e complesso campo di fatturazioni, che ha prodotto una suddivisione in blocchi rigettati, piegati, modificati dell'intera formazione mineralizzata.

Tale corpo minerario, ospitato in una sequenza sedimentaria (Paleocene sup.-Oligocene) trasgressiva su terreni mesozoici e chiusa al tetto da una sequenza vulcanica riolitico-ignimbratica (Miocene), mostra una potenza da 40 a 100 m ed è costituito da livelli di carbone raggruppabili in diversi fasci, intercalati in una successione arenaceo-argilloso-marnosa e calcarea (Palocene sup.-Eocene inf.) [28].

Mostra una generale giacitura con immersione a S-SO (con una pendenza media del 10% e profondità crescenti verso il mare di Portovesme a partire da un minimo di 250 m dalla superficie [27]), affiorando in modo discontinuo nel settore N-E del bacino e approfondendosi verso SO; in prossimità della costa, nei pressi di Portovesme, è stato incontrato dai sondaggi ad oltre 700m sotto il livello del mare.

Il corpo minerario risulta interessato da una serie di fratture a carattere regionale con direzione prevalente NO-SE, NE-SO e subordinatamente E-O ricollegabili agli eventi tettonici che hanno interessato la Sardegna meridionale a partire dal Miocene e fino al Quaternario. Per effetto di questi sistemi di fratture il giacimento risulta strutturato in blocchi a diversa quota, con generale approfondimento verso ovest.

Il modello genetico, comunemente accettato, prevede la formazione del deposito sulcitano attraverso le seguenti fasi [25]:

- Dopo una fase continentale in clima arido, caratterizzata dall'accumulo di sedimenti clastici (Permo-Trias) si ha l'ingressione del mare mesozoico con deposizione di orizzonti carbonatici. Segue una fase di continentalità.
- Nel Paleocene sup. si ha un'ingressione marina su un paesaggio tettonizzato ed inciso dall'erosione, costituito dal basamento paleozoico pre-ercinico e da quelli carbonatici triassico-giurassici.
- L'invasione marina paleocenica, caratterizzata inizialmente da condizioni ottimali di salinità e ossigenazione, tende a formare golfi ed insenature protette che, con l'instaurarsi del regime regressivo a partire dall'Ilerdiano sup., finiscono per assumere condizioni euxiniche ed ipoaline, trasformandosi poi in paludi e lagune.
- Per una rottura di equilibrio, dalle foreste costiere presenti nelle zone bordiere o nelle aree già emerse giungono su questi ambienti detriti vegetali (soprattutto foglie, rami, spore, pollini) che danno luogo a spessi depositi di sostanza organica, che si vanno ad accumulare nel bacino subsidente.
- Con il procedere della fase erosiva legata ad una tettonica attiva, arrivano dal continente gli apporti dapprima colloidali e microdetritici (argilliti più o meno carboniose, talora siltose) ed infine francamente detritici (arenarie e microconglomerati), che tendono a colmare le lagune e le depressioni morfologiche che si vanno formando.
- La subsidenza sempre attiva favorisce l'ingressione di lingue marine entro le zone sempre più depresse che si vanno popolando di microfaune a Miliolidae. Questi livelli si interdigitano più volte entro depositi continentali ricchi in sostanza vegetale.
- Nelle aree costiere si instaurano le condizioni più diverse, dipendenti dalla maggiore o minore apertura verso il mare e dall'arrivo o meno di colloidali insieme a nuove soluzioni ioniche.
- Dove la vicinanza al mare aperto è più prossima e l'arrivo di detriti minore o nullo, si hanno acque limpide nelle quali riprendono sviluppo le popolazioni oligotipiche. Dove invece si hanno lagune chiuse, isolate dal mare da lingue sabbiose e con apporti esclusivamente continentali di tipo misto, ionico e colloidale, si hanno sedimenti carbonatico-argillosi, ovviamente, secondo il prevalere dell'uno o dell'altra componente sono più o meno marnosi con tendenza verso l'alto al prevalere della frazione carbonatica.
- Per una successiva rottura di equilibrio si ripetono le stesse condizioni paleogeografiche ed il ciclo, chiusosi con calcari debolmente marnosi, riprende con sostanze vegetali accompagnate e seguite da detriti finissimi e colloidali.
- Con l'esaurimento di tre cicli più o meno completi del tipo descritto si chiude, nel Sulcis, il periodo caratterizzato dalla successione litorale-paralica e ne inizia uno decisamente continentale, che dà luogo alla potente Formazione del Cixerri che costituisce la copertura del corpo minerario.

8.3. Caratteristiche minero-petrografiche del Carbone Sulcis

Il carbone Sulcis è classificato come sub-bituminoso B/A (ASTM) o "glanzbraunkohle" (DIN) [21], al limite delle ligniti picee. Macroscopicamente il carbone Sulcis si presenta di colore nero brillante con intercalazioni di strati e lenti a lucentezza variabile (Figura 34); manifesta spesso intensi fenomeni di fratturazione secondo piani di clivaggio ortogonali tra loro e lungo i quali si osservano sottili scaglie di natura carbonatica [16].

8.3.1 Analisi dei Macerali

Le analisi petrografiche realizzate [20, 16] hanno permesso di individuare i seguenti gruppi macerali:

- Gruppo Vitrinite (Vitrinite [P.R.=0,45-0,54], Telinite, Collinite): il gruppo della vitrinite è sempre presente sia sotto forma di piccoli lenti e piccoli straterelli intercalati agli altri gruppi macerali, sia sotto forma di grosse plaghe interessate da microfratture angolari e concordali. Tra queste si distinguono le tipiche fessure di contrazione quasi sempre presenti nella



*Tabella Composizione
percentuale media del carbone
Sulcis*

Gruppo Vitrinite	71,20%
Gruppo Exinite	11,60%
Gruppo Inertinite	5,60%
Altri Minerali	11,60%

Figura 39. Frammento di carbone Sulcis

- vitrinite, le cui dimensioni solitamente molto ridotte, possono assumere anche proporzioni considerevoli in seguito ad azioni tettoniche. In quest'ultimo caso si osserva come le fratture rilevate dall'analisi macroscopica si incontrino con le fratture di contrazione, creando numerose ramificazioni e rendendo il carbone estremamente fragile;

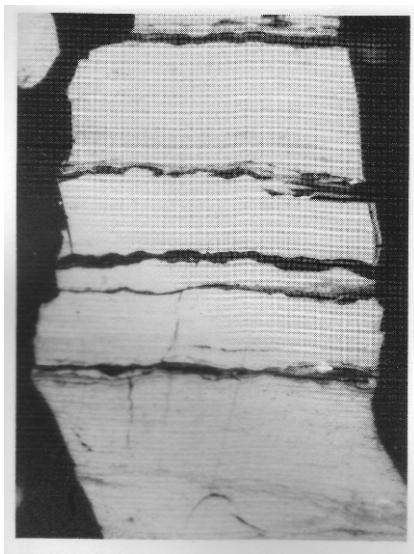


Figura 40 . Letti costituiti dal gruppo macerale della Vitrinite in alternanza a letti del gruppo della Exinite (250x) [18].

- Gruppo Exinite (Cutinite, Resinite, Sporinite, Alginite, Suberinite): i macerali del gruppo exinite sono presenti in letti di spessore variabile in alternanza a letti vitrinitici. Osservando sezioni di carbone tagliate verticalmente rispetto alla stratificazione, le cuticole si presentano con sezioni molto allungate e caratteristiche dentature che formano dei fasci il cui andamento sub-orizzontale subisce spesso dei piegamenti e rotture ricollegabili alle azioni tettoniche subite dal banco di carbone;
- Gruppo Inertinite (Sclerotinite, Micrinite, Semfusinite, Fusinite): i macerali del gruppo inertinite sono caratterizzati da individui a contorni ellissoidali di dimensioni micrometriche che mostrano, al loro interno, una struttura più o meno regolare.

A titolo esemplificativo, nella tabella 5 sono riportate le caratteristiche chimiche relative ad alcuni campioni di carbone Sulcis prelevati nella zona settentrionale del bacino.

Tabella 5. Caratteristiche chimiche in alcuni campioni del Carbone Sulcis [6].

	campione 1	campione 2	campione 3	campione 4
	Seruci T.V.	Seruci Granitello	Tipo R	Tipo P
M.V. totali	34,06%	44,76%	40,40%	40,40%
Ceneri	46,12%	12,32%	38,80%	41,80%
S totale	4,50%	7,18%	5,45%	5,47%
S piritico	2,75%	3,30%	1,62%	1,93%
S solfatico	0,05%	0,12%	0,42%	0,43%
S organico	1,70%	3,76%	3,41%	3,11%
CO2	n.d.	n.d.	7,50%	10,00%
C totale	39,13%	63,72%	42,60%	37,50%
C organico	n.d.	n.d.	40,55%	34,77%
H	2,90%	4,50%	2,40%	2,20%
N	n.d.	n.d.	0,79%	0,78%
Cl	n.d.	n.d.	0,05%	0,05%
Potere Calorifico Superiore [MJ/Kg]	14,19	25,21	16,45	14,96

8.3.2 Altri Minerali

La bibliografia indica che l'analisi microscopica effettuata sui campioni di carbone Sulcis ha consentito di osservare la presenza pressoché costante della pirite.

Questa specie mineralogica è diffusa sia sotto forma di minuscoli e cristalli singoli (dimensioni medie da 2 a 5 micron), sia sotto forma di elementi framboidali singoli o associati (dimensioni fino a 150-200 micron).

Sia i framboidi che i cristalli di pirite possono trovarsi dispersi caoticamente nella matrice carboniosa o secondo allineamenti tra uno strato ed il successivo. Nella vitrinite è comunque concentrato sia lo zolfo piritico sia quello organico sempre presente in concentrazione ben apprezzabile e con un buon grado di omogeneità della distribuzione.

Assai diffusa anche una fase carbonatica costituita da calcite e, in misura inferiore, dolomite, sotto forma di riempimento delle fratture e delle microfessure di contrazione presenti nella Vitrinite.

Si evidenzia, inoltre, la presenza di una fase argillosa (Caolino) sotto forma di sottili letti o come riempimento di celle appartenenti a plaghe inertinitiche.

Subordinatamente è stata osservata la presenza di Quarzo, Gesso ed Ossidi di Fe e Fosfati di Calcio.

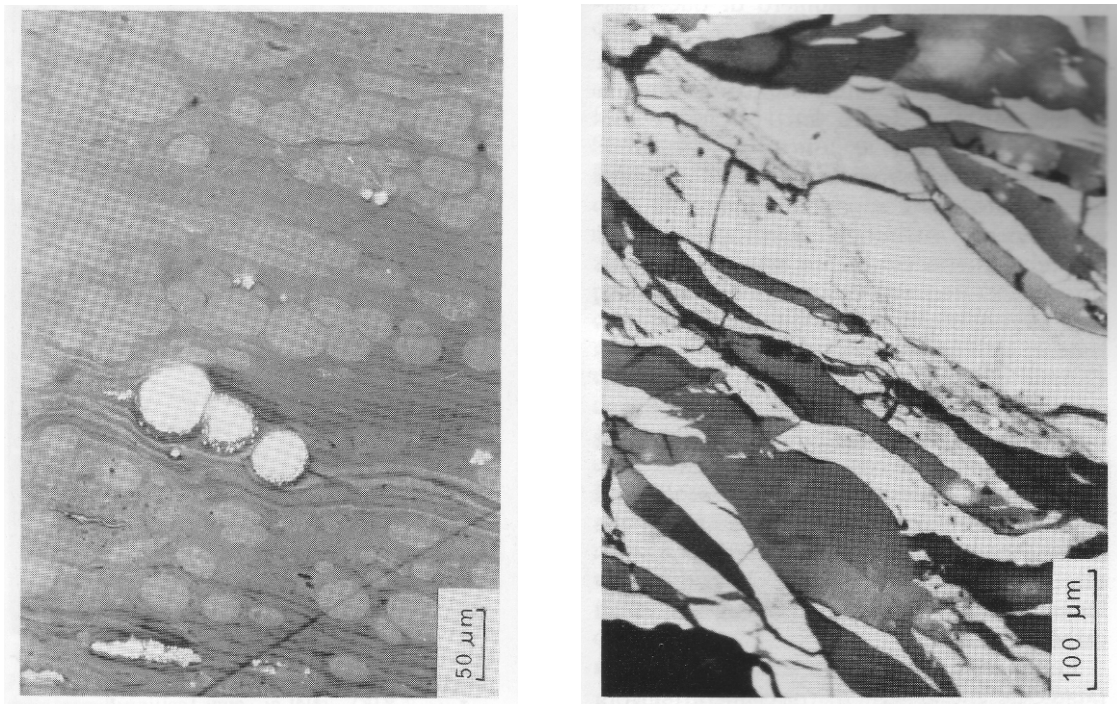


Figura 41

a) Pirite framboideale (160x)

b) Calcite di riempimento nelle fratture della Vitrinite [30].

8.3.3. Zolfo del carbone Sulcis

In relazione a quanto evidenziato precedentemente, risulta evidente come la caratteristica fondamentale del carbone Sulcis sia data dai suoi elevati contenuti in zolfo (S). Il S è un elemento costantemente presente nel carbone la cui presenza, forme e distribuzione dipendono dalla sua genesi e dalle caratteristiche dei paleo-ambienti nei quali è avvenuta la sedimentazione della fase vegetale. In particolare, la bibliografia suggerisce che il S può essere presente in un corpo carbonifero nelle differenti forme di [21]:

1. Zolfo organico, legato al carbonio nei composti organici del carbone;
2. S piritico legato nei solfuri inorganici, essenzialmente pirite con marcassite subordinata;
3. S Solfatico, in particolare del solfato di Ca, la cui quantità è generalmente trascurabile se il carbone non ha subito processi di ossidazione.
4. Zolfo Elementare.

Un aspetto particolarmente importante del bacino del Sulcis risiede nel fatto che la distribuzione dello zolfo dimostra spesso notevoli variazioni sia spazialmente, sia verticalmente, dentro ciascuno strato degli strati carboniferi.

Tale variazione è frequente per i giacimenti parali, nei quali si ritrovano concentrazioni elevate di pirite spesso nelle zone di tetto e di letto dello strato ed in corrispondenza di particolari orizzonti, spesso fossiliferi, che corrispondono a sensibili modificazioni del paleo-ambiente originario.

Le condizioni di microvariabilità a cui è stato sottoposto l'ambiente genetico ha determinato un carbone le cui caratteristiche “variano oltre che da uno strato all'altro, da zona a zona, e particolarmente procedendo da Nord a Sud” [22].

9. UN GIS-DSS PER L'INDIVIDUAZIONE DI AREE IDONEE ALLO STOCCAGGIO DI CO₂ IN SOTTERRANEO

L'analisi dei dati bibliografici ha evidenziato la necessità di creare un sistema che fosse in grado di gestire un elevato numero di informazioni e per di più estremamente eterogenee; dal momento che il processo di iniezione, stoccaggio e monitoraggio della CO₂ in sottterraneo richiede che vengano controllati costantemente diversi parametri naturali che potrebbero influenzare l'intero progetto.

Si è, dunque, pensato a quale potesse essere la tecnologia più idonea in grado non solo di gestire un così elevato numero di informazioni; ma che consentisse anche la produzione di risultati grafici di facile lettura in tempi di calcolo accettabili.

Tali requisiti hanno suggerito la scelta di un DSS (Decision Support System) basato su tecnologia GIS. Tale tecnologia si è dimostrata sempre particolarmente idonea per gestire differenti tipi di informazioni, purché di tipo *spaziale*, come quelle che sono state raccolte durante la prima fase del progetto.

Inoltre, data l'impossibilità di stimare, a priori, l'esatto ammontare del carico di informazioni che potesse influenzare le scelte progettuali, la scelta di un sistema GIS ci mette al sicuro da qualunque evoluzione possa prendere il progetto, grazie alla duttilità dello strumento ed alle sue notevoli capacità di gestione dei dati.

Il DSS, tutt'ora in fase di sviluppo, consentirà inoltre una corretta individuazione, all'interno della regione del Sulcis-Iglesiente, di una o più aree rispondenti ai requisiti di idoneità per lo stoccaggio della CO₂ in sottterraneo e su cui, in fase di dettaglio, indirizzare le ulteriori indagini *in situ*.

Nella versione attualmente funzionante del DSS, i parametri che sono stati inseriti e che sono interrogabili sono:

- morfologia superficiale (ottenuta tramite la creazione di un DTM dell'area in esame);
- geologia superficiale (ottenuta attraverso l'integrazione dei dati d'archivio ed inediti);
- profondità del giacimento (definita sulla base delle interpolazioni dei dati della profondità del tetto del corpo mineralizzato desunte dall'analisi dei dati dei sondaggi disponibili);
- tettonica fragile (desunto dall'andamento planimetrico delle strutture disgiuntive principali a media e piccola scala).

Sulla base di queste informazioni si è potuto procedere allo sviluppo di un modello tridimensionale di un settore della regione che, già in questa fase e nonostante la carenza dei dati dei sondaggi, permette una prima ipotesi di maglia per il posizionamento degli strumenti per il monitoraggio.

La modellizzazione dell'intera area prevedibilmente coinvolta nel processo di stoccaggio sarà di fondamentale importanza se si considera che le condizioni geologiche, quelle mineralogiche e strutturali, influenzeranno sia la scelta del più idoneo sito di stoccaggio della CO₂ in sottosuolo, sia le condizioni di eventuale risalita del *plume*.

9.1 Procedura di realizzazione del DSS

9.1.1 Creazione del DTM

A partire dalle informazioni altimetriche delle curve di livello e dei punti quotati delle CTR della Regione Sardegna (scala 1:10.000) si è proceduto alla costruzione del DTM dell'area in esame.

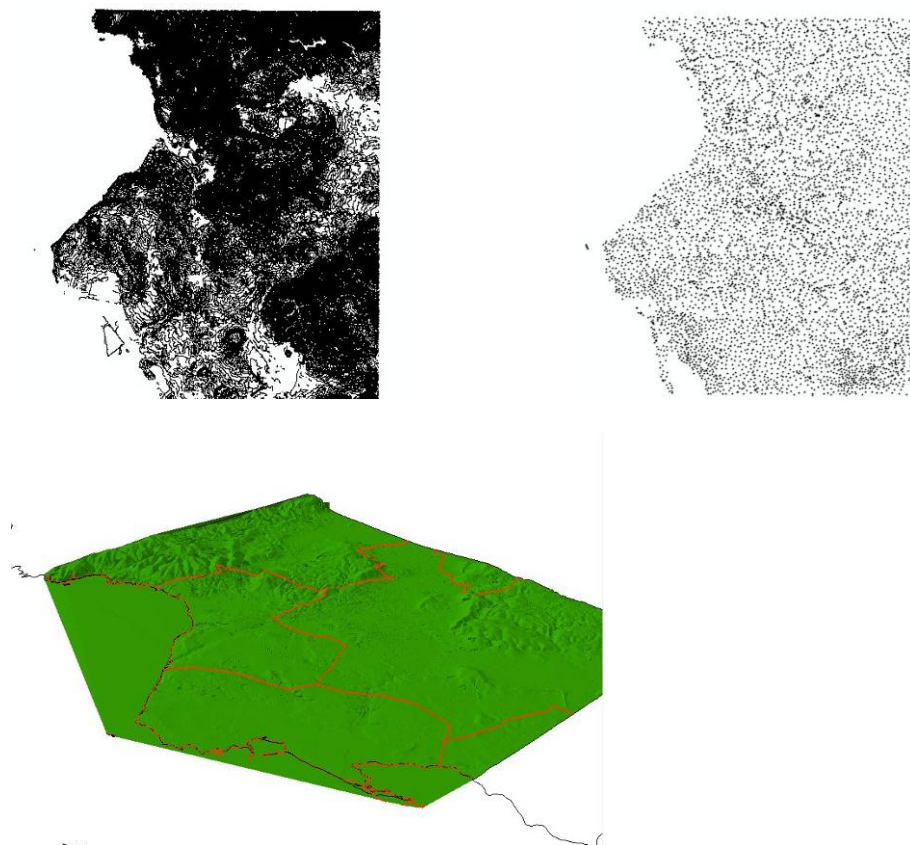


Figura 42. Procedimento di creazione del DTM del bacino carbonifero del Sulcis.

Successivamente, per poter procedere allo studio del territorio di un'area così vasta, si è deciso di fare ricorso ad una suddivisione del territorio in unità elementari attraverso la creazione di una mesh (griglia di punti).

9.1.2 Creazione della MESH

Per la suddivisione del territorio in unità elementari si è deciso di procedere attraverso la realizzazione di un TIN (Triangulated Irregular Network) ottenuta attraverso l'applicazione dell'algoritmo di Delaunay sui punti quotati desunti dalle CTR.

Tale triangolazione fornisce un risultato unico ed indipendente dal punto di innesco (fatto in generale non vero per le griglie a maglia quadrata o rettangolare); inoltre, i triangoli che ne risultano sono per la maggior parte equiangoli e tali per cui una circonferenza che passa per i tre vertici di un triangolo non contiene nessun altro vertice della griglia di punti ottenuta. L'utilizzo di tale algoritmo assicura, definiti i punti di innesco della procedura, l'unicità della suddivisione operata indipendentemente dalla piattaforma di calcolo e/o dal software utilizzato.

In particolare, questo tipo di griglia meglio asseconda le caratteristiche morfologiche del territorio che rappresenta, attraverso un aumento della densità dei triangoli-elementari in corrispondenza delle condizioni morfologiche più disturbate.

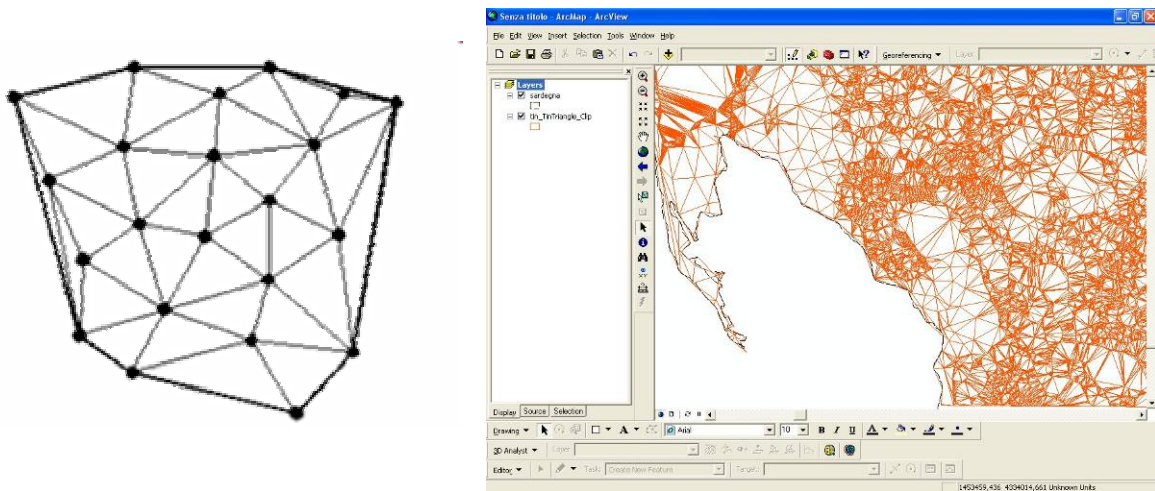


Figura 43. Criteri di scelta della maglia di indagine (mesh).
 a) Schematizzazione dell'algoritmo di Delaunay
 b) Particolare della triangolazione operata sulla regione in studio

La costruzione di un DTM impostato sulla base del TIN realizzato ha consentito, all'interno del GIS-DSS, una suddivisione del territorio in 1.500.000 triangoli circa, ciascuno dei quali caratterizzato da:

FID	Shape *	Slope Pct	Aspect	Index
0	Polygon ZM	19,145721	319,742112	230188
1	Polygon ZM	18,9664	270,400009	228693
2	Polygon ZM	18,128558	283,412358	228695
3	Polygon ZM	0	-1	206767
4	Polygon ZM	0	-1	202085
5	Polygon ZM	12,325754	261,25888	202132
6	Polygon ZM	14,345375	282,289962	206774
7	Polygon ZM	13,875495	267,396585	202126
8	Polygon ZM	16,174436	243,844027	202128
9	Polygon ZM	13,382096	263,176071	206769
10	Polygon ZM	0	-1	206776
11	Polygon ZM	0	-1	202130
12	Polygon ZM	0	-1	202122
13	Polygon ZM	25,834823	295,857201	206785
14	Polygon ZM	21,823577	281,579656	228697
15	Polygon ZM	18,537691	221,187682	206848
16	Polygon ZM	17,546732	269,324951	206798
17	Polygon ZM	12,374052	269,324951	206777
18	Polygon ZM	9,115147	297,107521	206812
19	Polygon ZM	0	-1	202134
20	Polygon ZM	0	-1	206814
21	Polygon ZM	0	-1	206779
22	Polygon ZM	0	-1	206786
23	Polygon ZM	0	-1	202129

- codice numerico univoco di identificazione (INDEX);
- inclinazione della superficie passante per i tre vertici (SLOPE DEG);
- direzione dell'immersione della superficie passante per i tre vertici (ASPECT).

A partire da questo momento ogni elemento territoriale verrà studiato, descritto ed analizzato, facendo ricorso all'elemento triangolo che lo contiene.

9.1.3 Creazione DB degli attributi

Il DB degli elementi triangolari costituisce la base in cui sono andate a confluire tutte le informazioni estrapolate durante il primo step operativo del progetto.

Per prima cosa, si è proceduto all'inserimento dell'informazione geologica desunta dalla Carta Geologica della Sardegna scala 1:200.000 all'interno del database della triangolazione.

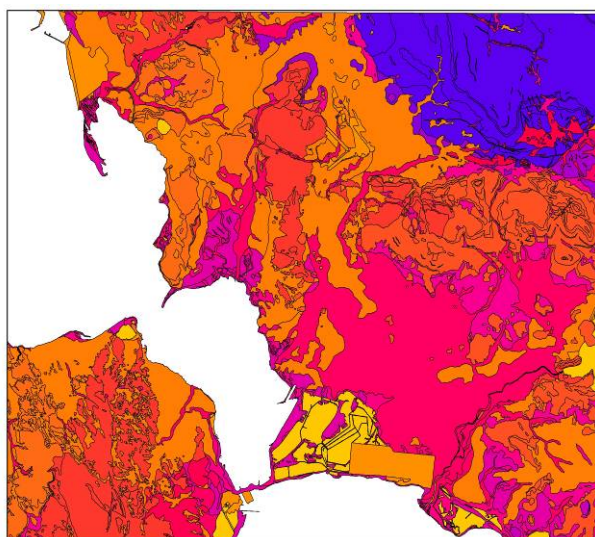


Figura 44. Stralcio della Carta Geologica dell'area (1:50.000)

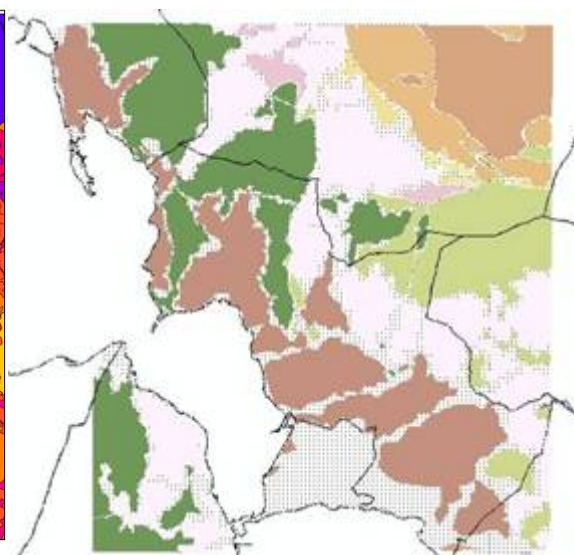


Figura 45. Risultato dell'importazione dell'informazione geologica nel GIS-DSS



Figura 46. Ubicazione spaziale strutture tettoniche.

Il risultato così ottenuto consente la produzione di una carta in cui a ciascun elemento-terreno triangolare è associato, attraverso un'opportuna scala cromatica, a una litologia.

Per evidenti motivazioni di logica informatica si è deciso di non attribuire alcuna geologia ai triangoli che ricadono all'intersezione tra due *facies* geologiche differenti, per non creare problemi di non corretta interpretazione delle informazioni geologiche.

Tale scelta è, ovviamente, in accordo con l'ipotesi che elementi territoriali al contatto tra due specie litologiche distinte saranno probabilmente delle zone di contatto in cui sono presenti fenomeni di discontinuità e quindi da considerare in fase di progettazione della rete di monitoraggio, dal momento che potrebbero rappresentare vie preferenziali di fuga per la CO₂.

Successivamente, per poter costruire un modello tridimensionale del corpo carbonifero all'interno del dominio di studio, è stato predisposto un DB nel quale sono stati inseriti, per ciascun sondaggio disponibile, tutte le informazioni inerenti l'identificazione, la posizione geografica della sua intestazione, le profondità del tetto e del letto del "Produttivo" [24].

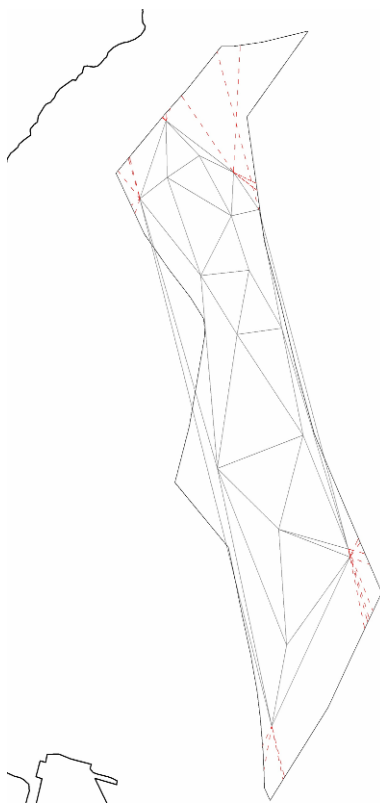


Figura 47. Procedimento geometrico per l'infittimento della maglia di campionatura reale in un dei 27 sottodomini.

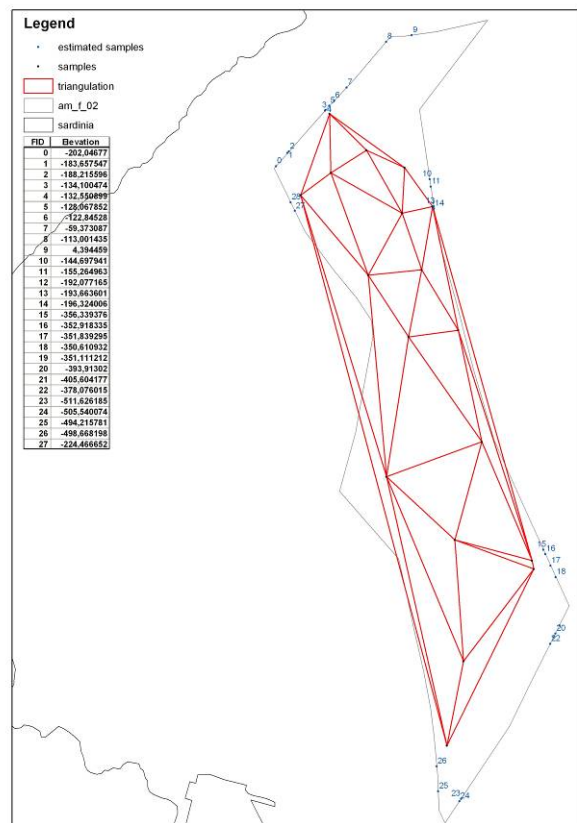


Figura 48. Rappresentazione grafica di punti reali e punti stimati per un sottodominio pilota.

Poiché le condizioni strutturali nelle quali ricorre il giacimento vietano l'esecuzione di un'interpolazione spaziale dei dati provenienti da tutti i sondaggi effettuati nell'area, sono stati importati all'interno del sistema GIS anche i dati di localizzazione geografica delle strutture

principali, secondarie [14, 23, 24] oltrechè di quelle minori desunte dall'analisi della cartografia geologico-strutturale esistente.

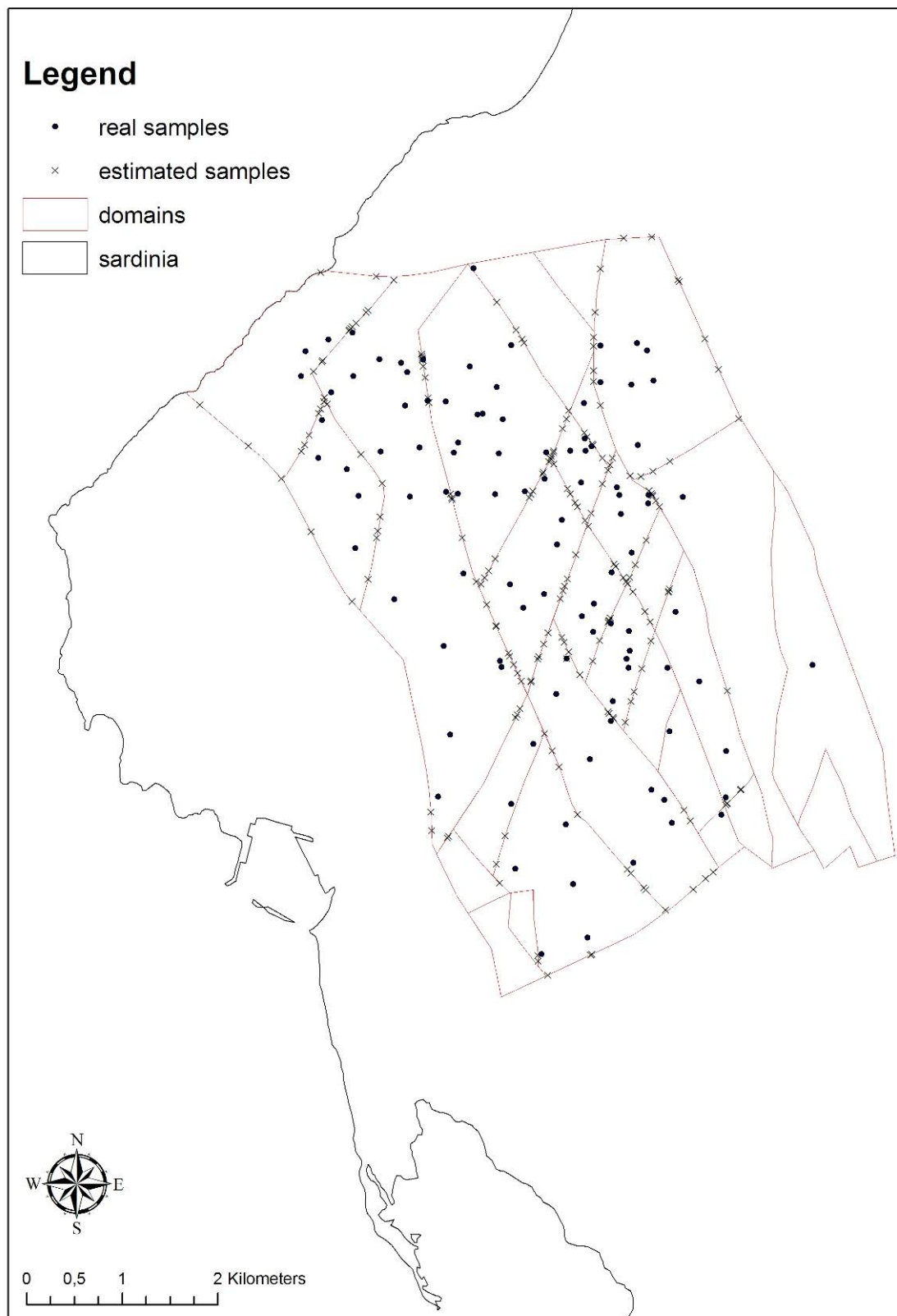


Figura 49. Rappresentazione dei punti utilizzati per la costruzione del modello 3D del “Produttivo”.

È ovvio che, trascurare gli effetti prodotti dalla tettonica sul corpo minerario avrebbe portato, irrimediabilmente, a gravissimi errori nei risultati della modellizzazione tridimensionale.

La fase sopradescritta di importazione dati nel GIS ha permesso di suddividere l'intero dominio del bacino in 27 sottodomini spaziali in ciascuno dei quali, per omogeneità dei dati, è diventato lecito effettuare una interpolazione dei dati puntuali ivi ricadenti.

Poiché, però, il numero di dati puntuali disponibili era assai limitato, è stata messa a punto ed applicata una procedura geometrica di infittimento dei dati reali [27] (Figure50-51).

Tale procedura ha consentito di passare dai 102 punti reali ad un totale di 301 punti (Figura 49).

Sfruttando le informazioni del dataset così costruito si è proceduto alla costruzione del modello digitale del "Produttivo". Nella figura 50 è mostrato il confronto tra il risultato grafico ottenuto attraverso la realizzazione di un TIN tra tutti i punti disponibili ed il TIN ottenuto interpolando solo i punti ricadenti all'interno di ogni sottodominio strutturale.

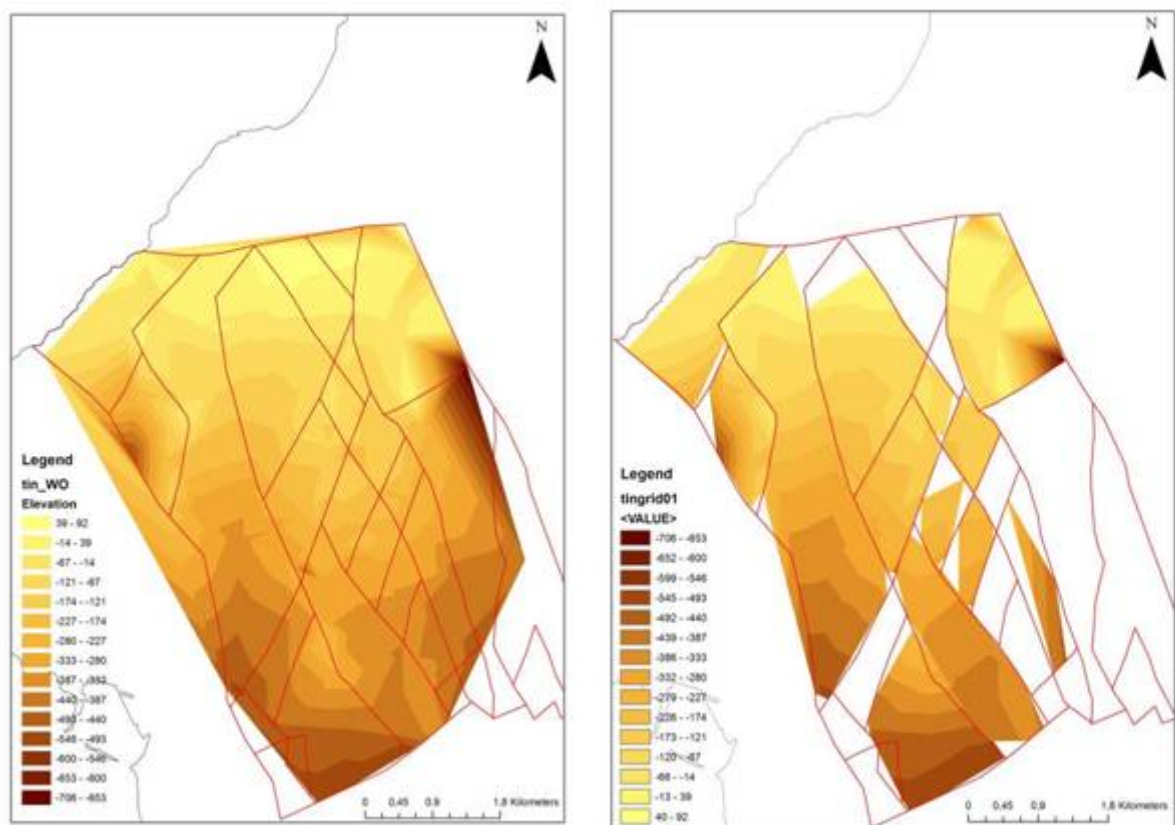


Figura 50 a,b. Confronto tra il risultato ottenuto attraverso l'utilizzo di tutte le informazioni disponibili e quello ottenuto attraverso l'interpolazione delle sole informazioni ricadenti in ciascun sottodominio spaziale.

Attraverso un'attenta lettura della Figura 50 b, al confine tra sottodomini contigui, è possibile ricavare alcune importanti informazioni sull'entità delle deformazioni tettoniche prodotte sul "Produttivo" (per esempio i rigetti) attraverso l'identificazione di eventuali strutture precedentemente non riconosciute.

9.2 Risultati conseguiti

L'utilizzo delle tecnologie GIS (descritte in precedenza) unitamente alla creazione di un DB degli attributi e dei modelli 2d e 3d del corpo minerario, ha consentito la realizzazione di un Sistema di Supporto alle Decisioni che consente di interrogare le informazioni raccolte attraverso delle *query* basate sul linguaggio standard per i DB: SQL.

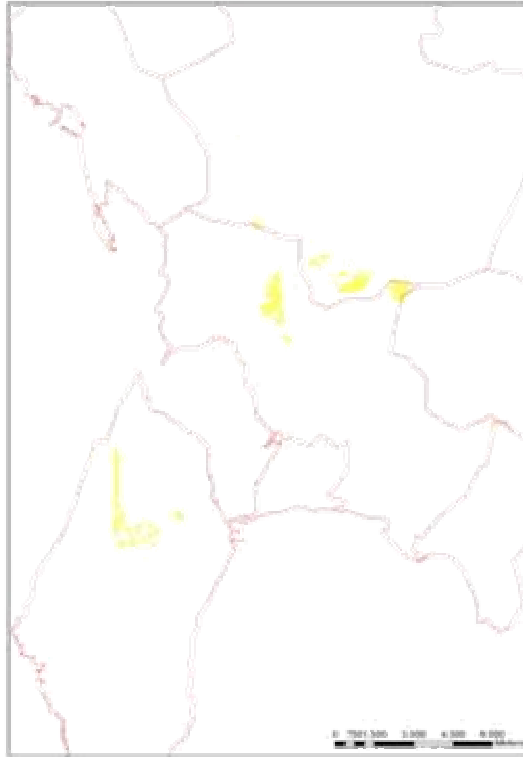


Figura 51. Risultato di un'interrogazione agli attributi del DB del DSS

Il vantaggio principale offerto da un sistema di questo tipo è rappresentato dalla possibilità di ampliare (teoricamente all'infinito) il numero di parametri gestibili e/o la quantità delle informazioni senza dover apportare alcuna modifica all'infrastruttura del sistema. Inoltre, lavorando direttamente sulla base cartografica numerica, è possibile effettuare delle interrogazioni ai dati memorizzati ottenendo dei risultati georeferenziati (figura 51).

9.3. Sviluppi futuri

Sulla scia dei risultati che sono stati ottenuti finora, lo studio evolverà essenzialmente ad ottenere i seguenti risultati:

- creazione di un modello 3D dell'intera serie stratigrafica del bacino carbonifero;
- messa a punto ed inserimento nel DSS di una idonea parametrizzazione per le caratteristiche di permeabilità/porosità delle rocce incassanti;
- messa a punto ed inserimento nel DSS di una idonea parametrizzazione per le caratteristiche geotecniche e geomeccaniche delle rocce presenti;

- definizione di appositi algoritmi di ranking che, basandosi sulle esperienze condotte a livello internazionale, consentano l'individuazione di aree che rispondano ai requisiti di idoneità per lo stoccaggio di CO₂;
- definizione di un modello di previsione della risalita della CO₂ iniettata all'interno degli strati geologici che tenga conto delle caratteristiche minero-petrografiche del serbatoio e delle rocce incassanti.

La realizzazione dei punti sopra citati rappresenterà, inevitabilmente, la base su cui progettare la più idonea maglia di monitoraggio ambientale.

9.4. Criticità

L'ottenimento dei risultati sperati necessita, tuttavia, del superamento delle criticità già emerse durante le prime fasi della ricerca.

Tali criticità riguardano essenzialmente la carenza di dati recenti ed affidabili relativi all'area in esame (principalmente logs di sondaggi, analisi chimiche sulle rocce, analisi mineralogiche sul carbone, ecc...), su cui poter affinare le conoscenze, sviluppare e calibrare le procedure di modellizzazione.

10. TECNICHE DI MONITORAGGIO AMBIENTALE

Anzitutto, prima di procedere allo sviluppo di un progetto ECBM occorre che l'idoneità del sito sia comprovata per un periodo di tempo ragionevolmente lungo. Le informazioni sullo stato pre-iniezione dovranno fornire il quadro iniziale al quale riferirsi per controllare l'accettabilità ambientale del progetto durante il periodo di esercizio e alla cessazione dell'attività.

Per quanto riguarda gli aspetti tecnici, esperimenti preliminari di monitoraggio potranno permettere di tarare e validare i modelli di simulazione utili per sorvegliare in tempo reale o con controlli ravvicinati lo svolgimento del processo ECBM e verificarne la rispondenza con le previsioni progettuali.

La conoscenza dettagliata della situazione di partenza e l'analisi revisionale delle modificazioni introdotte dal progetto dovranno essere utilizzate per una efficace e convincente comunicazione al pubblico e per fornire le necessarie assicurazioni che la situazione sarà oggetto di attento controllo al fine di ridurre entro limiti ragionevoli il rischio connesso all'operazione, attraverso il piano di monitoraggio.

Il monitoraggio ambientale della CO₂ sequestrata rappresenta un aspetto di fondamentale importanza sia per quanto riguarda la salvaguardia dell'ambiente, ma anche per la tutela degli esseri viventi direttamente esposti.

Per questi motivi, la definizione di un idoneo piano di monitoraggio ambientale costituisce uno dei requisiti richiesti dalla legge per la concessione dei permessi di iniezione della CO₂ in sotterraneo.

La definizione delle più idonee soluzioni di monitoraggio può consentire, oltre alla protezione dell'ambiente e della salute, anche di:

- riconoscere, in tempo reale, la posizione del plume della CO₂ iniettata;
- valutare le eventuali perdite dei pozzi di iniezione e di estrazione in attività e/o di quelli abbandonati;
- misurare la quantità di fluido iniettato e, quindi, stimare la capacità residua del serbatoio;
- assicurare che le risorse naturali (come ad esempio le falde acquifere e gli ecosistemi) non entrino in contatto con concentrazioni dannose di CO₂;
- valutare gli impatti prodotti sull'intera biosfera;
- consentire, nel caso in cui si verificano problemi o situazioni di emergenza, di mettere in atto procedure di intervento immediato e di studiare idonee soluzioni di bonifica.

Al proposito occorre tener presente che, nonostante le precauzioni assunte nelle fasi di elaborazione e di realizzazione del progetto, la seconda legge della termodinamica lascia aperta la possibilità che non tutta la CO₂ iniettata resterà permanentemente sotto sequestro nel serbatoio.

L'entropia cui fatalmente ogni sistema è sottoposto comporta sempre l'evoluzione del sistema verso condizioni caratterizzate da un maggior grado di disordine e opera quindi in senso contrario al mantenimento della situazione stabile. E' pertanto verosimile che si registrino nel tempo movimenti di gas all'interno delle formazioni geologiche ospitanti e perdite all'esterno sia sotto forma di fughe di gas sia in soluzione nelle acque circolanti.

Essendo il metano un "gas serra" notevolmente più potente, è evidente che oltre alle fughe di CO₂ occorre tenere sotto controllo anche e soprattutto i rilasci di CH₄ il quale, tra l'altro, essendo meno viscoso, ha una maggiore mobilità e tende a sfuggire più facilmente.

Sul piano pratico, tuttavia, la valutazione delle perdite di CO₂ può essere resa problematica dalla difficoltà di distinguere la quantità di CO₂ rilasciata dal serbatoio da quella presente nei suoli, nell'acqua e nell'aria per effetto di processi naturali.

La discriminazione tra le due sorgenti di gas potrà essere risolta ricorrendo alla spettrometria di massa capace di fornire il rapporto tra la quantità di isotopo ¹³C e il carbonio totale, diverso nei due casi.

Poiché dal momento della cessazione dell'immissione di CO₂ ci si deve aspettare che la pressione nello strato serbatoio rimanga costante, la registrazione delle variazioni di questa grandezza fisica permetterà di segnalare eventuali rilasci o lo svolgimento di reazioni consumatrici di CO₂ (carbonatazione di sostanze minerali presenti nelle formazioni geologiche interessate).

Altre tecniche di monitoraggio potranno riguardare l'uso di traccianti e il ricorso a ispezioni visive in superficie quali l'osservazione di cambiamenti nell'aspetto della vegetazione, la formazione di bolle di gas attraverso corpi d'acqua superficiali o l'accertamento di modificazioni anomale della risposta di pozzi vicini.

In ogni caso affinché il monitoraggio fornisca risposte chiare occorrerà preventivamente definire i valori di fondo ai quali comparare i risultati delle rilevazioni durante e, per un periodo sufficientemente lungo, dopo la conclusione delle operazioni.

Questi valori di fondo dovranno essere acquisiti su base stagionale a diverse profondità e serviranno per la costruzione di un bilancio di massa utile per isolare le quantità dovute a fughe dal serbatoio da quelle riconducibili a decomposizione di sostanze organiche o ad altri processi naturali compatibili con l'ambiente.

Poiché i traccianti aggiunti alla CO₂ iniettata rappresentano un valido aiuto per una più sicura comprensione dei fenomeni e della loro evoluzione nel tempo è opportuno soffermarsi sui criteri di scelta al fine di ottenere risposte affidabili.

Infatti la semplice analisi del contenuto di anidride carbonica nello strato di aria prossimo alla superficie non appare significativa, dal momento che la concentrazione di CO₂ al suolo (mediamente intorno a 330 ppm) è soggetta a notevoli variazioni anche di breve periodo in relazione alle mutevoli condizioni climatiche e ad altri fattori (attività delle piante, emissioni fisiologiche etc.). L'analisi della concentrazione di CO₂ potrebbe mettere in evidenza solo rilasci importanti e improvvisi, mentre sfuggirebbero le perdite lente la cui entità rientrerebbe nell'intervallo delle variazioni normali (± 20 ppm).

I traccianti possono essere di tipo radioattivo o di tipo chimico. Escludendo i primi il cui uso potrebbe suscitare inutili allarmismi ed essere percepiti sfavorevolmente dal pubblico, i traccianti chimici, analizzabili con grande precisione grazie alla sensibilità dei moderni strumenti fissi o portatili, sono senza dubbio da preferire.

La quantità di tracciante necessaria dovrà essere stabilita in relazione all'ampiezza del serbatoio di sequestro, la porosità e permeabilità dello strato, i limiti analitici degli strumenti di misura, il peso molecolare del tracciante e altri fattori.

Poiché la risposta del tracciante dipende dall'uniformità spaziale della sua distribuzione è necessario che esso venga immesso fin dall'inizio dell'operazione, con un dosaggio costante rispetto alla quantità di CO₂ iniettata.

Il tracciante ideale deve presentare i seguenti requisiti:

- stabilità nelle condizioni ambientali del sottosuolo (chimismo, temperatura, pressione)
- quantità minima misurabile
- specificità e sensibilità all'analisi
- concentrazione di fondo molto bassa o nulla
- bassa suscettibilità a interferenze
- trascurabile alterabilità chimica
- buona resistenza alla biodegradazione
- mobilità vicina a quella della CO₂
- basso costo
- facile reperibilità

In questo quadro, l'attenzione si è indirizzata verso i composti alogenati organici o inorganici (quali: esafluoruro di zolfo SF₆, diclorodifluorometano CF₂Cl₂, clorotrifluorometano CF₂Cl, tetrafluorometano CF₄, trifluorometano CHF₃) che tra l'altro sono facili da analizzare con tecniche gascromatografiche.

Recentemente si è preso in considerazione anche l'argon come tracciante per evidenziare il movimento del gas sequestrato in sottosuolo.

Naturalmente l'attendibilità delle indicazioni fornite dal tracciante dipendono dall'accuratezza con cui si conoscono le sue caratteristiche di mobilità rispetto a quelle dei gas oggetto del monitoraggio. Sfortunatamente questa conoscenza è ancora scarsa.

Da osservare per inciso che l'esafluoruro di S è a sua volta un gas serra oltre 23000 volte più potente per unità di massa della stessa CO₂ e pertanto andrebbe usato con cautela.

Tabella 6. Analisi delle differenti strategie di monitoraggio ambientale [19].

Monitoring approaches for geologic storage of CO₂.

Parameter	Monitoring Approaches
CO ₂ plume location	<ul style="list-style-type: none"> • 2 and 3-D seismic reflection surveys • Wellbore to surface and cross wellbore seismic measurements • Electrical and electromagnetic methods • Land surface deformation using satellite imaging (InSar) or tiltmeters • Gravity • Reservoir pressure monitoring • Wellhead and formation fluid sampling • Natural and introduced tracers
Providing early warning that a storage site may be failing	<ul style="list-style-type: none"> • 2 and 3-D seismic reflection surveys • Wellbore to surface and cross wellbore seismic measurements • Land surface deformation using satellite imaging (InSar) or tiltmeters • Injection well and reservoir pressure monitoring
CO ₂ concentrations and fluxes at the ground surface	<ul style="list-style-type: none"> - Real-time IR based detectors for CO₂ concentrations - Air sampling and analysis using gas chromatography or mass spectrometry - Eddy flux towers - Monitoring for natural and introduced tracers
Injection well condition, flow rates and pressures	<ul style="list-style-type: none"> • Borehole logs, including casing integrity logs, noise logs, temperature logs, and radiotracer logs • Wellhead and formation pressure gauges • Wellbore annulus pressure measurements • Orifice or other differential flow meters • Surface CO₂ concentrations near the injection wells
Solubility and mineral trapping	<ul style="list-style-type: none"> • Formation fluid sampling using wellhead or downhole samples - analysis of CO₂, major ion chemistry and isotopes • Monitoring for natural and introduced tracers, including partitioning tracers
Leakage up faults and fractures	<ul style="list-style-type: none"> • 2 and 3-D seismic reflection surveys • Wellbore to surface and cross wellbore seismic measurements • Electrical and electromagnetic methods • Land surface deformation using satellite imaging (InSar) or tiltmeters • Reservoir and aquifer pressure monitoring • Groundwater and vadose zone sampling
Groundwater quality	<ul style="list-style-type: none"> • Groundwater sampling and geochemical analysis from drinking water or monitoring wells • Natural or introduced tracers
CO ₂ concentrations in the vadose zone and soil	<ul style="list-style-type: none"> • Soil gas surveys and gas composition analysis • Vadose zone sampling wells and gas composition analysis
Ecosystem impacts	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperspectral geobotanical monitoring • Soil gas surveys • Direct observation of biota
Microseismicity	<ul style="list-style-type: none"> • Passive seismic monitoring using single and multi-component seismometers

Alla prova pratica, nessun composto è stato finora usato con successo come tracciante in operazioni ECBM con iniezione e sequestro di CO₂.

Per migliorare l'affidabilità delle indicazioni basate su traccianti si conta molto sulla solubilità dei composti fluorurati nella CO₂ che dipende dalla densità di quest'ultima; per raggiungere un elevato potere dissolvente nei confronti del tracciante la CO₂ deve essere sequestrata allo stato supercritico.

Per quanto riguarda la quantità specifica di tracciante da utilizzare è raccomandabile un dosaggio elevato (fino a oltre 2000 volte la quantità minima misurabile) per compensare le possibili perdite per adsorbimento o altri fenomeni.

Nella tabella 6 [19] sono riassunte, per ciascun ambito di ricerca associato al sequestro geologico della CO₂, le differenti tecniche di monitoraggio attualmente utilizzate in campo internazionale.

10.1. Proposta di monitoraggio per il Bacino Carbonifero del Sulcis

Come già evidenziato in precedenza, le caratteristiche geologico-strutturali dell'area in esame sono assai peculiari: l'esistenza di un complesso campo di fratture che percorre interamente il bacino sulcitano, rappresenta uno dei vincoli maggiori alla possibilità di immagazzinare grandi quantità di CO₂ in sottosuolo.

Proprio per questo motivo risulta necessario prevedere una rete di monitoraggio in grado di seguire, con sufficiente precisione, l'evoluzione spazio-temporale delle caratteristiche del *plume*, valutare l'entità delle eventuali modificazioni prodotte nell'ambiente da parte della CO₂ iniettata nel sottosuolo e rilevare eventuali perdite.

In generale, quindi, per garantire il raggiungimento degli obiettivi richiesti dal monitoraggio, la soluzione progettuale più idonea dovrà:

- consentire un buon grado di dettaglio delle informazioni acquisite (dovranno, cioè, essere evitati nella maglia di monitoraggio pericolosi "buchi" e inutili ridondanze il cui unico effetto sarebbe quello di causare un aumento dei costi di indagine senza produrre alcun miglioramento nella conoscenza dei fenomeni);
- essere definita in relazione alle caratteristiche dell'area interessata (disposizione e numero dei pozzi di iniezione ed estrazione, presenza di aree di alterazione-fessurazione-fratturazione delle rocce incassanti, presenza di risorse naturali da tutelare, ecc...);
- sfruttare l'uso combinato di più tecniche in modo da garantire i migliori risultati;
- essere pianificata sulla base di opportuni intervalli temporali in modo da individuare l'insorgere di condizioni di pericolo prima che queste determinino gravi ripercussioni ambientali.

A livello internazionale i metodi più utilizzati per monitorare gli ambienti coinvolti nei processi di iniezione di CO₂ includono principalmente tecniche di tipo geochimico e geofisico mentre per la valutazione dei mutamenti prodotti in superficie dai gas iniettati si sono affermate tecnologie quali la Scansione Laser (LIDAR) e/o il telerilevamento satellitare (remote sensing).

Ciascuna delle tecniche di monitoraggio disponibili, pur consentendo di ottenere un gran numero di informazioni, non potrà mai garantire la conoscenza globale di tutti i parametri relativi allo stato del fluido iniettato ed alle condizioni di salute del serbatoio.

Per questo motivo, per il piano di monitoraggio del Test Site, la scelta ottimale risulta quella di soluzione *mista* in grado, quindi, di poter valutare efficacemente il numero più elevato possibile di parametri e di indicatori di qualità ambientale.

Procedendo nel senso del grado di dettaglio crescente, una rete di monitoraggio ambientale efficace potrà prevedere:

- Tecniche di Remote Sensing
- Tecniche Geofisiche
- Tecniche Geochimiche CO₂
- Analisi chimiche
- Osservazioni in situ

10.1.1 Tecniche di Remote Sensing

Per le analisi a grande scala esiste la possibilità di sfruttare le tecniche di analisi di dati satellitari (remote sensing). Attraverso, quindi, lo studio delle condizioni con cui un punto sulla superficie terrestre emette e/o riflette una radiazione elettromagnetica è possibile ottenere informazioni utili circa le caratteristiche del punto stesso.

Oltre a poter utilizzare i dati rilevati dai sensori dei satelliti attualmente in orbita in grado di rilevare le frequenze dell'infrarosso (come ad esempio i satelliti LANDSAT 7+), il 24 febbraio u.s. la NASA ha dato il via alla missione OCO (Orbiting Carbon Observatory) [III] nell'ambito della quale verrà portata in orbita una costellazione di satelliti specifici per lo studio delle emissioni e delle concentrazioni di gas serra in atmosfera.

Il sistema OCO sarà in grado di misurare le concentrazioni di CO₂ con una precisione, una risoluzione spazio-temporale e una copertura a terra, ottimali per individuare sorgenti e perdite di CO₂.

Le misurazioni verranno effettuate attraverso l'acquisizione dei dati relativi a 3 bande del NIR (near infrared) attraverso 3 spettrometri in grado di misurare l'assorbimento della luce solare riflessa dalla CO₂ (nelle lunghezze d'onda 1.61 e 2.06 μm) e dall'O₂ (nella lunghezza d'onda 0.76 μm). Queste misure, analizzate attraverso appositi algoritmi di remote sensing, possono produrre delle stime assai precise del contenuto di CO₂ presente in atmosfera.

Il costo dei dati satellitari su cui basare le suddette analisi si aggira, a seconda del sensore utilizzato e della dimensione del dato, tra i 600 \$ ed i 1200 \$ con una risoluzione spaziale compresa tra 1 e 1000 metri.

10.1.2 Tecniche Geofisiche

Nei campi di ricerca associati ai processi di sequestro geologico della CO₂, i metodi di monitoraggio che si basano sulle tecniche geofisiche possono consentire di acquisire informazioni circa il movimento del *plume* verso aree non coperte dalla rete di monitoraggio oppure di incrementare il dettaglio delle informazioni tra pozzi e/o oltre la zona di influenza di ciascun pozzo.

Le tecniche analitiche geofisiche permettono, attraverso misurazioni non-invasive e non-distruttive di una grandezza misurabile dalla superficie, di valutare la variazione spazio-temporale delle condizioni del *plume*.

A livello internazionale vengono utilizzati prevalentemente gli studi sismici, elettrici e gravimetrici:

- attraverso gli studi sismici, procedendo allo studio delle modalità di riflessione, rifrazione o della variabilità della velocità di propagazione di onde sismiche artificialmente prodotte, si sfruttano tecniche tomografiche per ottenere una ricostruzione della posizione del *plume* iniettato all'interno del serbatoio;
- gli studi elettrici consentono, attraverso misure di resistività realizzate attraverso appositi quadripoli elettrici, la definizione delle caratteristiche intrinseche del *plume* del gas iniettato;
- le tecniche gravimetriche, valutando le anomalie nella gravità locale, possono consentire di definire eventuali condizioni di microvariabilità e di rilevare eventuali anomalie nella distribuzione del *plume*.

Il monitoraggio geofisico finalizzato all'applicazione della tecnologia ECBM nel bacino carbonifero del Sulcis, potrebbe essere attuato, mediante l'applicazione di tecniche sismiche 3D "*time lapse*".

Tale tecnica viene efficacemente applicata per il controllo, nel tempo, delle caratteristiche petrofisiche delle formazioni geologiche che costituiscono il giacimento in cui è avvenuto il sequestro della CO₂.

Infatti, le variazioni di saturazione delle formazioni geologiche che costituiscono il giacimento ne influenzano le caratteristiche elastiche (V_p, V_s, V_p/V_s, contrasti d'impedenza acustica tra discontinuità geologiche o discontinuità di caratteristiche meccaniche entro lo stesso materiale).

Pertanto, la sismica 3D "*time lapse*" ha lo scopo di identificare le suddette variazioni mediante l'acquisizione di dati sismici a riflessione ripetuta nel tempo e mediante la successiva accurata analisi degli attributi sismici (ampiezza, frequenza, attenuazione dei segnali sismici in relazione alle caratteristiche dei *reservoir*) da attuarsi mediante software sismico specialistico di ultima generazione, lo stesso utilizzato nel settore della ricerca degli idrocarburi.

E', comunque, da osservare che l'applicazione di tale tecnica comporta talvolta, delle difficoltà, tra cui quella della non perfetta riproducibilità dell'acquisizione dei dati che difficilmente può avvenire nelle medesime condizioni (es. variazione del disturbo ambientale, generalmente di natura stocastica). Infatti, come è noto agli addetti ai lavori, difficilmente campagne sismiche effettuate in tempi diversi, per quanto nella stessa area, possono svolgersi nelle medesime condizioni ambientali.

La variazione di queste ultime può influenzare il rapporto segnale/disturbo, rendendo critica la valutazione del fatto che le variazioni del segnale sismico siano dovute esclusivamente alle variazioni delle caratteristiche petrofisiche dei materiali geologici prima e dopo l'iniezione della CO₂. Pertanto, un progetto di monitoraggio con la tecnica 3D "*time lapse*" presuppone una preliminare caratterizzazione sismica del sottosuolo.

Quest'ultima potrebbe essere attuata mediante rilievi sismici 2D, più speditivi ed economici rispetto ai 3D, finalizzati allo studio delle risposte sismiche dei vari terreni costituenti il

sottosuolo del Bacino Carbonifero in cui si dovrà attuare il Progetto ed all'analisi delle relazioni tra segnali sismici e caratteristiche fisiche delle rocce.

I rilievi sismici 2D finalizzati ad analizzare nel dettaglio le risposte sismiche delle formazioni geologiche del sottosuolo al fine di poter valutare le potenzialità della tecnica sismica 3D *time lapse* nel monitoraggio del giacimento, dovrebbero essere attuati utilizzando fonti di energia convenzionale (esplosivi) ed effettuando, in fase di acquisizione dei dati, vari test finalizzati a selezionare alcuni parametri fondamentali che influenzano, in modo particolare, il rapporto segnale/disturbo nei record sismici a riflessione, tra questi principalmente:

- Offset della traccia più vicina (*minimum offset*)
- Offset della traccia più lontana (*maximum offset*)
- Geometria degli stendimenti
- Intervallo tra gli array di geofoni
- Ordine di copertura orizzontale
- Passo di campionatura ed eventuali filtri *antialiasing*
- Filtri *low-cut*
- Lunghezza della registrazione in funzione degli obiettivi dell'indagine
- Configurazione del *pattern* di geofoni
- Frequenza propria dei geofoni
- Profondità della carica
- Entità della carica

Tali parametri stabiliti, in via preliminare, mediante i rilievi 2D, saranno essenziali per poter progettare in modo ottimale l'acquisizione sismica 3D con la successiva applicazione della tecnica "*time lapse*".

L'acquisizione dei dati sismici nella banda di frequenza più larga possibile e con l'obiettivo primario di enfatizzare il rapporto segnale/disturbo consente di utilizzare sofisticate metodologie di trattamento ed interpretazione dei dati basate sull'analisi accurata degli attributi sismici (ampiezze, polarità, geometria e frequenze caratteristiche dei segnali sismici riflessi, *wavelet processing*).

L'effetto di ogni singolo parametro sul carattere dei segnali sismici riflessi dovrà essere attentamente valutato anche alla luce delle caratteristiche note o prevedibili delle diverse superfici di discontinuità di impedenza acustica (orizzonti sismici) presenti nel sottosuolo dell'area di indagine.

Tale valutazione dovrà essere fatta nel modo più oggettivo possibile sulla base delle velocità reali o apparenti, lunghezze d'onda, contenuto in frequenza dei segnali, ecc...., utilizzando *packages* sismici specialistici di ultima generazione, normalmente utilizzati nella ricerca petrolifera.

Alcuni di tali *packages*, installati su specifico hardware in dotazione all'unità operativa di geofisica del Dipartimento di Geingegneria e Tecnologie Ambientali dell'Università di Cagliari, sono stati utilizzati con successo, nell'ambito di programmi di rilevante interesse nazionale (PRIN) finanziati dal MIUR, per il trattamento dei dati sismici a riflessione acquisiti dalla citata unità operativa nella Sardegna meridionale, centrale ed in altre aree caratterizzate da contesti geologici simili a quelli d'interesse per il progetto in argomento [32, 33, 34].

Considerando gli obiettivi del progetto, dovranno essere attentamente valutati non solo i parametri operativi sopra menzionati, ma anche altri tre parametri che, nonostante non siano operativi, incidono fortemente sui risultati finali ed in particolare sulla migrazione dei dati e sull'efficacia del responso sismico nella fase di elaborazione finalizzata sia all'interpretazione sismo-stratigrafica sia alla definizione delle caratteristiche petrofisiche delle rocce.

Tali parametri sono:

- *Orientamento delle linee sismiche*: Scelto sulla base degli obiettivi dell'indagine e dell'assetto geologico-strutturale dell'area. L'orientamento delle linee sismiche rispetto ai lineamenti tettonici dell'area, rappresenta uno dei parametri esplorativi di maggior interesse nella fase interpretativa finale.
- *Lunghezza delle linee sismiche*.
- *Spaziatura tra le linee*: La spaziatura tra le linee deve essere scelta in modo da evitare che un possibile obiettivo d'interesse geo-giacimentologico, sfugga all'indagine sismica preliminare.

La scelta di tutti i parametri sopra menzionati deve essere basata su considerazioni fisiche che tengano conto del problema esplorativo del sottosuolo, legato allo stoccaggio della CO₂, soddisfacendo i requisiti necessari per l'elaborazione dei dati e per la loro interpretazione.

La scelta di tutti i parametri precedentemente menzionati (operativi e non), da realizzare, prevalentemente, nella fase dei rilievi 2D, fornirà un contributo sostanziale per la progettazione ottimale dei rilievi 3D. I dati sismici 2D, dovranno essere calibrati mediante dati stratigrafici di sondaggio.

Tra i sondaggi, opportunamente localizzati nelle zone d'interesse prioritario, individuate sulla base dei risultati dei rilievi sismici 2D, si realizzeranno misure sismiche in foro di tipo *cross-hole* (es. tomografie), al fine di un'ulteriore calibrazione dei dati e del completamento dell'indagine conoscitiva finalizzata all'acquisizione dei dati sismici 3D, prima e dopo l'iniezione della CO₂.

Inoltre, lo studio delle risposte sismiche attuabile, in via preliminare, mediante l'analisi dei segnali sismici 2D e delle caratteristiche fisico-meccaniche delle formazioni geologiche, costituirà la base di conoscenza indispensabile per poter valutare l'applicabilità della tecnica sismica 3D *time lapse* nel particolare contesto geo-giacimentologico in studio, prevedendo, ove possibile, la percentuale di successo dell'applicazione.

L'operazione di calibrazione dei dati sismici e la conoscenza delle risposte sismiche sarà fondamentale per l'interpretazione dei dati 3D *time lapse*, in quanto un confronto fra le varie annate sarà possibile se tali informazioni saranno imputabili unicamente all'evoluzione nel tempo delle proprietà petrofisiche delle rocce serbatoio.

I metodi geosismici possono essere integrati con l'applicazione dei metodi geoelettrici, soprattutto per l'osservazione diretta del movimento dei gas all'interno degli strati di carbone.

10.1.3 Monitoraggio della pressione

La pressione può essere misurata con strumenti di rilevazione collocati in superficie o in fondo ai pozzi. Le misure in situ sono più affidabili e pertanto preferibili.

Un interessante esempio di applicazione dei metodi geofisici per la determinazione indiretta della pressione è rappresentato in figura 52 costruita utilizzando la relazione tra la pressione di confinamento e la celerità di propagazione delle onde P misurata con prove geosismiche (valore massimo: 11 MPa a 1520 m/s e valore minimo: 5,5 MPa a 2500 m/s).

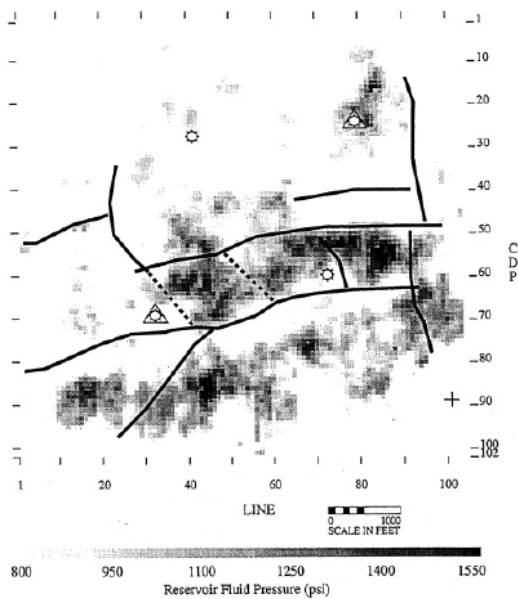


Figura 52. Mappa della pressione dei fluidi nello strato serbatoio di carbone (Shuck et al., 1996)

10.1.3 Tecniche Geochimiche CO₂

Quando viene rilevato un flusso di CO₂ dal serbatoio principale verso la superficie attraverso le metodologie descritte finora, diventa necessario procedere al monitoraggio della concentrazione di CO₂ sia nelle zone umide sia dei suoli attraverso le consuete tecniche di analisi geochimica.

I metodi di monitoraggio geochimico propongono una serie di tecniche analitiche idonee sia a tenere sotto controllo i movimenti di CO₂ nel sottosuolo, sia per valutare la natura e l'entità delle reazioni che si instaurano tra il gas iniettato ed i minerali della formazione ospitante [19]: la presenza di particolari ioni (ad esempio, Na, K, Ca, Mg, Mn, Cl, Si, HCO₃ e SO₄), il pH, l'alcalinità, gli isotopi stabili (ad esempio, ¹³C, ¹⁴C, ¹⁸O, ²H) all'interno di campioni di fluido prelevati direttamente tramite il pozzo, di roccia, di terreno e/o di acque sono importanti indicatori dello stato di salute del serbatoio.

A tale proposito sono state pubblicate alcune procedure standardizzate per l'esecuzione di questa tipologia di analisi idonee a valutare i parametri geochimici sopra elencati, compresa la possibilità di un monitoraggio in tempo reale per alcuni di essi.

Le informazioni sui movimenti della CO₂ iniettata e/o le informazioni riguardanti le interazioni tra gas e i minerali della roccia in posto possono essere ottenute anche attraverso l'utilizzo dei tracers naturali (isotopi del C, O, H ed i gas nobili associati con la CO₂ iniettata) o di quelli introdotti all'uso (gas nobili, SF₆) [19.]

Essendo la CO₂ solubile in acqua sia pura sia salata (acqua di mare) occorre considerare la possibilità che essa possa essere asportata dalle eventuali acque che attraversano gli strati di carbone.

Va quindi preliminarmente studiata la circolazione delle acque sotterranee con individuazione delle vie di flusso lungo le quali andranno predisposti i punti di prelievo e di analisi in caso di interazione con le falde prossime alla superficie, di interesse per usi umani.

10.2. Sensori per la misura della concentrazione di CO₂ in atmosfera

Le misure dirette di CO₂ in aria, nelle acque e/o nei suoli generalmente costituiscono una parte assai importante del monitoraggio ambientale. Ad esempio, nelle vicinanze dei pozzi di iniezione e/o di quelli abbandonati è di fondamentale importanza monitorare costantemente i valori di concentrazione di CO₂ in aria sia per evitare il rischio di fuoriuscite e riemissioni in atmosfera sia, soprattutto, per garantire la sicurezza dei lavoratori impegnati.

L'esecuzione delle misure per il rilevamento di eventuali perdite di gas dal serbatoio dovrà essere effettuata attraverso un idoneo numero di sensori [I] da localizzare in corrispondenza dei pozzi di iniezione e di estrazione, siano essi in attività o abbandonati. In commercio esistono una grande varietà di sensori in grado di rilevare il contenuto di CO₂ in atmosfera nel range 0 - 40.000 ppm con modesti scarti (± 0.5 %).

Tali strumenti hanno ingombri assai limitati (dimensioni dell'ordine dei 15 cm x 15 cm), possono lavorare in qualunque condizione meteorologica e termometrica senza accusare perdita di precisione.

Il costo dell'unità di rilevazione si aggira sui 1.000 € mentre quello dei sensori si aggira sui 100 €/cadauno.

Tali strumenti di analisi dovranno essere disposti in corrispondenza di tutte quelle delle zone di pervietà presenti nelle rocce sovrastanti gli strati di carbone (soprattutto in corrispondenza dei punti di intersezione in superficie tra grandi faglie subverticali) che possono rappresentare delle vie di fuga preferenziali per i gas iniettati.

10.2.1. Sensori tipo Tiltmeter

I tiltmeters sono strumenti di misura di estrema precisione utilizzati per monitorare le variazioni di inclinazione di una superficie causate da modificazioni nella formazione che sostiene la struttura.

L'utilizzo di tali strumenti può rivelarsi particolarmente utile sia durante le prime fasi di iniezione del gas, in modo da consentire l'analisi dell'entità delle modificazioni indotte nel terreno dal *plume*, sia durante le fasi di estrazione in modo da guidare la scelta dei parametri di processo per l'estrazione dei prodotti.

10.3 Osservazioni in situ

Di tanto in tanto è buona norma condurre approfondite ispezioni visive delle aree sovrastanti il serbatoio alla ricerca di tutte quelle modificazioni che possono essere indicative di migrazioni incontrollate e/o perdite dei gas iniettati.

In corrispondenza di sorgenti e/o risorgive eventualmente presenti, ad esempio, tracce di incrostazioni calcaree sono importanti indizi dell'avvenuta contaminazione delle acque sotterranee da parte di elevati contenuti di CO₂.

10.4. Considerazioni conclusive

Le tecnologie attualmente disponibili consentono di ottenere, con un buon grado di precisione, un elevato numero di informazioni sui diversi parametri relativi al processo di iniezione, alle condizioni dei gas iniettati, allo stato di salute del serbatoio, ecc....

Tutte queste informazioni, desumibili attraverso le differenti tipologie di indagini sperimentali, costituiscono la base su cui valutare l'effettiva sostenibilità ambientale del progetto di iniezione di CO₂ in sottterraneo.

Tuttavia affinché le tecnologie di monitoraggio forniscano risultati affidabili è necessario che la progettazione del sistema di monitoraggio ambientale sia realizzata in maniera razionale per quanto riguarda la scelta delle tecniche da utilizzare, la maglia di campionamento, l'ubicazione degli strumenti di misura, gli intervalli di acquisizione dei dati, ecc...

La definizione di questi parametri progettuali deve, ovviamente, essere impostata sulla base della corretta ed approfondita conoscenza delle caratteristiche del corpo geologico scelto come serbatoio e delle peculiarità delle formazioni incassanti, tenuto conto della effettiva disponibilità economica.

In questo modo, la realizzazione di un sistema di monitoraggio efficace ed efficiente può consentire, oltre alla valutazione della sostenibilità ambientale del progetto di iniezione anche il controllo dell'andamento dei parametri tecnici ed economici del processo:

- la definizione, istante per istante, della posizione del plume della CO₂ iniettata;
- l'individuazione di eventuali perdite dei pozzi di iniezione e di estrazione in attività e/o di quelli abbandonati;
- la quantificazione della quantità di fluido iniettato e, quindi, la stima della capacità residua del serbatoio;
- la definizione di eventuali contaminazioni delle risorse naturali (come ad esempio le falde acquifere sotterranee e gli ecosistemi superficiali) con la CO₂;
- la valutazione degli impatti prodotti sull'intera biosfera;
- la definizione, nel caso in cui si verificano problemi, delle più idonee soluzioni di bonifica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C.M. White, D.H. Smith, K.L. Jones, A.L. Goodman, S.A. Jikich, R.B. LaCount, S.B. DuBose, E. Odzemir, B.I. Morsi, K.T. Shroeder: **Sequestration of Carbon Dioxide in Coal with Enhanced Coalbed Methane Recovery – A Review**, in: Energy & Fuels Volume 19, N.3, May-June 2005, pp. 599-724 e riferimenti bibliografici ivi citati
- [2] Mahajan O.P., Meyers R.A.: **Coal structure**, Acad. Press, N.Y., 1982, pp. 51-86
- [3] Mahajan O.P. in: **Sample Selection, Aging and Reactivity of Coal**, Wiley, NY 1989 pp. 157-214
- [4] Harpalani S., Zhao X: **An investigation the Effect of Gas Desorption on Coal Permeability**, Proc. Coalbed Methane Symp. , Un. Alabama, Tuscaloosa, 1989, pp. 57-64
- [5] Harpalani S., Schraufnagel; **Fuel** 1990, 69, pp. 551-556
- [6] Levine J.R.;; **AAPG Stud. Geol.**, 1993, 38, pp. 39-77
- [7] Sing K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou L., Pienotti R.A., Rouquerol J., Siemieniowska T.: **Pure Appl. Chem**, 1985, 12, 145
- [8] Scott A.R.: Composition and Origin of Coalbed Gases from Selected Basins in the United States, Proc. Int. Coalbed Methane Symp, Tuscaloosa , 1993, pp. 207-222
- [9] Yee D., Sedile J.P., Hanson W.P.: **AAPG Stud. Geol.** 1993,38, pp. 203-218.
- [10] Joubert J.I., Grein C.T., Bienstock D. : **Fuel**, 1974, 53, pp. 186-190
- [11] Stevens S.H., Kuuskraa J.A., Shrafnagel R.A.: **Oil Gas J.** , 1996, 94, pp. 56-63
- [12] Kuuskraa V.A., Brandenburg C.F.: **Oil Gas J.**, 1989, pp. 87-41.
- [13] Fadda A., Ottelli L., Perna G., **Il Bacino Carbonifero del Sulcis.**, Edisar 1994 Cagliari pp 144
- [14] R. Valera, **Iglesiente. Il campo di frattura: Relazione Conclusiva.**, Anno 1966.
- [15] G. Carta, **Disegno di una miniera moderna nel bacino Carbonifero del Sulcis - “La miniera di Seruci”**., Atti del Convegno di Studi per l’industrializzazione della Sardegna, Vol. II, Anno 1953, pp. 271- 278
- [16] M. Agus, S. Cara, C. Garbarino, L. Ottelli, S. Tocco, **Distribuzione del solfo nei livelli di carbone della I vena del bacino carbonifero terziario del Sulcis (Sardegna SW).**., Congresso Internazionale di Geingegneria Torino, 27-30 Settembre 1989, Vol. 1, pp. 323-329
- [17] L. Palombo, A. Colletta, G.P. Giromella, **Il carbone Sulcis: caratteristiche e possibilità di impiego.**., Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 19, Anno X, n° 2 Ottobre 1982, pp. 221-242
- [18] M. Carta, C. Del Fa, M. Agus, P. Carbini, **Studio di una campionatura del I fascio della miniera di Seruci del bacino carbonifero del Sulcis.**., Resoconti dell’Associazione Mineraria Sarda, n° 1, Anno 1978, pp. 111-169
- [19] M. Agus, S. Cara, C. Garbarino, L. Ottelli, S. Tocco, **Distribuzione del solfo nei livelli di carbone della I vena del bacino carbonifero terziario del Sulcis (Sardegna SW).**., Congresso Internazionale di Geingegneria Torino, 27-30 Settembre 1989, Vol. 1, pp. 323-329

- [20] M. Carta, **Problemi di trattamento e dell'utilizzazione dei carboni con tenore elevato di zolfo ed in particolare del carbone Sulcis.**, Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 19, Anno X, n° 2 Ottobre 1982, pp. 243-273
- [21] M. Agus, C. Garbarino, **Solfo organico negli strati di carbone di un foro di sonda del bacino del Sulcis (Sardegna sud-occidentale).**, Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, Vol. 41, Anno 1986, pp. 69-74
- [22] M. Carta, C. Del Fa, M. Agus, P. Carbini, **Studio di una campionatura del I fascio della miniera di Seruci del bacino carbonifero del Sulcis.**, Resoconti dell'Associazione Mineraria Sarda, n° 1, Anno 1978, pp. 111-169
- [23] A. Assorgia, P. Brotzu, E. Callegari, A. Fadda, R. Lonis, L. Ottelli, R. Ruffini, T. Abbrate, **Carta Geologica del Distretto Vulcanico Cenozoico del Sulcis (Scala 1:50.000).**
- [24] G.F. Diana, **Contributo alla conoscenza del Bacino Carbonifero del Sulcis: ricostruzione Geo-Strutturale dell'area di Seruci-Nuraxi Figus. Implicazioni e considerazioni sullo sviluppo delle future coltivazioni.**, Tesi di Laurea in Ingegneria Mineraria, Università degli Studi di Cagliari Relatori S. Tocco, L. Ottelli, Anno Accademico 1984-1985.
- [25] L. Soliani, **Manuale di Statistica per la Ricerca e la Professione, Statistica Univariata e Bivariata Parametrica e Non-Parametrica per le Discipline Ambientali e Biologiche.**, UNI.NOVA, Parma, 2003.
- [26] A. Cavinato, **Giacimenti Minerari.**, UTET, Torino, 1964, pp. 686
- [27] A. Mazzella, **L'utilizzo di tecnologie GIS per la ricostruzione tridimensionale di corpi geologici profondi: il caso del Bacino Carbonifero del Sulcis (Sardegna Sud-Orientale).**, 2008
- [28] M. Agus, M. Carta, **Delle caratteristiche minero-petrografiche, chimiche e tecnologiche del carbone della miniera Seruci-Nuraxi Figus.**, Atti della Facoltà di Ingegneria, Vol. 7, Anno IV, n° 2 Ottobre 1976, pp. 73-107
- [29] M. Carta, **Note sulle miniere carbonifere del Sulcis.**, La Programmazione in Sardegna, Anno 10, Novembre-Dicembre 1976, pp 3-18
- [30] M. Agus, **Studio petrografico del carbone della miniera di Seruci.**, Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrografia n.38, 1981, pp. 385-404
- [31] S.M. Benson, L. Myer, **Monitoring to ensure safe and effective geologic sequestration of carbon dioxide.**, IPCC Workshop on Carbon Dioxide Capture and Storage. Ginevra, 17-20 Aprile 2002
- [32] Fais, S., Klingele', E., Lecca, L., 2002. **Structural features of the south-western Sardinian shelf (Western Mediterranean) deduced from aeromagnetic and high-resolution reflection seismic data.** *Ecl. Geol. Helv. Swiss Journ. Geosc.*, 95 (2), 169-182.
- [33] Fais, S., Klingele', E. 2007. **Volcano-Tectonic evolution of the offshore Cagliari Gulf (Western Mediterranean) from geophysical data.** *Ext. Abstr., 69st EAGE Conference & Exhibition*, 7-14 June 2007, ExCel London, pp. 1-5.
- [34] Finetti, I.R., Del Ben, A., Fais, S., Forlin, E., Klingele', E.E., Lecca, L., Pipan, M., Prizzon, A., 2005. **Crustal Tectono-Stratigraphic Setting and Geodynamics of the Corso-Sardinia Block from New CROP Seismic Data.** In: *CROP Deep Seismic*

Exploration of the Central Mediterranean and Italy. I.R. Finetti (Ed.), Elsevier, pp. 413-446

- [35] Ciccu R. : **Recupero ambientale**, Dispense per gli studenti, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Cagliari, 2009

Siti internet consultati

- [I] <http://www.directindustry.it/prod/figaro-engineering/sensore-elettrochimico-di-biossido-di-carbonio-co2-29357-147460.html>
- [II] http://www.chinirappresentanze.com/Aster_sensorianalogici70.pdf
- [III] <http://oco.jpl.nasa.gov/>
- [IV] <http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=landsat&id=index>
- [V] <http://www.scanex.com/en/data/default.asp?submenu=radarsat&id=index>