



Ricerca di Sistema elettrico

Studio di fattibilità per la sperimentazione di iniezioni di CO₂ in sottosuolo finalizzato allo sviluppo di sistemi di monitoraggio

A. Plaisant, D. Multineddu, V.G. Anardu, A. Maiu
S.E. Beaubien, S. Bigi, S. Lombardi

STUDIO DI FATTIBILITÀ PER LA SPERIMENTAZIONE DI INIEZIONI DI CO₂ IN SOTTOSUOLO FINALIZZATO ALLO SVILUPPO DI SISTEMI DI MONITORAGGIO

A. Plaisant, D.Multineddu, V.G. Anardu, A.Maiu (Sotacarbo S.p.A.)
S.E. Beaubien, S. Bigi, S.Lombardi (CERI-Università La Sapienza, Roma)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Progetto: *Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB)* - CUP: I12F16000180001

Obiettivo: Parte A – Tecnologie per l'impiantistica energetica 'low carbon'

Tema B: Monitoraggio e confinamento geologico della CO₂

Task 2: Studio fattibilità e progetto esecutivo del test di sperimentazione di iniezione di CO₂ in sottosuolo finalizzato allo sviluppo di sistemi di monitoraggio

Responsabile del Progetto: dott.ssa Franca Rita Picchia ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Tecnologie e metodologie low carbon e Edifici a energia quasi zero (nZEB)*"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: ing. Enrico Maggio

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	6
3 ALLEGATI.....	9

Sommario

Questo lavoro si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2016, relativamente al tema di ricerca PARTE A Titolo B: Monitoraggio e confinamento geologico della CO₂, Task.3 "Studio fattibilità e progetto esecutivo del test di sperimentazione di iniezione di CO₂ in sottosuolo finalizzato allo sviluppo di sistemi di monitoraggio".

Le attività realizzate sino ad oggi nel sito nel Sulcis hanno permesso di individuare un'area dove poter realizzare delle sperimentazioni legate all'iniezione di piccole quantità di CO₂ in sottosuolo.

L'attività in esame prevede la prosecuzione delle attività sviluppate sino ad ora.

Nello specifico il report in esame tratta lo sviluppo di uno studio di fattibilità per la realizzazione di un laboratorio di superficie (Sulcis Fault Lab) dove effettuare un test di iniezione su una faglia precedentemente individuata, per studiarne il comportamento e testare gli strumenti e le diverse tecniche di monitoraggio.

Lo studio di fattibilità comprende una descrizione dello stato dell'arte delle attività di ricerca aventi come oggetto esperimenti di iniezione di fluidi in roccia in casi reali; una descrizione delle infrastrutture necessarie per la realizzazione dell'esperimento e una valutazione di massima dei costi.

1 Introduzione

Sotacarbo ha in programma di condurre una sperimentazione sul campo del monitoraggio della risalita di CO₂, in una simulazione controllata di perdita di CO₂ su un'area di circa 2 ettari.

Durante l'esperimento saranno studiate le migrazioni del gas a seguito di iniezione nel sottosuolo attraverso una struttura geologica appositamente individuata per sperimentare un'ampia gamma di tecniche di controllo. Con osservazioni dirette e modellazione fluidodinamica associata le strumentazioni e gli esperimenti permetteranno di comprendere meglio lungo quali strutture il gas migri di preferenza, portando a migliorare le conoscenze sulle tecnologie di monitoraggio e fornire indicazioni sul comportamento delle strutture geologiche interessate da iniezione di CO₂. Saranno effettuate iniezioni di piccole quantità di CO₂ a circa 250 metri di profondità che saranno monitorate attraverso molteplici sistemi di controllo, superficiali e sotterranei.

Per l'iniezione e il monitoraggio del gas si prevede di realizzare una nuova struttura sperimentale, denominata Sulcis Fault Lab.

L'Università di Roma "La Sapienza" nello specifico ha redatto il presente studio di fattibilità della piattaforma sperimentale. Rispetto ad altri siti di questo tipo, questo laboratorio sarà unico nel suo genere in quanto l'iniezione verrà effettuata lungo una faglia ad una profondità stimata di 250 metri, differenziandosi da precedenti siti di test.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Sotacarbo ha sviluppato un programma di sperimentazione sul campo volto a studiare i processi di migrazione della CO₂ iniettata in formazioni rocciose superficiali: gli esperimenti consentiranno di delineare il comportamento del gas in prossimità di faglie e di testare le tecnologie di monitoraggio collegate.

Il sito dove saranno condotte le sperimentazioni sarà denominato “Sulcis Fault Lab” (SFL) e consisterà in infrastrutture ubicate in un’area di circa 2 ettari. Il sito è da tempo oggetto di monitoraggio geochimico e sismico per delineare la baseline.

La redazione dello studio di fattibilità di tutto il laboratorio è stata affidata alla Università di Roma “La Sapienza”.

Per delineare l’esperimento e le infrastrutture necessarie si è partiti da una ricerca sullo stato dell’arte con conseguente revisione critica dei test di iniezione di CO₂ già condotti a livello mondiale nell’ambito della ricerca per il CCS.

Sono stati recuperati e confrontati i dati dei siti dove sono stati effettuati test di iniezione di CO₂ in fase gassosa a profondità da basse a medie.



Figura 1. Localizzazione di alcuni siti test di iniezione CO₂ in fase gassosa nel sottosuolo

La zona dove ubicare l’esperimento è stata individuata in base ai risultati dell’interpretazione delle indagini geofisiche effettuate in precedenti annualità del PAR: è stata scelta una zona dove è risultata ben visibile una faglia sepolta con un rigetto di circa 40 metri. Il sito si trova all’interno del permesso di ricerca “Monte Ulmus”, nelle vicinanze della borgata di Matzaccara, San Giovanni Suergiu. La faglia principale ha una direzione NNE-SSW (100/68) e una lunghezza di circa 450 metri.

Sulla base della analisi dei siti esistenti e le specificità del sito del Sulcis è stata formulata una prima ipotesi dell’infrastruttura che dovrebbe essere costruita nel Sulcis Fault Lab. Il progetto prevede l’installazione delle seguenti strutture:

- Un pozzo di iniezione inclinato di 45° di lunghezza di perforazione 250 più uno opzionale da 50 m, che intersecano la faglia, con profondità di iniezione 175 e 35 m; con cemento resistente alla corrosione indotta dalla CO₂ e impermeabile per evitare perdite di gas lungo il pozzo;
- Due pozzi verticali per il monitoraggio (profondo 250 m); equipaggiati con strumenti geofisici; posizionati in maniera permanente sia tra il rivestimento (*casing*) e il pozzo che a fondo pozzo;
- 9 pozzi di monitoraggio delle acque del sottosuolo (piezometri) perforati fino ad una profondità massima di 10 – 15 m, sigillati in PVC;
- 50 sensori di monitoraggio CO₂ nel suolo: unità (5X10cm), posizionate ad una profondità di circa 80 cm dalla superficie in pozzetti di 10 cm di diametro;
- Infrastruttura superficiale di stoccaggio CO₂ e iniezione;
- Infrastrutture mobili per il personale.

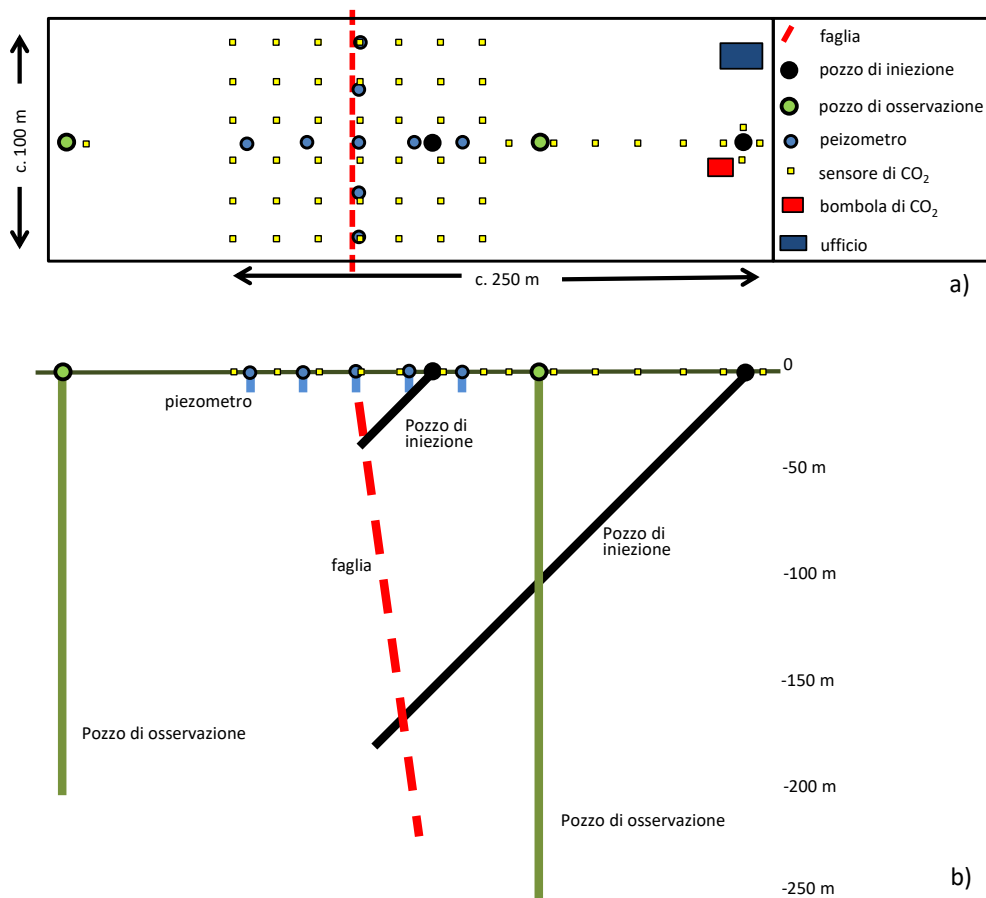


Figura 2 Disegno schematico del laboratorio SFL in mappa (a) e in sezione (b).

Nella delineazione dell'esperimento sono state formulati differenti scenari per l'iniezione. Le effettive quantità e il tasso di iniezione di CO₂ saranno funzione della permeabilità dell'orizzonte in cui si inietta e della faglia per tutta la sua lunghezza.

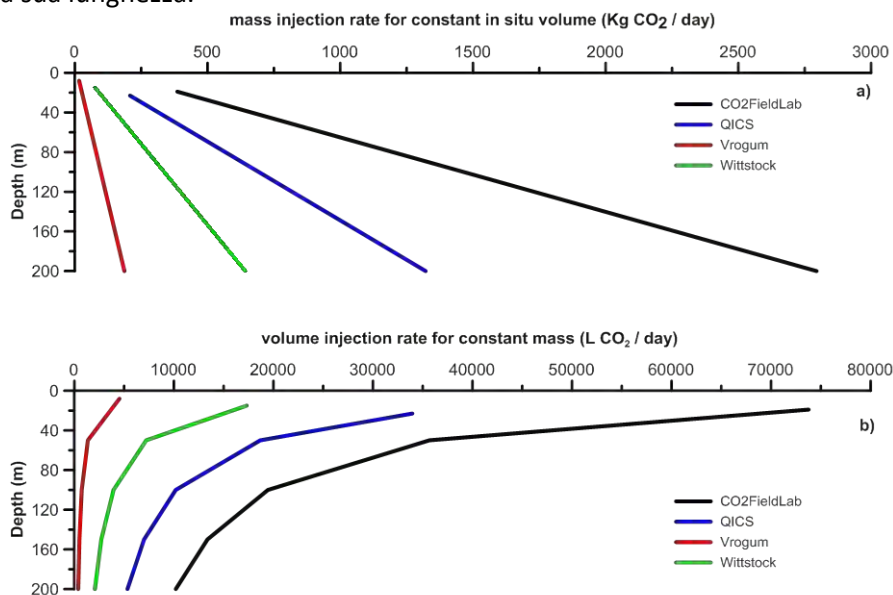


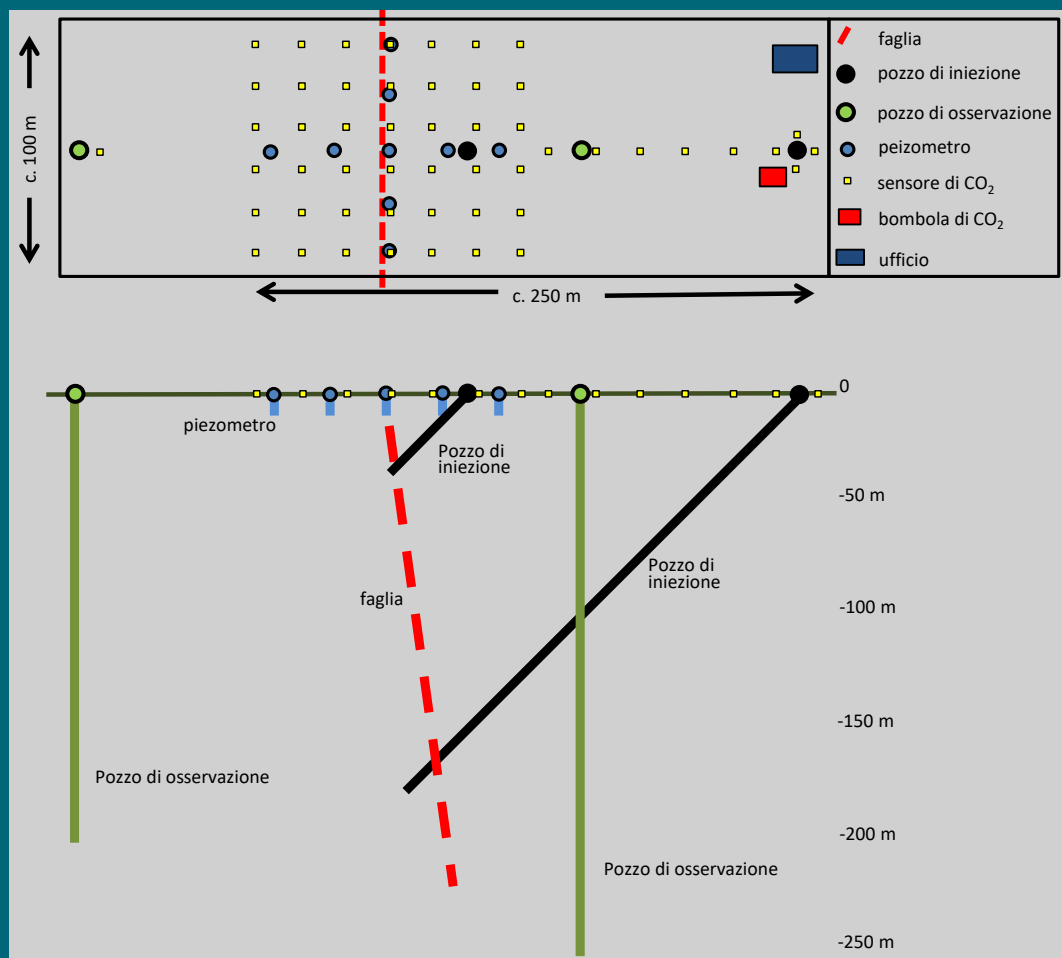
Figura 3 Grafici ipotetici incremento pressione con la profondità (assumendo un incremento costante di pressione idrostatica) mantenendo un parametro costante: (a) volume di gas iniettato in situ (b) massa

Considerando un ammontare di circa 10 tonnellate di CO₂, il periodo di iniezione può essere stimato in modo conservativo tra le 2 e le 4 settimane ad un tasso di 500 kg CO₂/giorno, per un totale di 10 tonnellate.

È stata effettuata poi una previsione di massima dei costi delle infrastrutture del SFL e delle campagne sperimentali. I costi sono suscettibili di variazioni anche macroscopiche e variano soprattutto in base alle scelte di diametro dei fori del pozzo, profondità delle perforazioni, effettiva litologia e risposta alla perforazione della roccia, casing e completamento del pozzo, costi di movimentazione.

È stata poi eseguita una valutazione degli eventuali impatti ambientali conseguenti ai differenti scenari considerati e proposti alcuni interventi di mitigazione da attuare per vigilare sulla sicurezza del personale e dell'ambiente circostante.

3 Allegati



The Sulcis Fault Lab (SFL): studio di fattibilità per lo sviluppo di una infrastruttura di ricerca ai fini dello stoccaggio geologico della CO₂

Preparato dal Laboratorio di Tettonica e Chimica dei Fluidi, Dipartimento di Scienze della Terra, Università La Sapienza di Roma per Sotacarbo S.p.A.

S.E. Beaubien, S. Bigi, S. Lombardi

*con la collaborazione di Chiara Tartarello, Alessia Conti,
Livio Ruggiero e Roberta Maffucci (per la versione in Italiano)*

Table of Contents

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Review of injection test research</i>	5
2.1	Gas injection tests for CCS research	6
2.1.1	Introduction to sites and experiments	6
2.1.2	Site selection work	8
2.1.3	Site permission, injection permits, and communication with local stakeholders	9
2.1.4	Site characterisation / baseline work	10
2.1.5	Site infrastructure (injection wells, gas delivery system, observation wells, etc.)	15
2.1.6	Injection experiment parameters	29
3	<i>The proposed Sulcis Fault Lab (SFL)</i>	36
3.1	Regional geology	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.2	Potential site development and use	38
3.2.1	Overview of proposed site development	38
3.2.2	Site permitting, communication, etc.	39
3.2.3	Proposed site characterisation / baseline monitoring	40
3.2.4	Proposed infrastructure and experimental design	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.3	Preliminary SFL infrastructure cost estimates	55
3.3.1	Cost summary and responsibilities	59
3.4	Possible injection and migration scenarios during SFL experiment(s)	61
3.4.1	Scenario 1 – moderate to high injection rate, moderate to high surface leakage	63
3.4.2	Scenario 2 – moderate to high injection rate, low or no surface leakage	Errore. Il segnalibro non è definito.
3.4.3	Scenario 3 – low injection rate, low surface leakage	64
3.4.4	Scenario 4 – low injection rate, no surface leakage	65
3.4.5	Scenario 5 – injection not possible	65
4	<i>Summary of SFL construction and concluding remarks</i>	66
4.1	Site summary	66
4.2	Context of the SFL experiments	70
5	<i>References and related reading</i>	Errore. Il segnalibro non è definito.

1 INTRODUZIONE

Lo stoccaggio della CO₂ di origine antropica in reservoir profondi, noto come *Carbon Capture and Storage* (CCS), è stato oggetto di studi fin dagli anni Novanta, in quanto considerato una tecnologia “ponte” che consentirà di continuare ad utilizzare i combustibili fossili, dando alla comunità scientifica il tempo necessario per sviluppare nuove tecnologie per le fonti rinnovabili e di ridurre i costi. Per questo motivo, numerose ricerche sono state condotte negli ultimi 20 anni, considerando processi sempre più complessi e a larga scala, sperimentando tecniche di monitoraggio più sofisticate per valutare meglio la fattibilità e la sicurezza dei siti. Tenendo conto che la Commissione Europea (CE) ha delineato un calendario per la realizzazione di impianti pilota per il CCS nei prossimi anni, risulta essenziale indirizzare la ricerca verso argomenti in cui rimangono ancora delle questioni aperte, siano esse relative a requisiti tecnici o interessi degli *stakeholder*.



Figure 1 Figura 1. Localizzazione del Sulcis Fault Lab proposto nella porzione sud-occidentale della Sardegna (a), nei pressi dell'abitato di Matzaccara (b).

A tale proposito, Sotacarbo S.p.A. realizzerà un laboratorio su larga scala nella regione del Sulcis in Sardegna sud-occidentale (Figura 1), dove i ricercatori provenienti dall'Europa e dal resto del mondo potranno venire a studiare i processi di migrazione dei gas e testare le proprie tecniche di monitoraggio.

Il sito sarà denominato “Sulcis Fault Lab” (SFL) e consisterà di:

- Uno o due pozzi inclinati (lunghi 50 e 250 m) per l’iniezione di CO₂ gassosa in una faglia normale,
- 2 pozzi verticali su entrambi i lati della faglia per il monitoraggio geofisico (profondi circa 200-250 m),
- 9 pozzi superficiali per il monitoraggio della falda (ad una profondità di 10-15 m),
- l’infrastruttura superficiale necessaria a condurre l’esperimento (per esempio, serbatoi di CO₂, condutture, valvole, sistemi di controllo/sicurezza, alimentazione elettrica, un ufficio di cantiere, ecc.).

Rispetto ad altri siti di questo tipo, questo laboratorio sarà unico nel suo genere in quanto l’iniezione verrà effettuata lungo una faglia (esperimenti precedenti sono stati condotti principalmente in sedimenti inconsolidati) ad una profondità stimata di 250 metri (finora i test di iniezione di CO₂ sono stati effettuati a profondità inferiori a 20 metri).

In previsione delle fasi di progettazione e costruzione del SFL, Sotacarbo ha commissionato al Laboratorio di Tettonica e Chimica dei Fluidi (Dipartimento di Scienze della Terra, Università “Sapienza” di Roma) di redigere il presente rapporto tecnico, strutturato come segue:

- Revisione dei test di iniezione di CO₂ condotti nell’ambito della ricerca per il CCS. Sebbene il SFL sarà unico in molte delle sue sfide, una discussione delle numerose questioni e sfide tecniche, scientifiche e sociali affrontate in questi progetti aiuterà nella fase di sviluppo del sito in Sulcis.
- Discussione dei problemi che devono essere presi in considerazione durante la progettazione delle infrastrutture del sito, incentrata soprattutto sull’assetto geologico, idrogeologico e strutturale del sito proposto, sulle considerazioni tecniche ed ingegneristiche, oltre che sugli specifici obiettivi di ricerca da raggiungere sia nell’ambito di progetti nazionali, sia in quelli finanziati dalla CE.
- Quadro generale dei vari aspetti ed elementi che devono essere considerati durante le fasi di pianificazione, sviluppo e costruzione, tra cui alcune stime preliminari dei costi per alcune voci di spesa.

È auspicabile che questo documento possa costituire la base per la creazione del sito, mettendo in evidenza quelle che sono le informazioni e decisioni necessarie a garantire la realizzazione rapida del SFL e la buona riuscita dei suoi esperimenti.

2 REVISIONE DEI TEST DI INIEZIONE NELL'AMBITO DELLA RICERCA

Se per test di iniezione si intende un'aggiunta di un fluido in un pozzo per determinarne le proprietà di flusso sub-superficiale, allora l'esempio più semplice è lo *slug test* (noto anche come test di iniezione istantanea). Questa tecnica, comunemente utilizzata, prevede l'aggiunta di un volume noto di acqua ad un pozzo, il monitoraggio del livello dell'acqua nel tempo e il confronto della curva risultante con quella teorica (ad esempio Hvorslev, 1951) per calcolare la permeabilità dell'acquifero (K). Sviluppati originariamente per mezzi porosi, gli *slug test* possono essere utilizzati anche in rocce fratturate. La prova di iniezione a pressione costante, invece, comporta l'iniezione di acqua in un intervallo precedentemente isolato (mediante packer singoli o doppi) ad una pressione (o una serie di pressioni crescenti in modo graduale) superiore a quella idrostatica, mantenendola per un certo periodo di tempo e monitorando il flusso (o cadute di pressione per impulsi di breve periodo); in tal modo è possibile calcolare la permeabilità del singolo livello. Questo approccio è molto utile in presenza di unità poco permeabili ed è stato applicato per determinare le caratteristiche idrauliche di rocce fratturate o fagliate con diversi scopi, come per esempio la sicurezza di siti di smaltimento di scorie nucleari (ad esempio Witherspoon e Gale, 1983; Lee et al, 1983; Rutqvist, 1996; Gascoyne e Wuschke, 1997), problemi di geotecnica (ad esempio, Hamm et al, 2007), o flusso ed alimentazione di acque sotterranee (ad esempio, Ran et al, 2014).

L'iniezione di una fase gassosa, invece che di acqua, venne sperimentata per la prima volta nel campo dello smaltimento dei rifiuti nucleari, poiché la corrosione e il decadimento radioattivo possono produrre probabilmente una fase gassosa nel deposito, portando ad una sovrappressione, fratturazione e migrazione dei gas (Marschall et al, 1997; Cuss et al, 2011.). Questi studi hanno avuto come obiettivo la definizione dei parametri idraulici del flusso bi-fase lungo fratture naturali o indotte, nonché le soglie di sicurezza per le pressioni. La maggior parte di questi esperimenti non sono stati condotti in pozzi trivellati dalla superficie, ma piuttosto in fori perforati in laboratori di ricerca sotterranei.

Per quanto riguarda i test condotti nell'ambito di ricerca per il CCS, sono stati iniettati sia gas, sia acqua. I test di iniezione di gas possono essere divisi in tre categorie principali, in base alla profondità: superficiali (<2 m), moderati (10-100 m, ma tipicamente <20 m) e profondi (>800 m). I test di iniezione profondi solitamente sono progetti pilota e comportano l'iniezione di CO₂ allo stato supercritico, e perciò va oltre lo scopo di questo elaborato. Le attività svolte nei siti con iniezioni superficiali o moderate di solito comprendono l'osservazione del flusso di CO₂, la sperimentazione di attrezzature di monitoraggio e lo studio dell'impatto sulle acque sotterranee e sull'ecosistema superficiale. I test con iniezione d'acqua, invece, hanno come scopo lo studio degli impatti sulla qualità dell'acqua e la geochimica e prevedono l'iniezione di acqua satura di CO₂.

Tenendo conto che l'obiettivo principale del SFL sarà l'iniezione in una roccia fratturata ad una profondità moderata di una fase gassosa, la revisione che segue si concentrerà su questi argomenti. In particolare, verranno comparati diversi test di iniezione di CO₂ effettuati a

profondità da superficiali a moderate (simile al SFL per scala dell'esperimento, sfide tecniche e problemi logistici, ma differenti per profondità e obiettivo dell'iniezione), così da poter utilizzare queste informazioni come suggerimento per la progettazione, costruzione e utilizzo del SFL.

2.1 Test di iniezione di gas nell'ambito del CCS

2.1.1 Introduzione ai siti e agli esperimenti

Siti per effettuare test di iniezione di CO₂ in fase gassosa a profondità da basse a medie sono stati costruiti in tutto il mondo, e i 13 siti più importanti sono rappresentati nella mappa di figura 2. Poche osservazioni di carattere generale possono essere fatte per i vari siti:

- La maggior parte dei siti è in Europa;
- La maggior parte dei siti è a terra, ad eccezione di QICS in cui il pozzo è stato perforato su terra con il punto di rilascio del gas in mare al di sotto del fondale;
- La maggior parte dei siti ha iniettato in sedimenti inconsolidati, eccetto che a Siena e Latera dove l'iniezione è avvenuta in sedimenti fagliati, e INAS in dioriti fratturate;
- Le iniezioni a ASGARD, Grimsrud, PISCO2, ZERT e Ginniderra sono a una profondità <2 m, le iniezioni a Siena, Maguelone, Latera, Wittstock, Vrogum e CO₂FieldLab sono a una profondità di 10-20 m, e la prima iniezione a INAS è stata fatta a 70 m (le successive a 20 m riguardano iniezioni di volumi di gas molto piccoli e non sono riportate qui);
- I pozzi di iniezione a CO₂FieldLab, Vrogum, Wittstock, Maguelone, Latera, Siena e INAS sono verticali o inclinati; i pozzi di iniezione a QICS, ZERT e Ginniderra sono orizzontali; i punti di iniezione ad ASGARD sono stati installati a mano a causa della minima profondità (0.6 m); PISCO2 e Grimsrud sono "costruiti" (il primo in celle sperimentali di cemento, il secondo in una cava scavata).
- Molti siti sono stati utilizzati per più di un esperimento di iniezione, ad eccezione degli esperimenti singoli eseguiti a QICS, CO₂FieldLab e Wittstock.
- In tutti i siti sono stati applicati differenti strumenti per il monitoraggio (ad esempio, geochimica, geofisica, biologia e *remote sensing*) per massimizzare i risultati di questi esperimenti complessi e costosi;
- I test di iniezione a Siena e Latera sono stati effettuati dagli autori di questo rapporto.



Figura 2. La mappa mostra la localizzazione di alcuni dei più importanti siti test, dove è stata iniettata CO₂ in fase gassosa nel sottosuolo per studiare la migrazione dei fluidi, valutare l'impatto sulle falde e sull'ecosistema superficiale e per testare strumenti di monitoraggio.

Come detto precedentemente, gli esperimenti di iniezioni legati al CCS sono stati condotti a profondità relativamente basse, come illustrato in figura 3. In questa figura i siti divisi in base alle profondità di iniezione: molto superficiali, da 0.6 a 2 m (blu), profondità intermedie da 10 a 20 m (rosso) e uno a 70 m di profondità (verde). A scopo illustrativo, la figura 3 riporta anche le profondità stimate per i due siti pianificati (grigio) per la sperimentazione nell'ambito del progetto ENOS (ENabling Onshore CO₂ Storage in Europe) finanziato dalla CE: il SFL qui discusso e il GeoEnergy Test Bed (GTB), che sarà costruito nei pressi di Nottingham, UK. In entrambi i siti è stata pianificata la perforazione di due pozzi di iniezione a diverse profondità. Come si può vedere, entrambi i pozzi superficiali in questi siti sono più profondi della maggior parte di quelli esistenti nei siti test, mentre i pozzi più profondi sono significativamente a maggiore profondità. Questi ultimi andranno a riempire il vuoto che esiste attualmente tra quelli nella porzione più superficiale (<20 m) e i pozzi dei siti pilota a profondità >500 m.

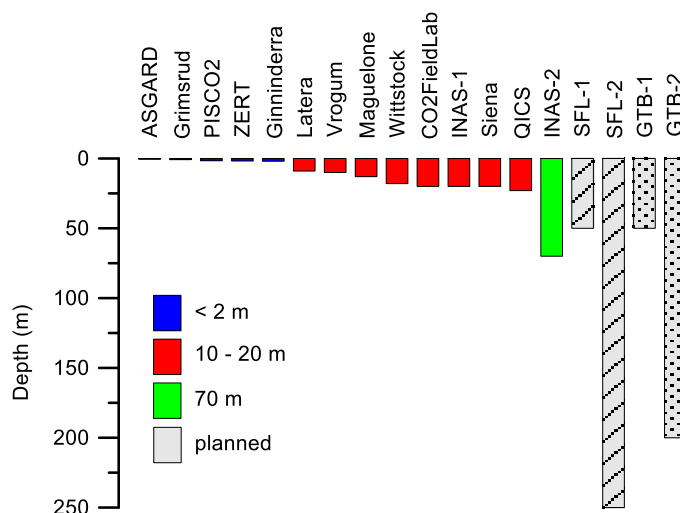


Figura 3. Profondità di iniezione per i siti test esistenti (blu, rosso) e in programma (grigio). SFL si riferisce al Sulcis Fault Lab (Italia), mentre GTB è il GeoEnergy Test Bed, vicino Nottingham (UK); in entrambi i siti sono pianificati pozzi di iniezione più superficiali (-1) e profondi (-2), sebbene la profondità finale sarà decisa in futuro. SFL e GTB saranno utilizzati nel progetto ENOS, finanziato dalla CE.

Nella sezione seguente verranno compartiti i siti in termini di pianificazione, sviluppo, costruzione, caratteristiche locali e parametri di iniezione.

2.1.2 Selezione del sito

La scelta del sito per un certo numero dei casi sopra elencati non è stata dettata dal confronto dettagliati tra vantaggi e svantaggi delle diverse posizioni, ma è legata principalmente al possesso di un terreno da parte dei proponenti del progetto. Questa scelta appare vantaggiosa poiché riduce i problemi relativi all'accesso del sito e alla fase di richiesta dei permessi, ma d'altro canto limita le opzioni sperimentali che restano vincolate alle caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geochemiche di quel singolo sito.

Alcuni esempi includono:

- Ginninderra in una stazione sperimentale con lo stesso nome, di proprietà dell'agenzia governativa federale per la ricerca scientifica in Australia (CSIRO);
- INAS nel campus Ito dell'Università di Kyushu, Fukuoka (Giappone);
- ASGARD nel Sutton Bonington Campus dell'Università di Nottingham;
- ZERT in una struttura per la ricerca agricola dell'Università del Montana;
- Wittstock in un ex campo militare nello stato di Brandenburg;
- PISCO2 all'interno del Centro di Sviluppo Tecnologico per la Cattura di CO2 del CIUDEN.

Tra i siti non elencati sopra, Latera e Siena sono stati scelti in base alla presenza di faglie note, mentre non è stata trovata nessuna informazione per i siti di Maguelone e Vrogum. Nei siti dei CO2FieldLab e QICS sono state seguite procedure di selezione del sito molto rigorose n base agli obiettivi specifici dei relativi progetti.

Per la costruzione del CO2FieldLab, originariamente sono stati considerati 9 siti in tutta la Norvegia, aventi sedimenti consolidati o inconsolidati, con 7 in fase di revisione per la in profondità (Dillen et al., 2009).i criteri che sono stati utilizzati per valutare i siti includono: i) una conoscenza petrofisica dettagliata; ii) accessibilità alla formazione; iii) una profondità della formazione adeguata; iv) evitare possibili conflitti d'uso del sito. Dopo una prima valutazione "a tavolino" utilizzando i dati esistenti, soltanto 2 siti sono stati considerati fattibili: il deposito di sabbie inconsolidate del Quaternario a Svelvik e le arenarie del Permiano a Brumunddal. Come descritto nella sezione 2.1.3, il sito scelto per il CO2FieldLab è stato Svelvik.

Per il sito QICS, l'area nei dintorni di Oban, in Scozia, è stata scelta per il *bedrock* idoneo e per la presenza di piccole isole e baie che fornirebbero delle condizioni protette per un sito *offshore* (Taylor et al., 2015). La scelta del sito in quest'area si è basata su quattro criteri: i) l'accesso al terreno e lo spazio per la perforazione e l'installazione dell'impianto di iniezione della CO2, e l possibilità di avere un accesso al mare, con una profondità dell'acqua di 10-20 m; ii) la stratigrafia semplice con 10-25 m di sedimenti al di sopra della roccia consolidata, che potrebbe sostenere la perforazione; iii) il tipo e la diversità faunistici rappresentativi dei

possibili siti CCS offshore, tenendo conto che l'obiettivo del progetto è stato quello di esaminare il possibile impatto sull'ecosistema in caso di una fuga di CO₂; iv) supporto logistico e scientifico. Sono stati scelti 9 siti per la successiva fase di studio, durante la quale sono stati acquisiti oltre 400 km di sismica a riflessione ad alta risoluzione col *chirp* e un'estesa indagine batimetrica con *multi-beam*. Sulla base dei risultati, è stato scelto il sito di Ardmucknish Bay.

2.1.3 Autorizzazioni per il sito, permessi per l'iniezione e comunicazione con gli stakeholders" locali

Il primo requisito per costruire le infrastrutture necessarie al test di iniezione, e per iniettare realmente la CO₂, riguarda l'ottenimento dei permessi dei proprietari dei terreni d'interesse, oltre che quelli degli enti governativi (salute e sicurezza, impatto ambientali, ecc.). Questa prima fase può essere molto impegnativa, e può determinare la realizzabilità effettiva degli esperimenti pianificati. Come descritto precedentemente, molti dei siti sono stati scelti principalmente perché uno degli enti di ricerca era in possesso di un terreno in cui condurre esperimenti, evitando (o minimizzando) in tal modo ogni difficoltà legata alla richiesta di permessi per l'accesso al sito e il suo utilizzo. L'accesso ai siti di Siena e Latera è stato ottenuto negoziando direttamente con i proprietari dei terreni e pagando un piccolo compenso. QICS (Taylor et al., 2015) e CO₂FieldLab (Dillen et al., 2009), dopo aver scelto la posizione ideale nella fase di studio preliminare, hanno contattato i proprietari dei terreni per richiedere l'accesso al sito, e le autorità per i permessi necessari all'installazione delle infrastrutture (inclusi i pozzi di perforazione) e all'iniezione.

Per il progetto QICS, gli organi normativi competenti sono stati contattati già in fase di stesura del progetto, e quindi prima della selezione del sito, mediante un colloquio informale per evidenziare tutti i potenziali dubbi (Taylor et al., 2015). Una volta scelto il sito (si veda la sezione 2.1.2), il proprietario terriero e il suo affittuario sono stati contattati immediatamente per chiedere il permesso per l'accesso. Successivamente, sono stati richiesti e ottenuti i permessi dagli organi normativi competenti per le perforazioni sottomarine e l'installazione di strumentazione (Marine Scotland and the Crown Estates), e contestualmente sono state informate altre autorità (incluse la Scottish Environmental Protection Agency e la municipalità). L'ottenimento di tutti gli altri permessi prima della perforazione è stato possibile grazie al supporto del Governo Scozzese e delle comunità locali. In particolare, il supporto di queste ultime è stato ottenuto attraverso diverse attività di comunicazione e coinvolgimento della popolazione (Taylor et al., 2015), che includono: consultazione delle comunità locali per assicurarsi che non siano interessi commerciali o ricreativi nella porzione di mare vicina alla perforazione, organizzazione di incontri pubblici prima, durante e dopo l'iniezione di CO₂, dando alle persone interessate la possibilità di entrare in contatto (previo accordo) con gli scienziati durante la perforazione e l'iniezione, istituendo in questo modo un gruppo di *stakeholders* che consente il trasferimento di informazioni (questo gruppo include rappresentanti dell'industria locale, enti di regolamentazione responsabili per il CCS, organizzazioni ambientaliste, NGO). Gli autori affermano che, sebbene non tutte le persone

erano a favore del CCS, la maggioranza ha accettato l'atteggiamento imparziale dei ricercatori e compreso la necessità di condurre le ricerche, una volta che gli obiettivi sono stati descritti.

Per il CO2FieldLab, invece, le richieste dei permessi sono state condotte in parallelo per due siti (Dillen et al., 2009); benché questa scelta aumenti il carico di lavoro, essa accresce le probabilità di successo. I ricercatori del consorzio hanno comunicato con i proprietari terrieri, le municipalità e le organizzazioni locali nel corso di 5 mesi, per organizzare incontri informativi pubblici. In Norvegia, tutti i permessi devono essere gestite dalle municipalità locali, e le domande di autorizzazione devono descrivere l'intero progetto, dalla valutazione dell'iniezione al monitoraggio. Queste informazioni sono fornite anche dalle società di perforazione e di esplorazione, le quali hanno fornito piani operativi dettagliati e simulazioni di modelli preliminari dell'iniezione di CO₂ prevista, facendo stime approssimative della quantità totale di gas necessario, della velocità di migrazione del gas e la quantità di CO₂ che potrebbe fuoriuscire in superficie. Il Comune di Hurum a Svelvik ha fornito i permessi per l'intero progetto, inclusa l'iniezione di CO₂, poiché il sito è una cava per l'estrazione di ghiaia, con rischi di impatto minimi e anche per il supporto della popolazione locale. Il Comune di Ringsaker, invece, ha concesso le autorizzazioni solo per la fase di caratterizzazione del sito a causa delle preoccupazioni sui possibili impatti sulle falde idriche. Sulla base di ciò, è stato scelto il sito di Svelvik.

2.1.4 Caratterizzazione del sito / lavoro di baseline

Il lavoro di caratterizzazione pre-iniezione è stato condotto nei diversi siti con vari gradi di approfondimento, a seconda degli obiettivi del progetto, dell'esperienza dei gruppi di ricerca coinvolti e delle condizioni del sito. La discussione che segue riassume le informazioni, divise per tipo di tecnica utilizzata, trovate in letteratura (per maggiori dettagli possono essere disponibili rapporti inediti).

Pozzi – Geologia / mineralogia

La perforazione di pozzi può essere fatta appositamente per la caratterizzazione del sito, o più comunemente, quest'ultima è integrata con la perforazione per lo sviluppo delle infrastrutture del sito. Gli obiettivi includono la definizione di una stratigrafia 3D, l'idrostratigrafia e la mineralogia (Tabella 1), come pure la misurazione dei parametri idrogeologici in situ (si vedano le prove idrauliche di seguito). Il recupero di carote è particolarmente interessante perché dà la possibilità di effettuare analisi di laboratorio, misure ed esperimenti, anche se in molti siti si sono incontrate diverse difficoltà nel completo recupero delle carote e/o nel prelievo di campioni di flusso accurati con la profondità, poiché spesso le perforazioni sono in sedimenti non consolidati.

Tabella 1. Riepilogo della geologia e mineralogia nei vari siti di iniezione superficiali di CO₂.

Sito	Porosità	geologia, litologia, stratigrafia	Mineralogia, chimica complessiva
ASGARD	Primaria - clastica	1.5 m di facies mista ad argille e sabbie, spesso intervallati a strati spessi 15 cm di ghiaie al di sotto dei 60 cm di profondità, in successione su argilliti del Mercia Mudstone Group.	-
PISCO2	Primaria - clastica	Celle di cemento riempite di 0.3 m ghiaie alla base, 1.7 m di sabbia e 0.5 m di suolo originario del sito.	-
ZERT	Primaria - clastica	Da 0.2 a 1.2 m di silt ricco in materia organica / suolo superficiale argilloso e uno strato a <i>caliche</i> , con elevato contenuto di calcite (~15%), a 0.5–0.8 m. Al di sotto del suolo, ghiaie sabbiose incosolidate a 5 m.	Il componente principale dei frammenti di roccia è l'andesite, anche se sono stati riconosciuti anche calcari / dolomie detritici. Le frazioni sabbiose e siltose consistono di quarzo, magnetite, plagioclasio, anfibolo, Biotite/clorite, feldspato.
Ginninderra	Primaria - clastica	Terriccio sabbioso e argilloso e occasionalmente ghiaia grossolana.	-
Latera	Secondaria - fratture	Vulcaniti quaternarie ricoperte da sedimenti alluvionali (silt, sabbie e argille), zone alterate in caolinite, travertino.	Olivine, clino-pirosseno, plagioclasio, sanidino, leucite, biotite di origine vulcanica. Quarzo, K-feldspato, pirosseno, ematite, albite di origine sedimentaria, vetro vulcanico.
Vrogum	Primaria - clastica	0.2 m di suolo, seguito da 5 m di sabbie eoliche, 0.3 m di ghiaie e 5 m di sabbie glaciali con ghiaia.	Geologia silicatica con TDS molto basso (20–30 mg/l) dominate da Na, Mg, K, Si, and Ca, contenuto in carbonato estremamente basso e bassa capacità di tamponamento.
Maguelone	Primaria - clastica	0-9 m di sedimenti lagunari con argille verde scuro; 9-60m di depositi continentali a grana fine (argille, silt) con depositi lacustri e fluviali locali. Ghiaie fluviali a 13-16m, utilizzate come intervallo di iniezione, sembrano avere tracce di H ₂ S.	La mineralogia del reservoir R2 ha il 57.5% di calcite, il 19.3% di quarzo, il 18.1% di argille (muscovite, kaolinite e clorite), 4.3% di albite e 0.8% pirite.
Wittstock	Primaria - clastica	L'acquifero superiore è formato da intercalazioni di sabbie, silt, argille e humus ed è spesso 11m, al di sotto di un acquifero costituito da terreno glaciale (~ 0.5m). un secondo acquifero è costituito da sabbie da 11.5 a 19.5 m.	Il secondo acquifero è senza carbonato.
CO2FieldLab	Primaria - clastica	Depositi glaciofluviali-glaciomarini: 0-50 m sabbie grossolane ben assortite con lenti di ghiaie, stratificazione incrociata, canali, ecc.; 50-300 m sabbie miste a silt e argille; bedrock a 300-400m.	quarzo (35–50%), plagioclasio (albite 23–33%), K-feldspato (ortoclasio 8–12%), mica (annite 1%, muscovite 3–6%), clorite (nimitite 3–9%), anfibolo (Mg-orneblenda 2–6%), calcite (2–4%).
Siena	Secondaria - fratture	10 m di argille siltose, 15 m di sabbie, 3 m di argille. Iniezione in un intervallo argilloso fratturato.	-
QICS	Primaria - clastica	20m di sedimenti glacio-marini e fluviali grossolani (ghiaie grossolane, sabbie fini, fanghi laminati) al di sopra di sedimenti glaciali / bedrock quarzatico.	TOC (0.4%) e TIC (<0.1%) bassi. I sedimenti contengono perlopiù SiO ₂ e Al ₂ O ₃ , alcuni K ₂ O, Na ₂ O, Fe ₂ O ₃ , CaO and MgO (1–3.1%), e in quantità minore TiO ₂ , MnO e P ₂ O ₅ (<0.5%)
INAS	Secondaria - fratture	3-10m di suolo (silt sabbioso e ghiaioso) su depositi sabbiosi; il basamento è costituito da granodioriti fratturate. Le zone di fratturazione nella granodiorite si trovano a 79, 81-88 e 88-95 m, con un'inclinazione di 60-80°.	La granodiorite è costituita essenzialmente da plagioclasio, quarzo e ortoclasio, in quantità minore da biotite e anfibolo.

Bakk et al. (2012) riporta l'uso del metodo della circolazione inversa per la perforazione del pozzo di esplorazione profonda a 330 m al CO2FieldLab, durante la quale sono stati acquisiti campioni di *cuttings* di buona qualità. I *cuttings* sono stati campionati per le analisi mineralogiche anche tra 1 e 24 m di profondità durante la perforazione del pozzo A2 (Humez et al., 2014). Barrio et al. (2014) affermano che il carotaggio superficiale continuo è stato eseguito dopo il test di iniezione, e non nella prima fase di caratterizzazione, per evitare di creare vie preferenziali di risalita verticali per il gas.

Nel sito di Maguelone sono stati acquisiti campioni in modo continuo da almeno 9 pozzo, perforati ad una profondità tra 12 e 80 m; essi sono stati utilizzati per definire la stratigrafia e l'idrostratigrafia del sito (Lofi et al, 2013; Pezard et al 2015). In particolare, sono state rinvenute condizioni di falda artesianica in un intervallo, l'esistenza di una falda marina e la presenza di un'unità altamente permeabile che può essere eventualmente utilizzata come

target per l'iniezione. Sfortunatamente, non sono state descritte le tecniche di perforazione utilizzate.

Il pozzo di iniezione nel sito di QICS è orizzontale, per cui non ha attraversato la stratigrafia attraverso cui passa il gas iniettato, e perciò non è stato oggetto di carotaggio (Taylor et al., 2015). D'altra parte però, è stato prelevato un gran numero di carote nella porzione molto superficiale nei primi 20-30 cm, per effettuare misure biologiche, mentre carotaggi a gravità sono stati effettuati all'esterno dell'area di iniezione, in modo tale da non creare vie di migrazione artificiali. Queste carote sono state utilizzate come dato di input per la modellazione della migrazione del gas durante l'esperimento.

Durante la fase di valutazione iniziale, sono state prelevate 2 carote ad una profondità di 10 m nel sito di Vrøgum, le quali sono state successivamente analizzate per la mineralogia, distribuzione granulometrica e contenuto di carbonato (Cahill e Jakobsen, 2013). In un secondo tempo sono state raccolte altre 5 carote in un intervallo di profondità tra 3.7 a 10.9 m, utilizzando un'unità di spinta diretta Geoprobe dotato di un sistema di campionamento di carote di suolo (Lassen et al., 2015). Il recupero delle carote è intorno all'80% (ma non inferiore al 45%) a causa della presenza di sabbie non consolidate liquefatte e/o di ciottoli che bloccano l'apertura del rivestimento. Le carote sono state fotografate e analizzate per la distribuzione granulometrica e (idro)stratigrafica.

Anche al sito di Wittstock sono stati prelevati campioni di sedimento nell'intervallo 0-19 m, utilizzando il sistema Geoprobe (Peter et al, 2011.); i campioni sono stati descritti visivamente e analizzati per la determinazione del contenuto di carbonio organico e inorganico e degli elementi maggiori e in traccia. Successivamente, sono stati eseguiti 9 sondaggi Geoprobe a spinta diretta, utilizzando lo strumento di elaborazione del profilo idraulico per avere un'elevata risoluzione della conducibilità idraulica e la misurazione della conducibilità elettrica. Inoltre, sono stati perforati altri 38 pozzi, sebbene non è del tutto chiaro in quali di essi sono state prelevate carote e quali tecniche di perforazione sono state utilizzate (Peter et al., 2012).

Carotaggi completi sono stati condotti sia a Latera, sia a Siena, anche se nei rapporti non sono stati riportati i dettagli dei metodi di perforazione utilizzati. La selezione degli intervalli di interesse è stata fatta sulla base della geofisica superficiale e dell'interpretazione degli strati altamente danneggiati, perché fagliati, dei quali non è stato possibile recuperare completamente le carote. Il carotaggio continuo è stato effettuato anche nel sito di INAS in due fori perforati fino a 100 m di profondità (Sustanto et al., 2016). In questo sito è caratterizzato da una roccia ignea fratturata, così che si può assumere che sia stato utilizzato il metodo della perforazione a diamante; le carote sono state utilizzate per quantificare la permeabilità secondaria legata a fratturazione.

Prove idrauliche

Gli *slug test* sono stati condotti presso Vrogum (Cahill e Jakobsen, 2013) e Wittstock (Peter et al., 2012) per calcolare la conducibilità idraulica; le prove di pompaggio sono state eseguite a CO2FieldLab (Humez et al., 2014) e Vrogum (Cahill e Jakobsen, 2013) per calcolare la trasmissività e la velocità del flusso in falda; un test del tracciante di sale è stato condotto a Wittstock (Peter et al., 2012) per determinare la direzione del flusso dell'acqua di falda, la dispersione e la velocità. Non sono stati eseguite prove idrauliche a QICS a causa di alcune preoccupazioni legate alla formazione di vie di migrazione artificiali nei sedimenti al di sopra del punto di iniezione (Taylor et al., 2015).

Tabella 2. Parametri idraulici misurati in alcuni siti di iniezione di CO2 superficiali. Alcuni valori sono stati convertiti per standardizzare le unità. Da notare che sono disponibili solo i dati di trasmissività del CO2FieldLab (5×10^{-4} to 4.5×10^{-2} m²/s)

Sito	Porosità	Permeabilità (Darcys)	Conducibilità idraulica (m/s)	Gradiente idraulico	Velocità flusso di falda (m/d)	Profondità falda (m)	Profondità iniezione (m)	Pressione idrostatica stimata (bar - gauge)
ZERT	-	-	Silt sabbioso superiore: 0.9×10^{-5} ; acquifero ghiaioso-sabbioso acquifero: 1.6×10^{-5}	-	2	1.5	2	0.05
QICS	0.4 a 0.6	-	-	-	-	-	23	2.3
Vrogum	-	-	Sabbie eoliche: 1.3×10^{-4} ; sabbie glaciali: 2.3×10^{-4}	0.0014	Sabbie eoliche: 0.05; sabbie glaciali: 0.1	1.5-2	5 e 10	0.8
Wittstock	-	-	2° acquifero: 4.5 to 6.8×10^{-4}	0.0014 a 0.0068	<0.1 a 1	3	18	1.5
CO2FieldLab	-	1-10, fino a 100 in intervalli a ciottoli	-	-	-	0.6-1.2	20	1.9
Maguelone	0.3 per sabbie, 0.38 per ghiaie, 0.6 per argille	20	Ghiaie fluviali: 4×10^{-3}	-	-	0.8	13 a 16	1.5

I parametri idraulici disponibili per un certo numero di siti (Tabella 2) evidenziano l'elevata capacità del flusso in questi sedimenti inconsolidati, indicati soprattutto dai valori medi di conducibilità idraulica, che è dell'ordine di 10^{-4} m/s, e della velocità di flusso in falda, fino a 1-2 m/d. I parametri idraulici dell'unico sito in cui l'iniezione è in una zona fratturata (INAS) purtroppo non sono disponibili, sebbene il tasso di iniezione di gas utilizzato durante l'esperimento (420 L/min) implica un'elevata permeabilità della roccia interessata da deformazione fragile.

Geofisica

Nei vari siti sono state condotte numerose indagini geofisiche per definire la *baseline*, sia per aiutare a caratterizzare la stratigrafia tridimensionale e l'idro-stratigrafia, sia per ottenere le condizioni di *baseline* dei parametri che ci si aspetta che possano cambiare (e che saranno poi monitorati) durante l'esperimento (ad esempio, conducibilità/resistività).

Le prospezioni geofisiche superficiali includono: resistività, sismica a riflessione e Ground Penetrating Radar (GPR) a CO2FieldLab (Bakk et al., 2012); tomografia di resistività elettrica (ERT) e tomografia sismica, sismica in foro e sismica time lapse a Maguelone (Pezard et al., 2016); sismica in mare con chirp e boomer a QICS (Taylor et al., 2015); ERT e EM, corrente diretta (DC) resistività elettrica e polarizzazione indotta (IP) a Vrogum (Cahill and Jakobsen, 2013; Doetsch et al., 2015); e ERT at Wittstock (Peter et al., 2012) e Siena. Le prospezioni geofisiche in foro comprendono: gamma ray, resistività, log sonico e ad induzione a CO2FieldLab (Denchik et al., 2014) e Maguelone (Pezard et al., 2016), cross-hole GPR e natural gamma logging a Vrøgum (Lassen et al., 2015).

Geochimica

Analisi geochimiche per determinare la baseline di acqua / roccia sono state eseguite a ZERT (Kharaka et al., 2010), CO2FieldLab (Humez et al., 2014), Vrogum (Cahill et al., 2014), Wittstock (Peter et al., 2012), e Siena (Ciotoli et al, 2005) per aiutare a:

- i) Valutare l'impatto di una fuoriuscita di CO2 sulla qualità delle acque sotterranee. In particolare, l'analisi chimica totale e/o mineralogica dell'orizzonte interessato dall'iniezione (Tabella 1), oltre che della falda ad esso associata definisce le condizioni di equilibrio della *baseline*. Questi risultati possono essere utilizzati per realizzare i modelli geochimici predittivi dell'impatto della CO2 su alcuni parametri, quali pH, dissoluzione / precipitazione dei minerali e rilascio di metalli tossici, e per comparare i modelli con i risultati sperimentali.
- ii) Testare strumenti di monitoraggio chimico delle acque sotterranee. Per esempio, alcuni parametri come conducibilità elettrica, pH, pCO2, alcalinità o alcuni elementi maggiori sono stati proposti come indicatori di una fuoriuscita di CO2 nell'acquifero. Gli strumenti di monitoraggio includono campionamento discontinuo o installazione di sensori per il monitoraggio in foro.
- iii) Definire i parametri che controllano la baseline dei risultati geofisici. Per esempio, i risultati delle misure di resistività o conducibilità elettrica (EM, ERT, ecc.) possono essere controllati dalla salinità dell'acqua, dal contenuto di argilla nei sedimenti, ecc.

Le misurazioni delle concentrazioni di gas nella zona insatura ("gas del suolo") e del flusso di CO2 all'interfaccia suolo / atmosfera sono state condotte sia per monitorare la migrazione della CO2 nella porzione superficiale del terreno, sia per determinarne l'impatto sulle piante. Uno studio di baseline è necessario poiché la CO2 è prodotta naturalmente nei suoli dalla respirazione microbica e dalle radici delle piante, e i suoi valori di concentrazione possono variare in funzione del tipo di suolo, contenuto d'acqua, temperatura, ecc. Misure manuali discontinue sono state condotte ad ASGARD (Smith et al., 2013), ZERT (Lewicki et al., 2007), Ginninderra (Feitz et al., 2014), PISCO2 (Gasparini et al., 2015), Grimsrud Farm (Moni and Rasse, 2014), CO2FieldLab (Jones et al., 2014), Siena (Ciotoli et al., 2005), Latera (Pearce et al., 2006) e INAS (Susanto et al., 2016), mentre un monitoraggio in continuo con sensori di CO2 sono stati utilizzati ad ASGARD (Smith et al., 2013), CO2FieldLab (Jones et al., 2014), e Lewicki

et al. (2007). Nei primi due siti sono state installate le sonde GasPro sviluppate dall'Università Sapienza, e che saranno utilizzate anche nel Sulcis Fault Lab.

Biologia

Lo studio della baseline della botanica e dei microbi presenti nel suolo è stato condotto ad ASGARD (Smith et al., 2013), Ginninderra (Feitz et al., 2014) e ZERT (Male et al., 2010), poiché ci si aspettava di avere un impatto sull'ecosistema superficiale, visto il tipo di esperimento pianificato (iniezione superficiale con possibilità di *leakage*).

2.1.5 Infrastrutture del sito (pozzi di iniezione, sistema di erogazione del gas, pozzi di osservazione, ecc)

Nella letteratura scientifica, sfortunatamente, le informazioni pubblicate sulle infrastrutture dei siti sono relativamente limitate, poiché la maggior parte degli articoli si concentrano sui risultati scientifici ottenuti durante gli esperimenti piuttosto che sulla costruzione e il funzionamento del sito. Unica eccezione sono le descrizioni molto dettagliate riportate in Taylor et al. (2015) per il sito QICS. Di seguito si fornisce una breve panoramica di ogni sito, in ordine dai meno ai più profondi.

ASGARD, UK

Il sito di ASGARD si trova nel campus dell'Università di Nottingham, Regno Unito, e si compone di 16 appezzamenti di terreno (figura 4a) dove la CO₂ è stata iniettata ad una velocità di 1 L / min in ciascun appezzamento ad una profondità di circa 60 cm attraverso tubi di polietilene inseriti con un angolo di 45° e aventi diametro di 2 cm. A causa della profondità di studio superficiale, non sono stati perforati pozzi nel sito. L'obiettivo principale di questa ricerca è stato quello di studiare l'impatto della fuoriuscita di CO₂ sull'ecosistema suolo - superficie (Smith et al., 2013; Smith et al., 2016) attraverso varie misure chimiche e biologiche su una griglia sopra ogni punto di iniezione e di non-iniezione per il background (Figura 4b). L'infrastruttura di monitoraggio permanente era costituita da tubi di campionamento per i gas del suolo e tubi di accesso per fotografare le radici in situ.

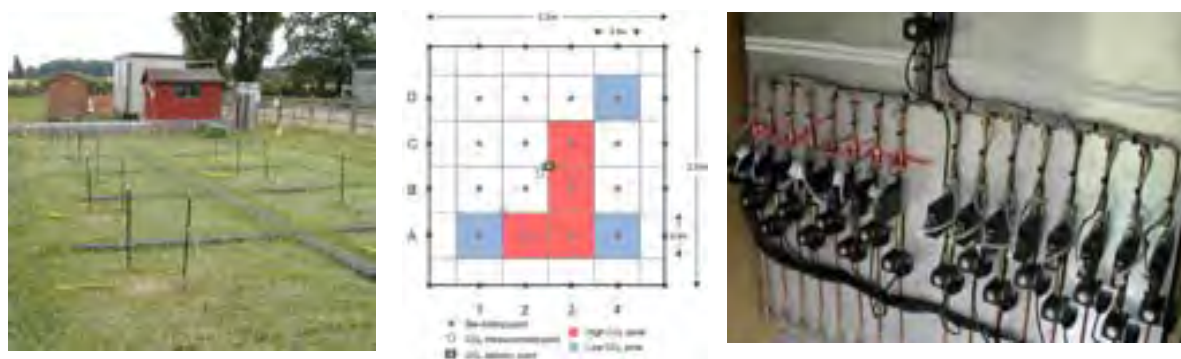


Figura 4. Infrastrutture del sito di ASGARD: a) tubi di alimentazione superficiale dei condotti di iniezione per ogni appezzamento studiato di 2,5 x 2,5 m, con serbatoi di gas e pannelli di controllo / uffici nella zona di

background; b) Rete dei punti di campionamento rappresentativa; c) punti di controllo del flusso di massa (Smith et al., 2013, 2016).

CO₂ liquida ad uso alimentare è stata conservata presso il sito in due contenitori criogenici da 200 L che venivano riempiti periodicamente da camion-cisterna, quando necessario (Smith et al., 2016). La CO₂ liquida veniva convertita in un gas e la pressione ridotta fino a circa 1,5 bar, dopo di che la CO₂ scorreva attraverso un sensore di flusso singolo seguito da 16 singoli controllori di flusso di massa (Figura 4c) che alimentavano ogni appezzamento (figura 4a). Il sistema è stato registrato, e i controllori di flusso di massa azionati, mediante un sistema di controllo computerizzato.

PISCO2, Spagna

Il sito PISCO2 è composto da 18, 4 x 4 x 2,2 m "celle" di cemento che sono state riempite con 20 cm di ghiaia coperti da 1,7 m di sabbia, ed infine 50 cm di suolo. L'iniezione di CO₂ a tassi tra lo 0,02 a 1 L / min avviene attraverso due griglie di 16 punti ciascuna situate a 1 e 2 m di profondità sotto la sabbia (Figura 5). Questo sito è stato costruito per studiare l'impatto della fuoriuscita di CO₂ sull'ecosistema e di sviluppare strumenti di biomonitoraggio (Gabilondo et al, 2015;.. Gasparini et al, 2015;.. Fernandez-Montiel El Al, 2015). Strumenti di monitoraggio installati in modo permanente inclusi tubi di campionamento e sensori integrati di temperatura, pH, e l'umidità relativa. Nessuna informazione potrebbe essere trovata nella letteratura riguardante lo stoccaggio e il flusso di CO₂, e il sistema di controllo, oltre a questo esempio in cui la CO₂ è stato iniettata ad una pressione di 0,25 bar.



Figura 4. PISCO2 Disegno schematic del sito (a) e foto di una delle celle di cemento riempite con la sabbia (b).

Grimsrud Farm, Norvegia

Il sito Grimsrud Farm, situato a 30 km SE di Oslo, Norvegia, è stato costruito scavando due 3 x 6 m trincee ad una profondità di 85 cm, e con l'installazione di un tubo di iniezione orizzontale ad una estremità, e poi riempite prima con 45 cm di sabbia e poi con 40 cm di suolo (Figura 6). E' stato iniettato il gas e avviato il monitoraggio del suolo e di superficie. Il sito è stato creato per studiare l'impatto potenziale di perdite di CO₂ sulla crescita delle piante e l'uso di isotopi stabili del carbonio a fini del monitoraggio (Moni e Rasse, 2014). L'unica infrastruttura di campionamento permanente era costituita da tubi di gas permeabili installati a 20 cm di profondità in punti sparsi in entrambe le trincee per il campionamento del gas del suolo.

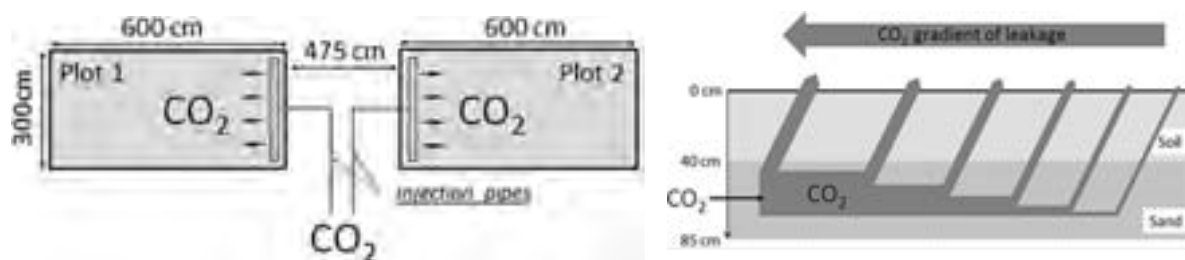


Figure 5. Schema del sito di iniezione di Grimsrud Farm (a) pianta; (b) profilo che mostra il grediente di perdita creato (Moni and Rasse, 2014).

Il sistema di erogazione di gas costituito da un pannello collegato a 2 gruppi di 12, 50 L di bottiglie, con il passaggio tra i due gruppi che avviene automaticamente quando la pressione del gruppo “iniezione attiva” di bottiglie, monitorato utilizzando regolatori di pressione integrati, scende sotto un pre-soglia di pressione impostata. La CO₂ iniettata è stata scelta per avere un valore significativamente differente del $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ rispetto a quello dell’atmosfera o a quello della CO₂ nel suolo del sito.

ZERT

Il sito ZERT, uno dei primi siti test focalizzato sul CCS e sulla prova di iniezione, è stato costruito nel campus della Università Montana State nel 2006 per studiare i processi di migrazione del gas in prossimità della superficie, per testare le tecnologie dei sistemi di monitoraggio superficiali e controllo per l'impatto di CO₂ sull’ecosistema. Data la sua poca profondità di iniezione, gli esperimenti sono stati progettati in modo tale che la maggior parte della CO₂ iniettata si sarebbe dispersa nell'atmosfera.

A ZERT è stato perforato un pozzo orizzontale di 100 m di lunghezza a circa 1,3-2,5 m di profondità sotto la superficie del suolo, sotto la falda, nei sedimenti alluvionali (Lewicki et al, 2009; Spangler et al, 2010). Il tubo di iniezione è di 10,1 centimetri di diametro, 304 L di tubo in acciaio inox con una sezione di 70 m di lunghezza a taglio (area aperta del 0,55%), che è diviso in sei zone di iniezione, lunghe 12 m, con packers di 0,4 m di larghezza gonfiati con aria compressa (figura 7a). Il pozzo è stato perforato con un fluido di perforazione biodegradabile (Cleandril; Cetco) ed è stato poi lavato con un enzima in fase di sviluppo; gli autori affermano che la bentonite è stata evitata e ciò avrebbe reso il pozzo impermeabile e a connettività ridotta con la formazione circostante. I ciottoli nello strato di ghiaia forato hanno causato una deflessione della punta del trapano e deviazione rispetto all'orizzontale, quindi questa posizione è stata verificata (e la perforazione corretta) ogni 4,6 m. Per fornire un sistema di riferimento comune per i ricercatori, è stata stabilita, con strumentazione GPS adeguata, una griglia con 10 m di spaziatura centrata sul pozzo orizzontale.

CO₂ ad uso alimentare proveniente da giacimenti di gas naturale è stata immagazzinata in loco come liquido refrigerato e convertito in un gas da un vaporizzatore. Un regolatore in linea abbassava la pressione fino a circa 55 psig (pressione relativa di 3,8 bar) prima di entrare nel sistema controllore del flusso di massa a una temperatura paria quella ambientale. Ciascuna

delle 6 zone di iniezione aveva un sistema idraulico individuale e un controllore del flusso di massa dedicato, con linea di pressione, zona di pressione e portata ad ogni zona (e temperatura e pressione superficiale) essendo costantemente monitorata e registrata. Le pressioni di iniezione erano solo leggermente superiore a quella atmosferica (0-6 psi; 0-0,4 bar) per garantire l'assenza di distorsioni della formazione circostante. Una fotografia aerea del layout del sito (figura 7b) mostra la posizione anche del serbatoio di CO₂ e l'edificio che ospita il sistema di controllo di flusso CO₂.

I pozzi di monitoraggio sono stati installati in prossimità dell'ultima zona di iniezione per studiare l'impatto della CO₂ sulla qualità delle acque sotterranee (Figura 7c, d). Questi consistevano in cinque coppie di piezometri PVC di 5 centimetri di diametro installati a 3 m (A) e 1,5 m (B), con finestratura negli ultimi 0,76 cm, e si trova da 1 a 6 m sotto gradiente dal pozzo orizzontale (tranne 1A e 1B sopra gradiente). Tre pozzi aggiuntivi sono stati installati in seguito: pozzo W6 - 2,6 m di profondità con finestra permeabile a 0,76 centimetri; e Wells W7 e W8 - 3 m di profondità con 1,5 m di finestratura (Fig. 7).

Modellazione pre-iniezione di pressioni e modelli di migrazione sono stati elaborati sul sito per progettare una rete di monitoraggio e per contribuire a scegliere i tassi di iniezione appropriati che producano: (1) piccolissimo aumento di pressione intorno al pozzo per minimizzare fratturazione, (2) infiltrazioni rilevabile flusso, e (3) tempi di rottura ragionevoli.

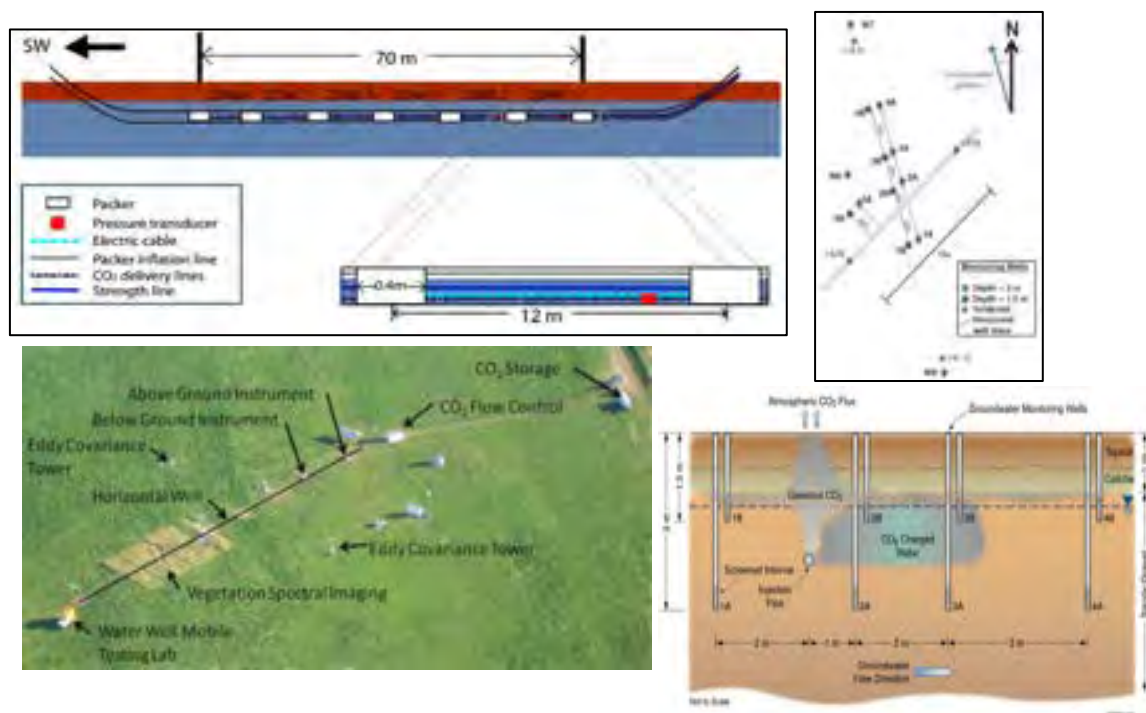


Figura 7. Infrastrutture del sito di ZERT : (a) schema del pozzo orizzontale e i packers; (B) foto aerea del sito; (C) veduta della mappa che mostra la posizione dei pozzi di osservazione verticali relativi alla sesta sezione del pozzo orizzontale; e (d) sezione che mostra le profondità e le posizioni dei pozzi di monitoraggio relativi alla risalita di acqua arricchita di CO₂ proveniente dal pozzo di iniezione orizzontale (Spangler et al, 2010; Apps et al, 2011; Barr et al., 2011).

Ginninderra

Il pozzo orizzontale a Ginninderra (Feitz et al., 2014) è stato modellato su quello a ZERT e ha caratteristiche molto simili (Figura 8a). Anche se i dettagli di perforazione non sono disponibili, il sistema down-hole consisteva in un tubo HDPE lungo 120 m e 12,5 cm di diametro che è stato scanalato ogni 50 cm in un intervallo di 100 m e sepolto a una profondità di 2 m in un campo agricolo (figura 8b), con 6 camere di accumulo create usando dei packers (Figura 8c, d, e). La CO₂, proveniente da un impianto di etanolo, aveva un valore $\delta^{13}\text{C-CO}_2$ di circa -18 ‰ e veniva fornita al foro di iniezione tramite un serbatoio di CO₂ liquida di 2,5 t situato in superficie (Figura 8f) e che veniva riempito ogni 2-3 settimane; Nessuna altra descrizione di altre infrastrutture di approvvigionamento di gas è stato trovato nella letteratura.



Figura 8. (a) Schema del pozzo orizzontale perforato nel sito Ginniderra; (B) foto aerea del sito; (C) sistema packer prima dell'installazione; (D) il tubo di iniezione; (E) Primo piano del tubo di iniezione scanalato; (F) serbatoio di alimentazione della CO₂ sulla superficie (Feitz, 2013; Feitz, 2014; Feitz et al, 2014).

Latera

L'esperimento di iniezione a Latera, condotto nell'ambito del progetto finanziato dalla CE NASCENT, CCS-focalizzato, ha comportato l'iniezione di una miscela di CO₂-Ar-He in una faglia e il monitoraggio della successiva migrazione del gas e perdite in superficie. Il pozzo di iniezione è stato perforato a 25 metri di profondità, diametro di 100 mm, 55° inclinazione e il nucleo è stato recuperato (prevalentemente sedimenti vulcanoclastici). Il pozzo è stato

finestrato tra 9 - 12 m in corrispondenza della faglia. L'intervallo di screening era sabbia imballata e il resto della corona circolare è stata sigillata con bentonite. Sono stati installati sei piezometri di osservazione a 5 m di profondità verticali nei pressi del pozzo di iniezione, però dei piezometri solo il 3, 4 e 5 avevano acqua sufficiente per il campionamento (figura 9a).

Un singolo packer (lungo 1 m, 63,3 millimetri di diametro manicotto in gomma) è stato abbassato appena sopra la sezione finestrata e gonfiato fino ad una pressione di 6-8 bar con aria compressa. Un secondo tubo di acciaio inossidabile passava attraverso il packer per iniettare gas nella finestratura. Un cilindro 6400 L riempito con He (40%), CO₂ (20%) e Ar (40%) è stato collegato a questo tubo in acciaio inossidabile, con regolatori di pressione, ed un flussometro che è stato calibrato per la miscela di gas selezionata (Figura 9b) . La pressione di iniezione del gas è stata mantenuta leggermente al di sopra di quella idrostatica più capillare (c. 3 bar).

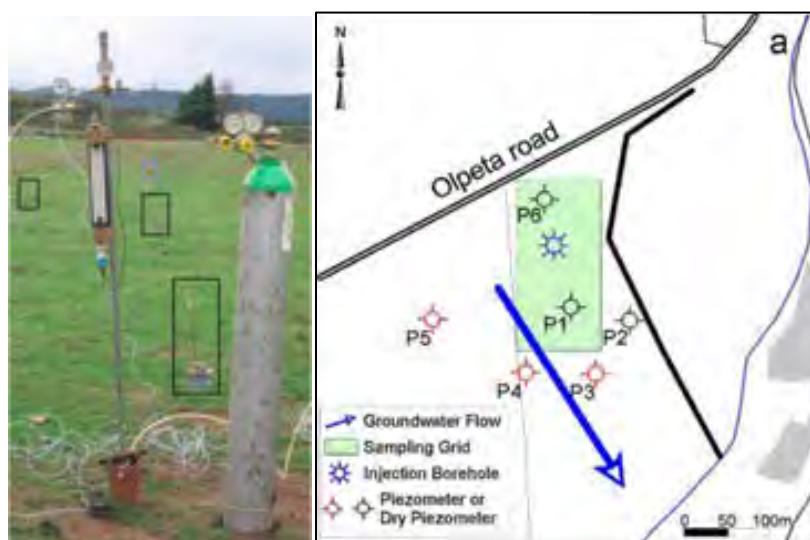


Figura 9. (a) Mappa del pozzo di iniezione e piezometri di osservazione. (B) Iniezione del gas mostra la bomboletta di gas, manometri, e il misuratore di flusso del gas. I quadrati neri delineano sonde di gas del suolo e il quadrato blu segna un piezometro di osservazione (Pearce et al., 2006).

Vrogum

Presso il sito Vrogum (Figura 10a) i 4 punti di iniezione (Figura 10b) sono stati installati a 45 ° utilizzando Geoprobe (modello 7822DT) un sistema di spinta diretta, reso possibile dalla profondità (massimo 10 m) e la natura non consolidata dei depositi di sabbia . Si sperava che il metodo di spinta diretta utilizzato, in combinazione con l'inclinazione di 45 ° e il crollo dei sedimenti durante la rimozione dell'asta trapano, avrebbe minimizzare il rischio di migrazione della CO₂ lungo i tubi di trasferimento installati. I tubi di trasferimento erano tubi in polietilene di 2 cm di diametro, mentre i punti di iniezione erano lunghi 1,5 m, 2,5 centimetri di diametro, dimensione dei pori 20 µm Schumasoil® delle finestre che sono state installate a due intervalli di profondità (2 finestre a 3,9-5 metri e 2 finestre 8,9-10 m; Figura 10b) (Cahill et al, 2014). L'intento era quello di simulare il gas proveniente da una breve fessura, la creazione di una

cortina di bolle di CO₂ attraverso il quale le acque sotterranee scorreva, e per studiare il conseguente impatto di CO₂ sulla chimica dell'acqua.

Un totale di 29 pozzetti di campionamento multilivello (2,4, 6, 8, 10, e 12 m di profondità) sono stati installati principalmente sotto gradiente dall'orizzonte di iniezione (Figura 10c, d). I pozzetti di campionamento erano tubi di polietilene di 4 millimetri di diametro collegati ad un tubo di diametro di 12 mm, con 10 cm di finestratura, che ha dato un buon equilibrio tra basso volume di spurgo e bassa resistenza al flusso. I punti di campionamento sono stati installati utilizzando un sistema a spinta diretta Geoprobe (modello 7822DT) con punte di plastica usa e getta per limitare la contaminazione da metalli.

I pozzi di iniezione sono stati collegati ad un sistema di controllo di consegna del gas contenente quattro singoli controllori di flusso di massa gestiti dal software associato con una batteria di 1600 kg di gas CO₂ (Figura 11)

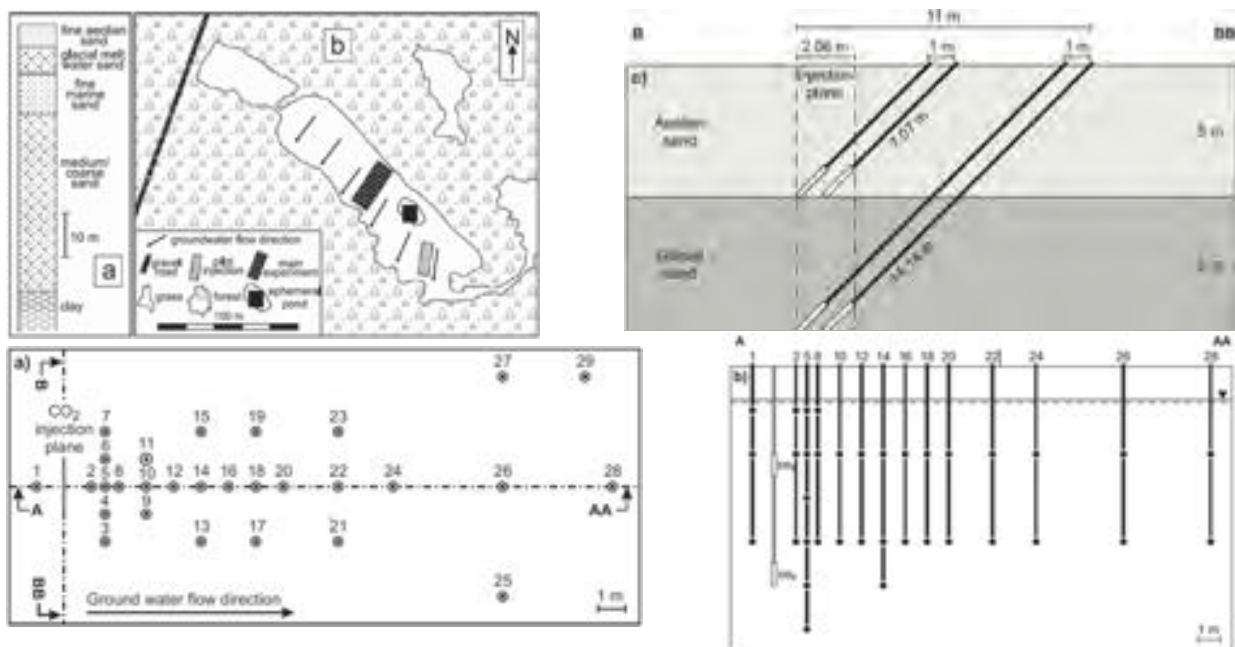


Figura 10. Sito di Vrogum: (a) posizione; (B) la configurazione di iniezione perpendicolare alla direzione di flusso delle acque sotterranee; (C) la distribuzione di pozzi di monitoraggio; e (d) sezione di pozzi di monitoraggio multilivello parallela alla direzione di flusso delle acque sotterranee (Cahill et al., 2014).

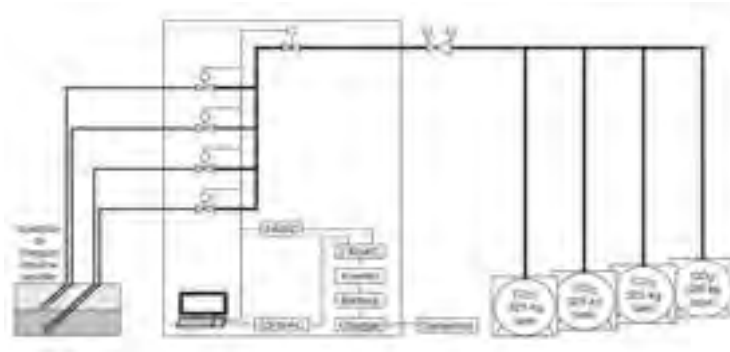


Figura 11. Schema del sistema di erogazione di gas utilizzato a Vrogum (Cahill et al., 2014).

Maguelone

Il sito di Maguelone è stato costruito lungo il lido Mediterraneo del Golfo del Leone per studiare i sedimenti costieri porosi saturi con fluidi salini e testare vari strumenti di monitoraggio geofisici in foro e di superficie. Come illustrato nella figura 12 il sito è costituito da un foro di iniezione di gas (GIH), un osservatorio idrologica in foro (DHO, consistente in un sistema multilivello WestBay), un osservatorio sismico in foro (DSO), un time-lapse di registrazione del pozzo (TLL), un osservatorio sismico di superficie (SSO), e un osservatorio di superficie di resistività elettrica (SEO). Tutti i fori di monitoraggio sono stati perforati e dotati di tubazioni in PVC fino a ~ 20 m di profondità e strumentati su tutta la loro lunghezza.



Figura 12. Maguelone (a) posizione del sito, (b) infrastrutture, (Pezard et al., 2016), e (c) bombole di gas di CO₂ durante l'esperimento di iniezione (<http://www.CO2mustang.eu/>).

Il pozzo di iniezione viene finestrato sull'intervallo di 13-16m. Il sistema DHO WestBay è stato costruito per accedere a un totale di 8 intervalli (8.0, 14.0, 15.5, 24.9, 32.1, 36.7, 39.8 e 49.0 m) che consentono il controllo della chimica del fluido dei pori, la temperatura e la pressione ad ogni livello (Pezard et al., 2016). I due pozzi profondi c. 18 m erano attrezzati con resistività elettrica (DEO7, DEO9) e sono costituiti da elettrodi di rame dorati montati sulla parte esterna di un tubo in PVC, con DEO7 avente 70 o 10 cm di distanza fra gli elettrodi (a seconda dell'intervallo) e DEO9 avente distanza tra gli elettrodi 35 centimetri per misure dipolo-dipolo. Nel DSO, 3 componenti, 28 geofoni Hz sono stati installati a 7, 12 e 17 m profondità, con martello come sorgente utilizzato a una posizione di 2m fissa dalla testa del pozzo. Infine, il foro TLL6 è stato rivestito in PVC e raggiunge 20 m di profondità. Non è stata trovata nessuna informazione per quanto riguarda il sistema di erogazione del gas, diversa dalla fotografia delle bombole di CO₂ utilizzate (Figura 12c).

Wittstock

Il sito di prova a Wittstock si trovava in un campo da pascolo 90 x 60 m ed è stato costruito per studiare l'impatto della CO₂ sulla qualità dell'acqua, e per testare la chimica dell'acqua e i metodi di monitoraggio geofisici. Tre iniettori verticali "lance" sono stati installati a 5 m fra loro lungo una linea perpendicolare alla direzione del flusso GW, in pozzi perforati con tecnologia SonicDrill. Le "lance" di iniezione consistevano in un sistema di tubi multicanale a 3 canali (CMT, Solinst) aventi un diametro esterno di 2,75 cm, con una finestratura di iniezione

di 20 cm situata ad una profondità di 18 m. Packers di Bentonite erano stati installati sopra l'orizzonte di iniezione, in corrispondenza di una barriera caprock di argilla, per impedire la migrazione CO₂ lungo il tubo. Sensori di ossigeno sono stati installati sopra e sotto il punto di iniezione, e test di iniezione dell'aria iniziali hanno mostrato la tenuta della guarnizione. (Lamert et al, 2012; Peter et al, 2012; Schulz et al 2012).

Un totale di 34 pozzi di monitoraggio delle acque sotterranee sono stati installati presso il sito, la maggior parte dei quali si trovava sotto gradiente dai tre punti di iniezione (Figura 13). Questi consistevano in quattro diversi tipi di pozzo (Peter et al, 2012): (i) 12 pozzi di 5 cm di diametro forati utilizzando un metodo di foratura a secco convenzionale e aperti ad un intervallo di 6 m; (ii) un pozzo di 10 cm di diametro perforato utilizzando tecnologia di perforazione asciutta e finestrato su un intervallo di 3 m (questo pozzo più ampio è stato utilizzato per ospitare la sonda di monitoraggio continuo); iii) 7 pozzi di 2,5 cm di diametro installati utilizzando la tecnologia SonicDrill, quindi non richiedeva nessun riempimento dello spazio anulare come i pozzetti che sono stati inseriti direttamente nel pozzo collassato. Comunque bentonite sigillante è stata installata alla profondità dell'aquitard per evitare risalita di CO₂ lungo il rivestimento del pozzo. Finestre filtranti un metro sono stati installati a 12,5-13,5, 14,5-15,5 e 17,5-18,5 m profondità per il campionamento packer; e (iv) la tecnologia Direct Push è stata usata per guidare pneumaticamente il basso flusso prodotto dalle pompe direttamente nel sedimento a tre diverse profondità (12, 15, 18 m) e in 10 diversi punti e ad una profondità di altri quattro punti.

Le lance di iniezione e 33 dei pozzi di monitoraggio sono stati dotati anche di un totale di 300 elettrodi di rame a forma di anello per le indagini geoelettriche (Lamert et al., 2012). Gli elettrodi sono stati fissati sulla superficie esterna del HDPE / MDPE materiale da 1 a 1,5 m di spaziatura per consentire un controllo della resistività elettrica del pozzo e tra i pozzi nell'intero spessore della seconda falda. I pozzi di monitoraggio GWM1D, GWM2D e GWM3D avevano elettrodi supplementari con spaziatura a 0,75 m).

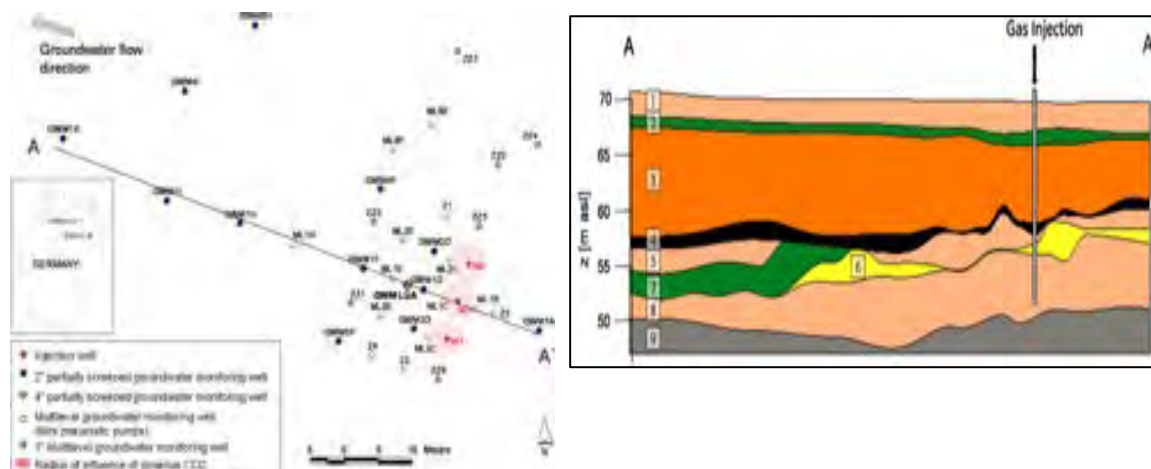


Figura 13. Sito di test di iniezione di Wittstock: (a) il layout dei tre punti di iniezione verticali (in rosso) e i pozzi di monitoraggio installati in loco; e (b) sezione geologica che mostra uno dei punti di iniezione verticale (Peter et al., 2012)

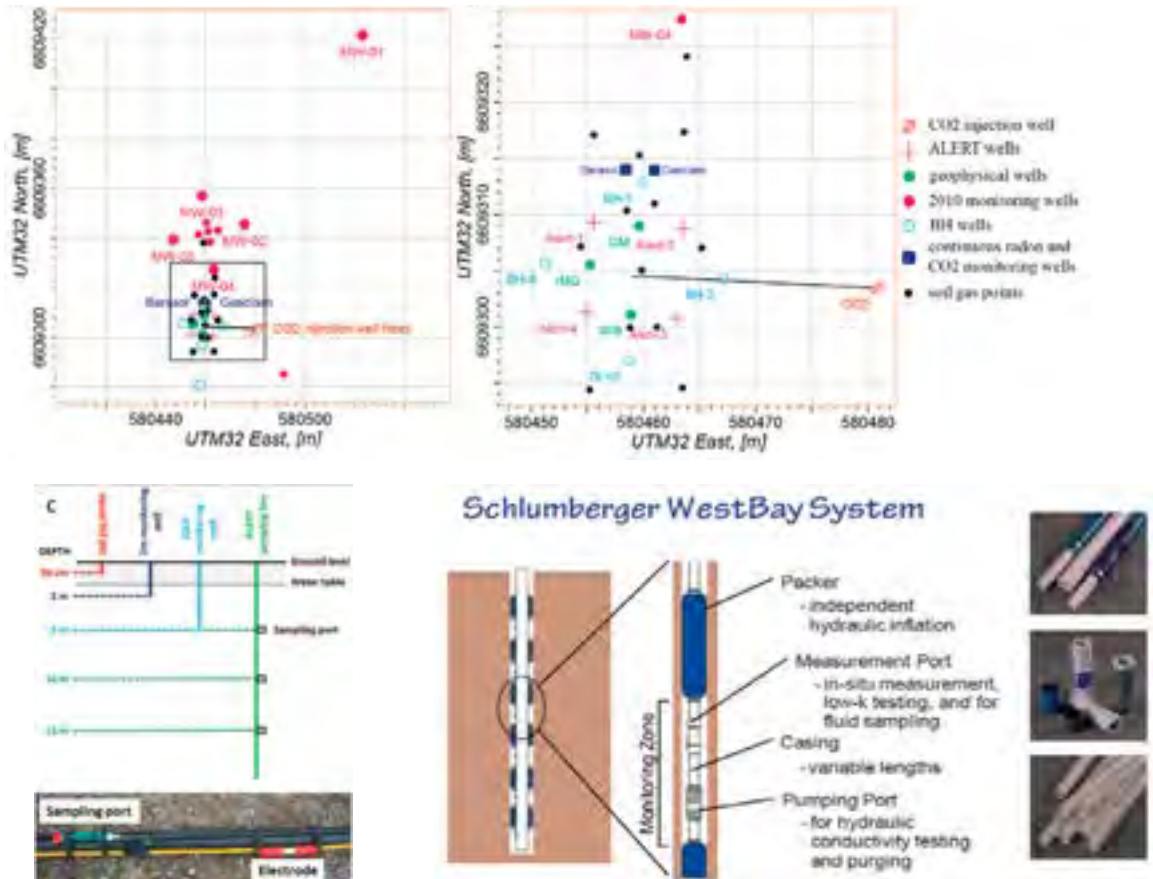


Figura 14. Sito CO2FieldLab: (a) le operazioni di perforazione; (B) vista del sito, mostrando serbatoio CO2 a destra, la testa di pozzo a fianco del serbatoio all'interno del recinto, e una varietà di edifici di controllo / operazioni - notare che il foro immerge 45° e inietta alla profondità di 20 m a metà strada tra il serbatoio e la cabina portatile blu; (C) il layout di pozzi per tutta l'area (a sinistra) e il dettaglio della zona di iniezione (a destra); (D) distribuzione della profondità di diversi pozzi di campionamento delle acque sotterranee; (E) West Bay sistema a più livelli (Gal et al, 2013;.. Barrio et al, 2013; Jones et al 2014).

CO2FieldLab

Il sito CO2FieldLab è stato costruito per studiare la sensibilità dei sistemi di monitoraggio superficiali della CO2 tramite l'integrazione di numerose tecniche geochimiche e geofisiche. Il pozzo di iniezione al CO2FieldLab era inclinato di 45 ° e perforato a una profondità di 20 m con un martello pneumatico “down-the-hole” (ODEX) (Figura 14a) (Humez et al., 2014). L'installazione e perforazione ha prodotto un foro di diametro maggiore, l'inserimento del

tubo di iniezione, l'estrazione dei tubi di diametro di perforazione più grandi, e l'iniezione di cemento per riempire il vuoto intorno al tubo di iniezione (Barrio et al., 2014). Nonostante queste precauzioni è risultato essere molto difficile ottenere una buona tenuta di cemento in un pozzo inclinato in materiale sciolto, con conseguente fuoriuscita lungo il foro (Jones et al., 2014). Un totale di 1,7 tonnellate di CO₂ sono stati iniettati con una pressione di testa pozzo di 1,9-2 bar da un grande serbatoio di CO₂ in loco (Figura 14b).

Numerosi pozzi di osservazione e monitoraggio sono stati perforati nel sito CO₂FieldLab (Figura 14c, d), inclusi dei pozzi profondi 5 m di prova idraulica perforati nel 2010 a nord della zona di iniezione, e pozzi profondi 2 m (BH in figura), quattro pozzi ALERT, e tre pozzi geofisici.

I quattro pozzi ALERT (Automated time-lapse Electrical Resistivity Tomography) consistevano in 32 elettrodi schierati in foro per ogni pozzo (separazione verticale 0,75 m) installati ad una profondità di 24 m. Situato agli angoli di un quadrato 8 x 8 m centrato sul punto di iniezione, sono stati utilizzati per eseguire 4D ERT in foro. Oltre agli elettrodi, 3 porte per il campionamento delle acque sotterranee sono stati installate a 5, 10, e 15 m di profondità sui pozzetti ALERT (disegno e fotografia in Figura 14d).

I tre pozzi geofisici (Figura 14c) consistono in TLL (Time-Lapse registrazione pozzo) per l'induzione e la registrazione del suono, la IMG (imaGeau) per osservazioni in foro di resistività elettrica, e la WB (West Bay multi-packer osservatorio idrodinamico). La IMG è stato utilizzato per monitorare automaticamente le modifiche di resistività nella zona del foro nel tempo. Si trattava di un diametro di 12,5 centimetri, 20 m tubo in PVC lungo la quale sono stati fissati elettrodi di rame placcati in oro ogni 70 cm sulla sua superficie esterna per dare un totale di 25 livelli di misurazione di resistività (Denchik et al., 2014). Il sistema Westbay è un dispositivo di monitoraggio delle acque sotterranee multilivello modulare che consente all'utente di testare la conducibilità idraulica, monitorare la pressione del fluido e raccogliere campioni di liquido da più zone (Figura 14e).

QICS

La perforazione, l'installazione e le caratteristiche del pozzo orizzontale al sito QICS sono descritte in dettaglio in Taylor et al. (2015). Questo pozzo era lungo 350 m, partiva da un angolo di circa 16° prima di appiattirsi e quindi risalire al fine di penetrare nei sedimenti marini dal basso (Figura 15). Diverso dagli altri due pozzi orizzontali descritti sopra, l'iniezione nel sito QICS è stata condotta solo alla fine del pozzo e non lungo la sua lunghezza. Il punto di iniezione è stato di 11 m al di sotto del fondale marino e 23 m sotto il livello medio del mare. La perforazione è stata effettuata utilizzando batteria di perforazione tubolare d'acciaio e tricono di 16,5 cm di diametro con inserito un perno di carburo di tungsteno. Il fluido di perforazione era acqua e bentonite. La posizione 3D è stata monitorata con bobina di filo EM eccitata sul fondo del mare e dei sensori appena dietro la punta. L'iniezione era attraverso un diffusore di lunghezza 5 m composta da una maglia di 316 cunei gradati in acciaio inox (apertura 0.5 mm) saldati a 316 tubi 1 (Figura 15d). Per garantire l'assenza di flusso lungo il pozzo, un tubo di

cemento è stato usato per sigillare 100 m dalla fine. Non è stata installata strumentazione nel pozzo di iniezione, ma solo a testa pozzo.

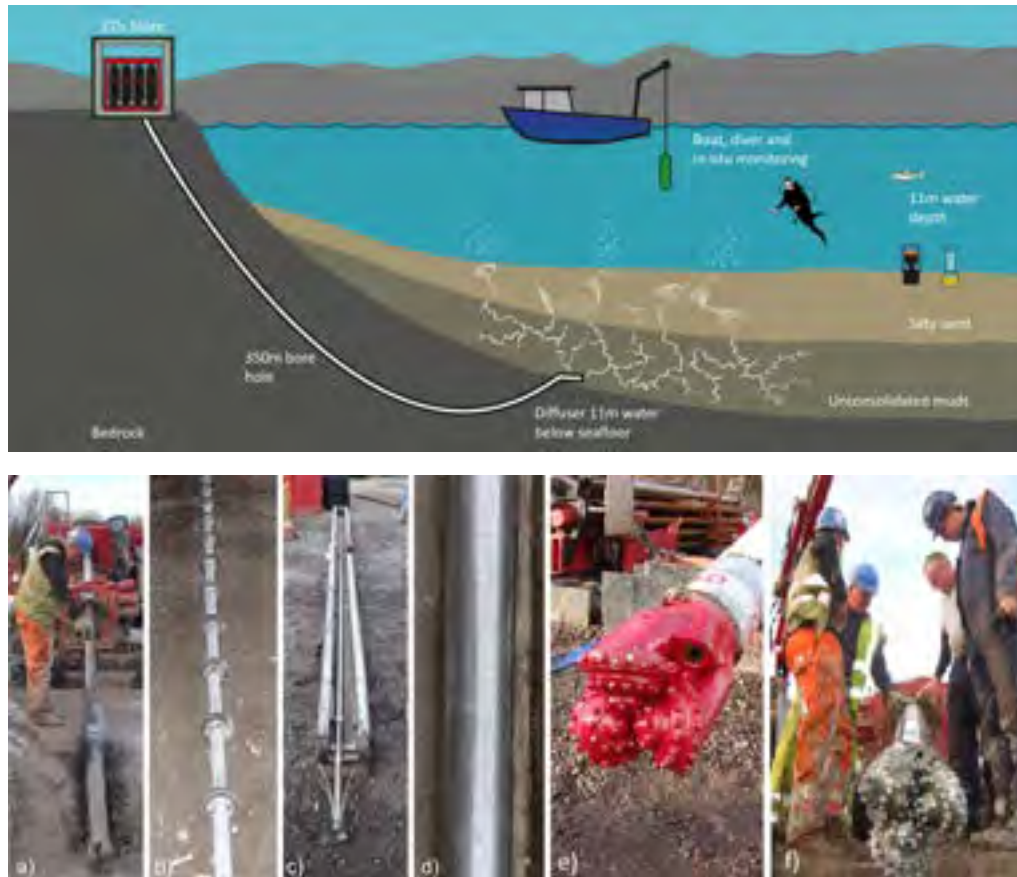


Figura 15. In alto - Schema del foro di iniezione di QICS, forato da terra in una posizione di off-shore entro fanghi non consolidati sotto il fondo del mare; nota esagerazione verticale. In basso - (a) drill rig; (B) tubo di diametro 5 cm; (C) finestra di dispersione di gas; (D) Primo piano della finestra; tri-cono prima (e) e dopo (f) foratura (Taylor et al., 2015).

La CO₂ iniettata è stato stoccata in loco in quattro cilindri Manifolded Cylinder Pallets (MCP's), ognuno dei quali è costituito da 15 cilindri standard da 80 kg, collocati in una cornice e collegati insieme ad un unico punto di uscita del gas. L'MCP sono stati alloggiati in un contenitore lungo 6 m aperto per la protezione dagli elementi e per consentire una buona ventilazione in caso di una perdita (Figura 16a, b); il contenitore è stato dotato di un allarme CO₂ per la sicurezza. Gli MCP sono stati collegati ad un collettore automatico (figura 16c), con due MCP attivi nell'iniezione e due in standby. La commutazione tra i due blocchi è stata compiuta automaticamente quando la pressione di alimentazione scendeva sotto un valore di soglia, seguita dalla sostituzione dei due MCP vuoti. Il collettore è stato riscaldato per evitare il congelamento, il gas è stato dimesso dalla pressione del cilindro di pressione di iniezione e i tassi di iniezione erano alti. La portata è stata regolata da un computer controllato da un flussometro di massa e di controllo (in litri STP al minuto) che ha registrato la pressione, la temperatura e il tasso di iniezione di gas ogni 12 secondi. Dal controllore di flusso di massa un tubo conduceva la CO₂ alla testa, dove un manometro e valvola di intercettazione sono stati installati per la prova di tenuta ed una valvola di controllo installata per impedire che la

pressione idrostatica spingesse i gas fuori pozzo se il flusso di gas veniva interrotto. Nessuna installazione permanente di controllo, come i pozzi di osservazione, sono stati installati presso il sito.

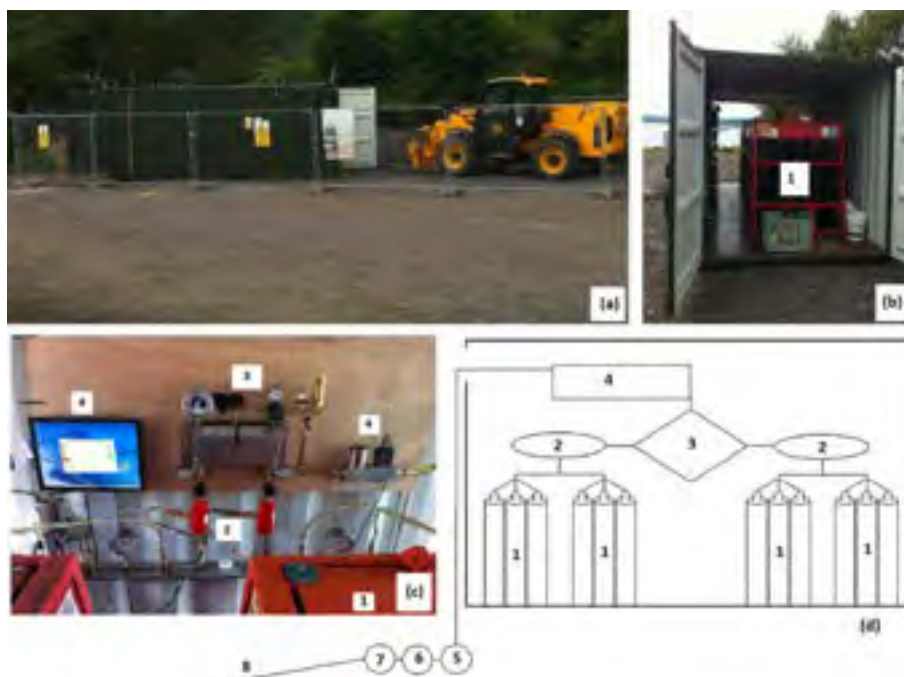


Figura 16. Le fotografie che mostrano il contenitore (a) contenitore di serbatoi di gas (b) ed il collettore di controllo (c). Lo schema del sistema di erogazione dei gas a (d) si riferisce a: (1) MPC, (2) riscaldatori, (3) collettore automatizzato, (4) computer misuratore di flusso e controller, (5) la valvola di ritegno, (6) valvola di chiusura, (7) manometro, (8) foro (Taylor et al., 2015).

Siena Graben

I test di iniezione condotti a 25 km ad est di Siena, in Italia, sono stati eseguiti per comprendere meglio i processi di migrazione del gas lungo una faglia minore nel contesto della ricerca di smaltimento dei rifiuti nucleari (Ciotoli et al., 2005). Il monitoraggio consisteva in misure di gas del suolo, flussi e analisi delle acque.

Il pozzo di iniezione di questo sito aveva un diametro di 180 mm, inclinato di 63°, perforato a una profondità di 27 m al di sotto della superficie del terreno, e finestrato da 20 - 26 m (Figura 17a); purtroppo non si fa menzione del materiale di involucro né la tenuta tra casing e foro. Un singolo, packer lungo 1 m è stato installato appena sopra l'intervallo di screening e gonfiato a 6-8 bar (appena sopra carico litostatico) utilizzando un compressore d'aria. La composizione delle acque sotterranee è stata monitorata in due pozzi aggiuntivi: uno verticale di 70 m di profondità posizionato circa 35 m NO del pozzo di iniezione e di un piezometro, 15 m di profondità, verticale situato a circa 10 m W del pozzo di iniezione (Figura 17b). La falda è stata incontrata a 7 m di profondità.

Il sistema di iniezione del gas era costituito da due bombole di gas, una contenente circa 8000 L STP di puro He e l'altro contenente circa 4000 L STP di CO₂ pura. Durante il primo esperimento solo l'He era stato iniettato. Invece, il secondo esperimento ha coinvolto

l'iniezione di He e CO₂ alternati; sulla base di calcoli della densità e del volume l'He è stato iniettato per circa 2 minuti ogni ciclo, mentre la CO₂ è stata iniettata per circa 11 minuti. L'iniezione è stata regolata utilizzando i regolatori di pressione del cilindro di testa e un pannello con due manometri e misuratori di portata. La pressione di iniezione del gas è stata mantenuta leggermente al di sopra di quella idrostatica (circa 1,4 + 0,1 bar), ma ben al di sotto della pressione litostatica (circa 4 bar).

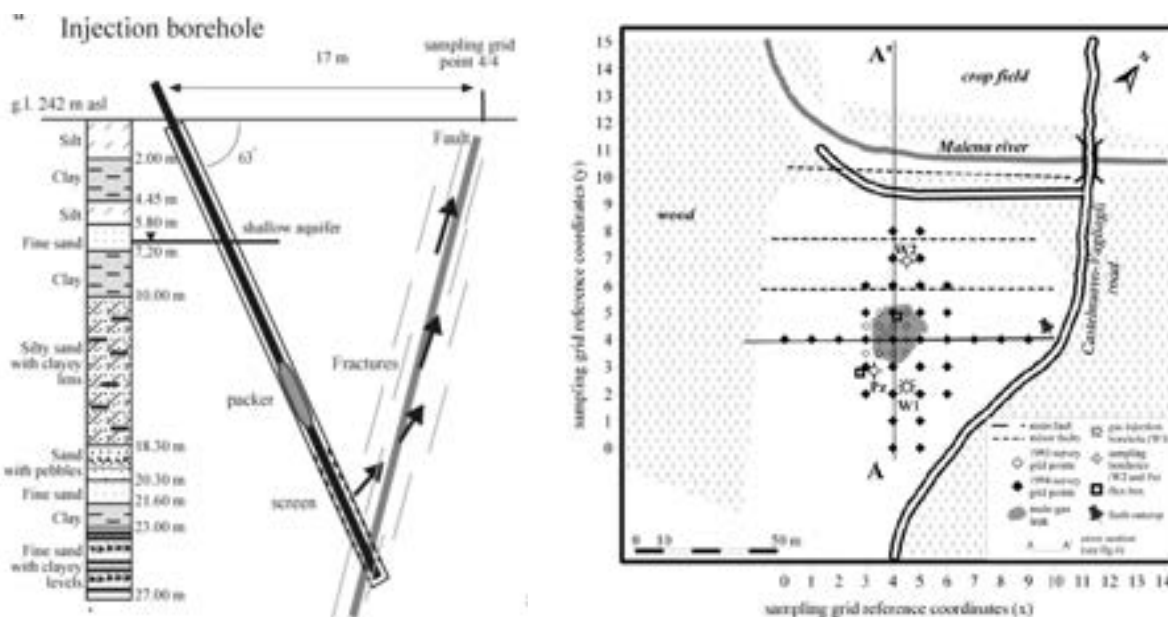


Figura 17. Sezione trasversale (a) mappa (b) della CO2 più il test di iniezione dell'He presso il sito di Siena.

INAS

Tra i siti di test di iniezione gas CCS di CO₂, INAS è l'unico nel quale si è iniettato in una frattura nella roccia ignea. Il suo obiettivo era quello di studiare la migrazione del gas in tali strutture e di testare i metodi di monitoraggio geochimico di gas (in particolare utilizzando H₂ come tracciante di preallarme).

Due pozzi profondi (X e Y in figura 18a) sono stati perforati a 24 m di distanza fra loro nelle rocce granodioritiche ad una profondità di 113 e 100 m (Susanto et al, 2013; Susanto et al. 2016).; anche se non dichiarato, questi pozzi sono stati a distruzione essendo la roccia dura, e quindi sono state utilizzate tecniche di perforazione con il diamante. Il pozzo "X" ha un diametro di 10 cm ed è rivestito (più cemento sigillante nell'anello) fino ad una profondità di 70 m, mentre è lasciato scoperto da 70 a 113 m con diametro di 7,6. Il pozzo "Y" è di 15 cm di diametro e 30 m di profondità e 7,6 cm di diametro a fondo foro; il pozzo è crollato intorno ai 38 m, comunque, e quindi gli iniziali 43 m sono stati rivestiti (più cemento sigillante iniettato nell'anello). Tre pozzi profondi 19,5 m sono stati perforati (a, b, e c nella figura 18a) ed un tubo di 3 cm di diametro è stato installato in ciascuno con l'anello sigillato con cemento; la testa di ogni tubo è stato coperto da un tappo a vite con un tubo Tygon come linea di iniezione.

Il sistema di erogazione di gas (Figura 18b) consisteva di due bombole di gas collegate ad un regolatore di pressione, un controllore di flusso di massa digitale (con flussometro analogico per back-up), una valvola di rilascio della pressione, un sensore di pressione digitale, e infine il tappo alla sommità del pozzo. Prima dell'iniezione di CO₂, le apparecchiature installate sono state testate dalla pressurizzazione del pozzo per cercare perdite nelle apparecchiature di prova di iniezione, nei casing e a testa pozzo.

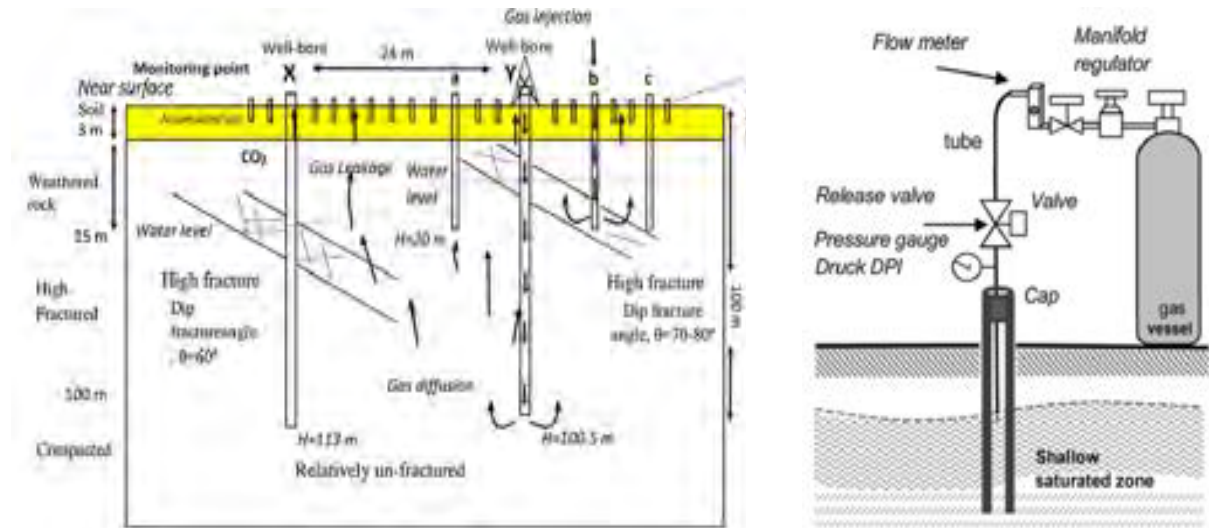


Figura 18. INAS sezione (a) e sistema di iniezione di gas (b) (Susanto et al., 2016).

2.1.6 Parametri sperimentali di iniezione

I parametri relativi ai diversi esperimenti di iniezione sono riportati in Tabella 3 e includono la durata degli esperimenti, la quantità di CO₂ iniettata, il tasso di iniezione e la pressione; le unità di misura sono standardizzate riportando la massa in kg e il volume in L in condizioni standard (STP). Questi parametri sperimentali sono stati confrontati graficamente, come mostrato in Figura 19. In tale grafico i siti sono distinti secondo le profondità raggiunte: siti con profondità inferiore ai 2 metri (indicati con il colore blu), siti con profondità compresa tra 10 – 20 m (colore rosso), e un singolo pozzo profondo 70 m (in verde) (Figura 3).

I periodi di iniezione sperimentale variano da un minimo di sole poche ore (Maguelone-4) fino a 455 giorni per il secondo esperimento a ASGARD (

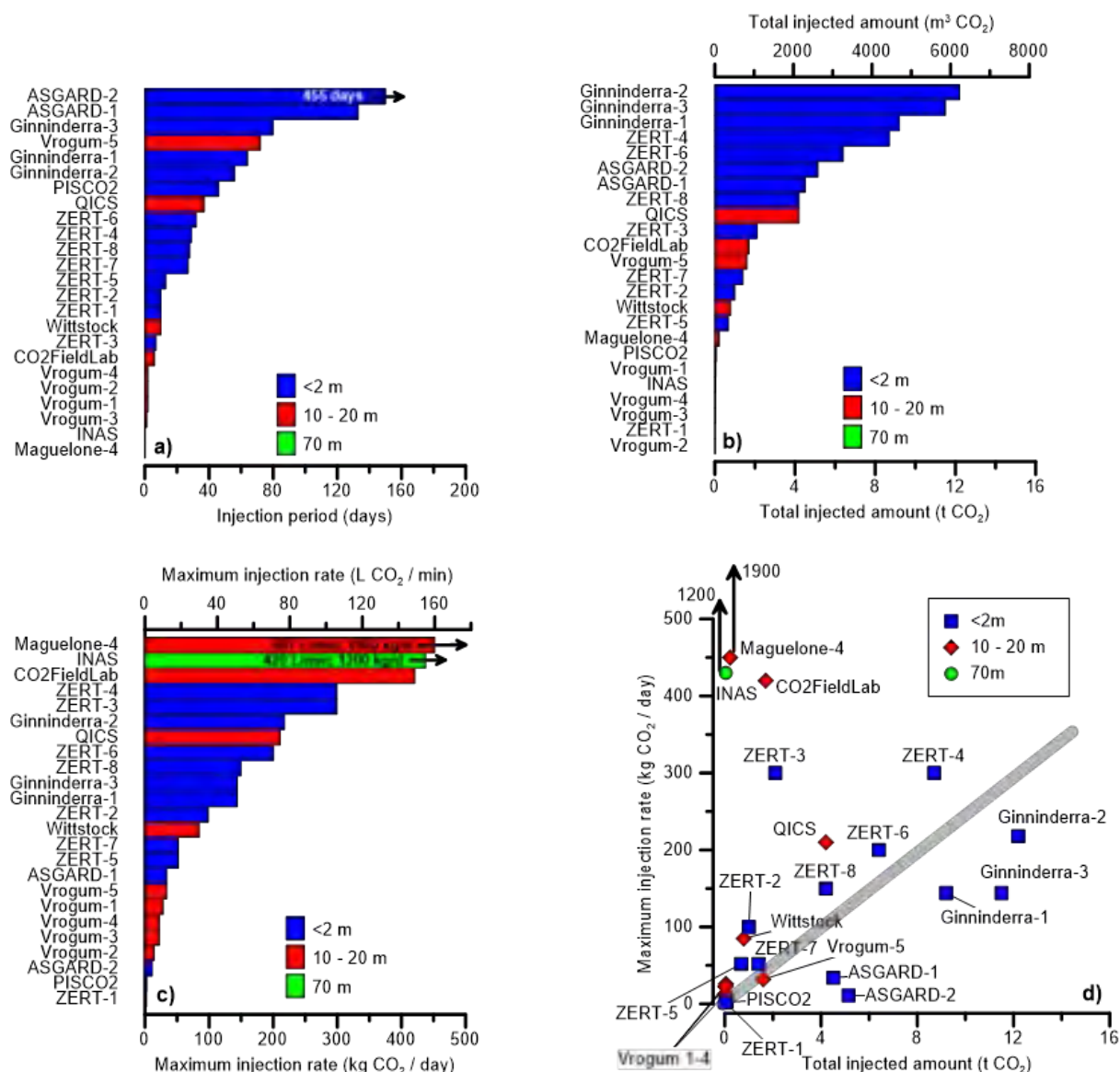


Figure 6a). I più lunghi periodi di iniezione nei siti con profondità raggiunte superiori a 10 m sono 72 giorni a Vrogum-5 e 37 giorni a QICS.

Le quantità di iniezione più elevate (Figura 19b) si hanno nei siti con profondità raggiunte inferiori ai 2 m, e includono i tre test eseguiti a Ginniderra (per un totale di circa 32 t CO2), tre test eseguiti a ZERT (per un totale di circa 19 t CO2), e i due test a ASGARD (per un totale di circa 10 t CO2). L'iniezione di grandi volumi di CO2 a basse profondità dovrebbe avere un minimo impatto sulle acque sotterranee (dato che la maggior parte viene rilasciata in atmosfera) e dovrebbe facilitare la ricerca rivolta a tecniche di monitoraggio superficiale e di valutazione degli impatti sugli ecosistemi.

Tabella 3. Sommario dei parametri di iniezione per i diversi siti test. I numeri in grassetto sono convertiti dalle altre unità (massa in kg e volume in L, assumendo condizioni STP), i valori della massa totale iniettata a ZERT sono stati stimati dal tasso di iniezione per il numero di giorni. Da notare che alcuni esperimenti hanno cambiato il tasso di iniezione durante l'esperimento (es., CO2FieldLab).

Esperimento	Quantità totale iniettata	Tasso di iniezione	P di iniezione
-------------	---------------------------	--------------------	----------------

Sito test	Ubicazione	Progetto	Esp. N.	Periodo di iniezione	Durata dell'iniezione (d)	gas	kg	L	kg/d	L/min	bar	Mpa
ASGARD	Nottingham, UK	ASGARD	1	Maggio-Sett. 2006	133	CO2	4,511	2,298,240	34	12		
		RISCS	2	Marzo 2011 - Giugno 2012	455	CO2	5,145	2,620,800	11	4	1.5	0.15
CO2FieldLab	Svelvik, Norway	CO2 Field Lab	1	7-13 Settembre 2011	6	CO2	1,700	850,739	120/156/216/420	43/55/76/149	2	0.2
Ginninderra	Ginninderra, Australia	Canberra	1	Feb-Maggio 2012	64	CO2	9,200	4,686,708	144	51		
			2	Ott-Dic 2012	56	CO2	12,200	6,214,982	218	77		
			3	Ott-Dic 2013	80	CO2	11,500	5,858,385	144	51		
INAS	Fukuoka, Japan	INAS	1	28 Agosto 2012	0.1	CO2	41	21,000	1189	420		
Latera	Latera, Italy	NASCENT	1	23 Ottobre 2003	0.25	CO2, He, Ar	5.3 totale 2.5 CO2	6,400 totale 1,280 CO2	21 totale 10 CO2	18 totale 3.6 CO2	3	0.3
Maguelone	Montpellier, France	Mustang, Panacea,	1	7-8 Marzo 2012	0.5	N2	262	210,000	600/720	330/400		
			2	7-8 Giugno 2012	0.3	N2	227	182,000	720/1140	400/633	2	0.2
			3	8-9 Novembre 2012	0.1	N2	149	120,000	1200	667	2	0.2
			4	22 Gennaio 2013	0.2	CO2	217	111,000	942/1900	333/667	2	0.2
PISCO2	Ponferrada, Spain	PISCO2	1	Giugno 2012	46	CO2	73	37,200	0.2-2.8	0.1-1	0.25	0.025
QICS	Ardmucknish Bay, Scotland	QICS	1	17-23 Maggio 2012	37	CO2	4,200	2,139,584	20/85/150/210	4/32/60/80	4.4	0.44
Siena	Siena, Italy	FI2WCT-91-0064	2	14 Luglio 1994	0.1	He CO2	3.8 CO2	1,950 CO2	Da 34 a 70 CO2	12 a 25 CO2	2.4	0.24
Vrogum	Vrogum, Denmark	CO2GS	1	12-14 Ottobre 2011	2	CO2	45	22,924	Da 13 a 26	Da 5 a 10		
			2	Giugno 2012	2	CO2	19	9,628	13	5		
			3	Luglio 2012	1.2	CO2	27	13,704	22.5	8		
			4	Settembre 2012	2	CO2	33	16,607	22.5	8		
			5	14 Maggio - 24 Luglio, 2012	72	CO2	1,600	815,080	32-16	12-6		
Wittstock	Wittstock, Germany	CO2Mon	1	29 Marzo - 9 Aprile, 2011	10	CO2	787	400,917	85	30	1.6	0.16
ZERT	Bozeman, MT, USA	MSU-ZERT	1	Autunno, 2006	10	CO2	23	11,520	2.3	0.8		
			2	9 - 18 Luglio 2007	10	CO2	1,000	509,425	100	35		
			3	3 - 10 Agosto 2007	7	CO2	2,100	1,069,792	300	106		
			4	9 Luglio - 7 Agosto, 2008	29	CO2	8,700	4,431,995	300	106		
			5	27 Agosto - 9 Settembre, 2008	13	CO2	676	344,371	52	18.4		
			6	15 Luglio - 15 Agosto, 2009	32	CO2	6,400	3,260,318	200	71		
			7	19 Luglio - 15 Agosto, 2010	27	CO2	1,400	713,195	52	18.4		
			8	18 Luglio - 15 Agosto, 2011	28	CO2	4,200	2,139,584	150	53		

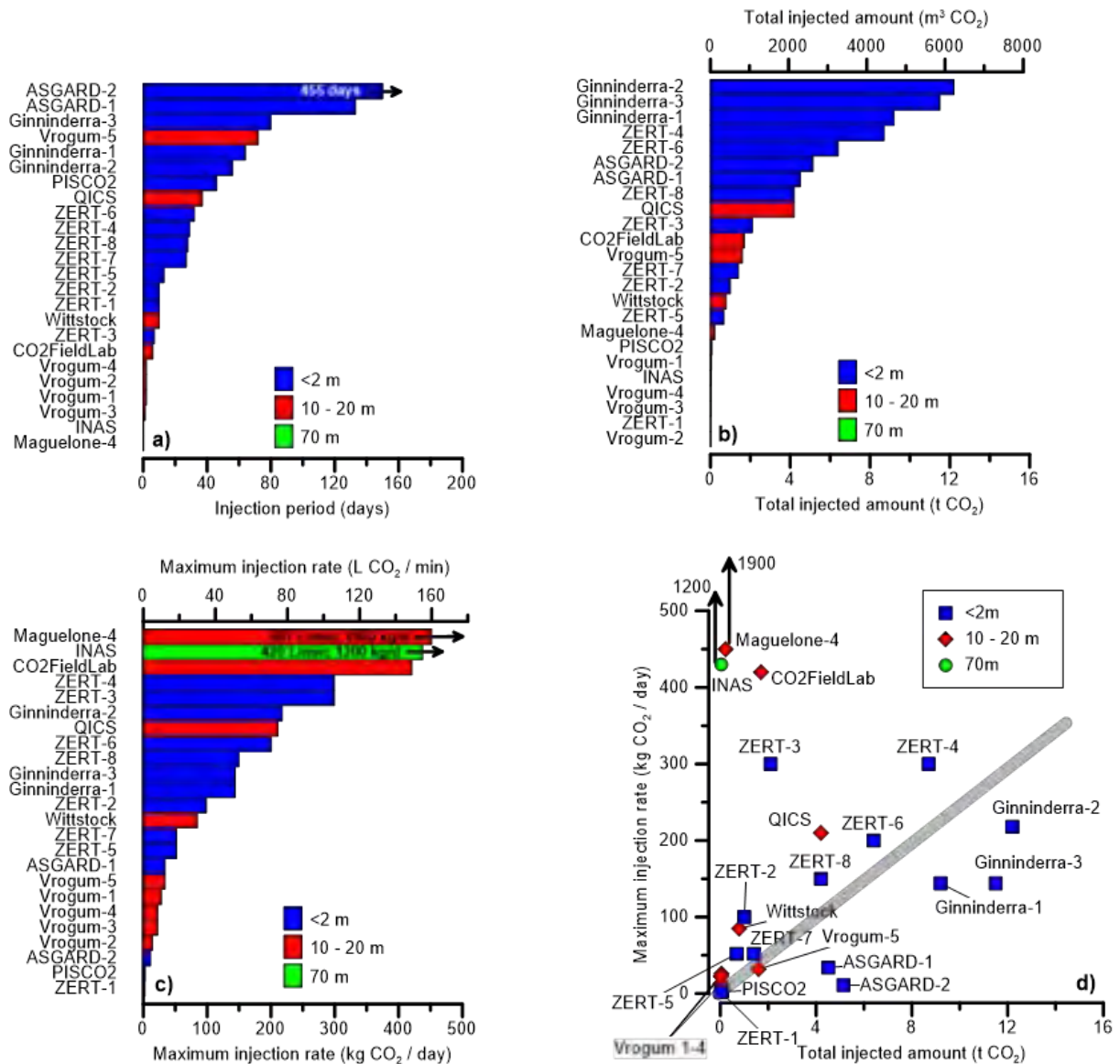


Figure 6. Confronto dei parametri di iniezione tra i diversi esperimenti condotti: (a) periodo di iniezione, (b) quantità totale di CO₂ iniettata, (c) massimo tasso di iniezione, e (d) massimo tasso di iniezione versus quantità totale iniettata. Notare che: i) i siti hanno un colore diverso sulla base della profondità di iniezione; ii) tre dei valori più alti nei plot (a) e (c) sono stati troncati (valore indicato con testo e indicato con freccia) per evitare di comprimere i dati degli altri siti; iii) i valori di Maguelone da 1 a 3 non sono riportati perché includono l'iniezione di N₂ e non di CO₂; e iv) i valori di Latera e Siena non sono inclusi dato che i volumi iniettati sono molto bassi.

Gli esperimenti riportati sono stati condotti sia con un tasso di iniezione costante che variabile nel tempo (Tabella 3). Questi ultimi sono stati condotti in tal modo per questioni logistiche o per testare le caratteristiche fluidodinamiche della litologia attraversata. I massimi tassi di iniezione usati nei diversi esperimenti sono riportati in Figura 19c. Questi tassi furono scelti sulla base della permeabilità e della pressione litostatica del sito e sulla base degli obiettivi di ricerca dell'esperimento. Questa figura mostra l'alto tasso di iniezione usato durante l'esperimento a Maguelone-4 (667 L/min) e a INAS (420 L/min), reso possibile grazie all'elevata permeabilità della litologia attraversata e la bassa durata di ogni esperimento di iniezione

(poche ore). I tassi di iniezione applicati a INAS sono particolarmente interessanti per lo scopo del SFL, considerando che l'iniezione fu eseguita in una zona fratturata (granodiorite affetto da deformazione fragile). Allo stesso modo, la roccia target attraversata nel SFL è di tipo vulcanico fratturata anche se la perforazione deve essere eseguita in modo tale che l'intervallo di iniezione sia all'interno di questa unità fragile o all'interno dei sedimenti plastici sovrastanti; questo permetterà di controllare eventuali momenti di non attività.

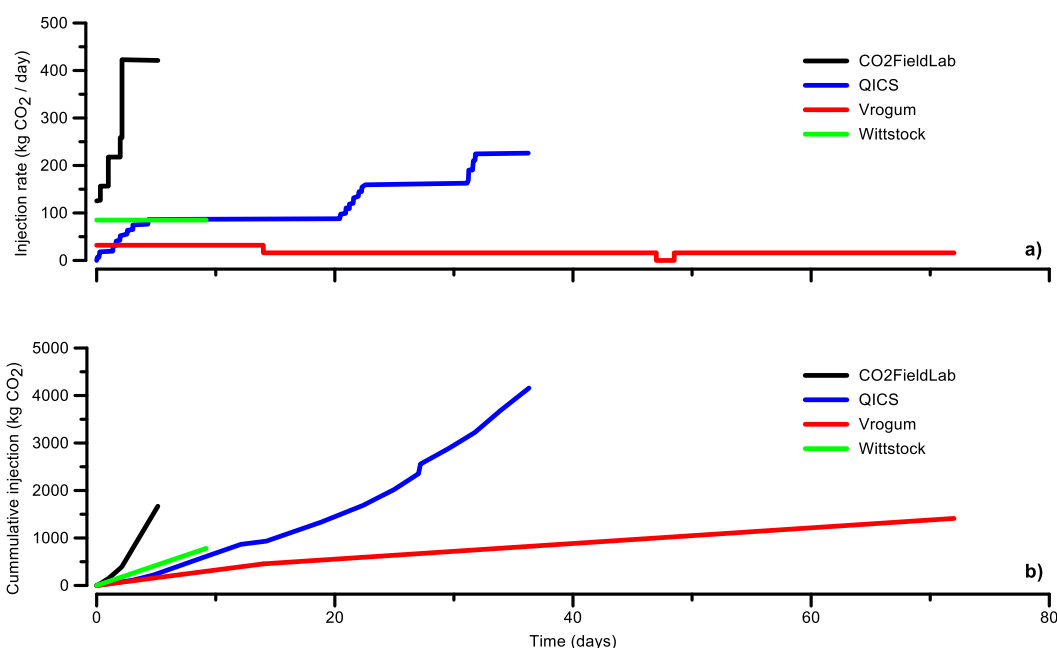


Figura 7. Tasso di iniezione (a) e massa iniettata cumulativa (b) versus tempo nei quattro siti test dove la profondità di iniezione supera i 10 m e la massa totale iniettata è più grande di 0.5 t CO₂.

Un diretto confronto della quantità totale iniettata e del massimo tasso di iniezione mostra un valore elevato di un sito rispetto agli altri (Figura 19d) con alcune chiare eccezioni. Tale sito è rappresentato da Maguelone-4 e INAS con tassi di iniezioni molto alti ma basse quantità totali iniettate. CO2FieldLab e ZERT-3 hanno ugualmente alti tassi di iniezione con moderate quantità totali iniettate, mentre i due esperimenti ASGARD hanno un basso tasso di iniezione e quantità totali iniettate moderatamente elevate.

I tassi di iniezione e la massa cumulativa iniettati nei diversi siti / esperimenti che sono più simili a quelli pianificati per SFL sono mostrati in Figura 20. Come descritto sopra, alcuni siti hanno un tasso di iniezione relativamente costante mentre in altri sono variabili nel tempo (Figura 20a).

Per esempio, il sito QICS prevede l'iniezione in sedimenti marini sotto-consolidati e i ricercatori desiderano evitare sovrappressioni, che potrebbero portare alla formazione di fratture, e allo stesso tempo iniettare sufficienti quantità di CO₂ che causino una dispersione misurabile su fondo mare (Taylor et al., 2015). Nel tempo il trasferimento di massa legato alla migrazione e alla dispersione dovrebbe essere controllato dalla porosità, permeabilità, dalla tortuosità del tragitto, dissoluzione lungo il tragitto, dall'accumulo al di sotto delle barriere orizzontali, ecc.

Come in tutti i test idraulici in cui la determinazione di questi parametri non viene condotta prima dell'iniezione (allo scopo di evitare di modificare le condizioni in situ), l'esperimento QICS ha previsto un piccolo tasso di iniezione iniziale (4 L/min), poi aumentato in vari step fino ad un massimo di 80 L/min (Figura 7a), monitorando allo stesso tempo la pressione e la temperatura a bocca pozzo (Figura 8). Un improvviso aumento di pressione a bocca pozzo a 80 L / min fu considerato indicativo del fatto che quel tasso non poteva essere superato per evitare di aprire fratture nei sedimenti.

Un aumento nel tempo del tasso di iniezione fu applicato anche nel CO2FieldLab, tuttavia nessuna spiegazione è stata trovata in letteratura su come fossero stati scelti quei tassi. L'iniezione a Vrogum invece, fu dimezzata dopo che il monitoraggio delle acque sotterranee mostrò una diminuzione di gradiente con perdite di CO2 dagli orizzonti dove era stata eseguita l'iniezione. In generale, alti tassi di iniezione portano a ridurre i tempi degli esperimenti (Figura 20a). Le iniezioni cumulative in tutti i quattro siti sono confrontate in Figura 20b, mettendo in luce le differenze nella lunghezza degli esperimenti e nella massa totale iniettata. Per esempio, durante gli esperimenti condotti a CO2FieldLab and Vrogum fu iniettata circa la stessa quantità di CO2 (c. 1.6 t) nonostante i diversi periodi di tempo (7 versus 72 giorni).

Le pressioni a bocca-pozzo sono riportate solo per alcuni esperimenti di iniezione (Tabella 3). Sfortunatamente, molti articoli non riportano se questi valori di pressione sono assoluti o relativi (cioè valori sopra la pressione atmosferica). Molti valori riportati per iniezioni profonde 10-20 m sono nell'ordine di 1.5-2 bar; considerando che una colonna d'acqua alta 10 m produce una pressione differenziale di circa 1 bar risulta che questi valori sono relativi e che rappresentano pressioni di iniezione di poco al di sopra della pressione idrostatica locale. Le pressioni riportate per QICS, invece, sono più alte (in media 4.4 bar) e variano con le maree dato che la pressione d'iniezione deve essere modulata automaticamente in modo da mantenere un tasso di flusso di iniezione costante (Figura 21a).

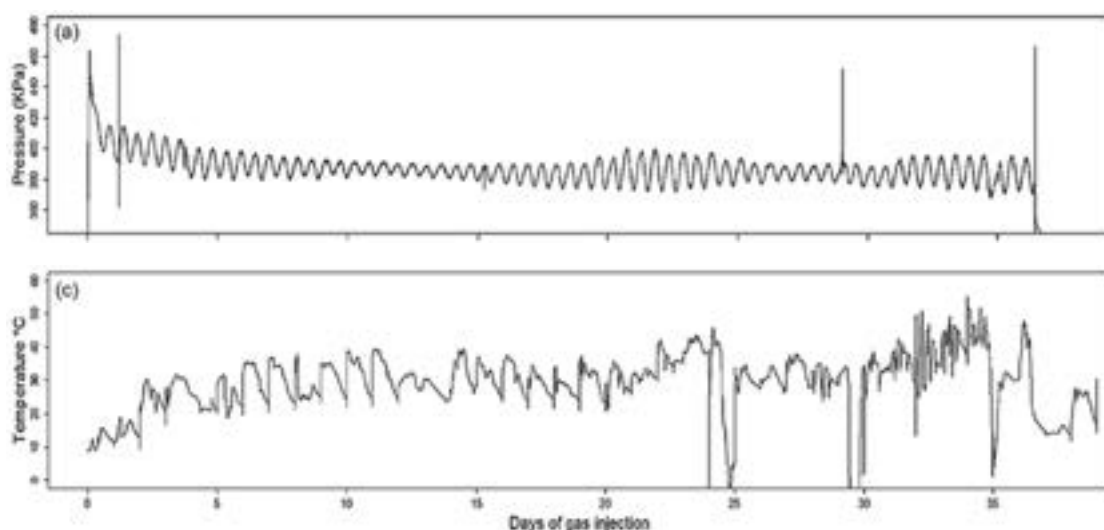


Figura 8 Parametri aggiuntivi di gas iniettato durante il test QICS nel 2012: (a) pressione di iniezione e (c) temperature del collettore del gas (Taylor et al., 2015).

3 IL LABORATORIO PROPOSTO DELLA FAGLIA DEL SULCIS (SFL)

Anche se molte preziose conoscenze sono state raccolte nei vari test di iniezione di gas di cui si è discusso sopra, allo stesso modo un lavoro simile deve essere condotto in differenti ambienti geologici, strutturali e climatici per rendere i risultati universali e per testare nuovi metodi e idee. Con questo scopo, Sotacarbo Spa si impegna a costruire un laboratorio di iniezione di CO₂ nella regione del Sulcis nel settore sud-occidentale della Sardegna, dove diversi ricercatori provenienti dall'Europa e dal resto del mondo potranno studiare i processi di migrazione del gas e testare le tecnologie di monitoraggio. Mentre molti dei siti esistenti prevedono l'iniezione della CO₂ a profondità inferiori ai 20 m in sedimenti porosi sottoconsolidati, questo sito sarà unico in quanto l'iniezione avverrà lungo una faglia a grandi profondità (possibilmente a profondità di circa 200 m). È per tale regione che tale sito prende il nome di Laboratorio della Faglia del Sulcis (SFL). Mentre il sito sarà costruito utilizzando fondi nazionali, gli esperimenti iniziali saranno eseguiti da un consorzio Europeo di ricercatori all'interno del progetto EC-funded ENOS (ENabling Onshore CO₂ Storage in Europe). La progettazione e la pianificazione del sito del SFL saranno supportati tecnicamente dai partner ENOS dell'Università della Sapienza e dell'OGS.

A seguire verrà introdotto il sito e lo schema proposto, verranno poi descritti i dettagli tecnici e gli aspetti logistici delle fasi di progettazione e costruzione del SFL. Gli autori di questo report hanno acquisito molta conoscenza dal lavoro condotto sui siti test esistenti di iniezione di gas, e applicheranno quindi quanto appreso altrove alle particolari condizioni geologiche, alle esigenze di monitoraggio e agli obiettivi di ricerca del sito SFL e del progetto ENOS.

3.1 Geologia regionale

Il bacino carbonifero del Sulcis iniziò a formarsi durante il primo Terziario a seguito dell'estensione tettonica. Nel tempo il bacino fu riempito da vari depositi sedimentari e vulcano-sedimentari che includono i depositi Paleogenici marini e continentali (ricchi in carbone), rocce vulcaniche calc alcaline dell'Oligocene-Miocene (ignimbriti), e depositi fluviali e fluvio-lacustri del Neogene-Quaternario (vedi stratigrafia in Figura 22). Il bacino ricopre un'area di circa 200 Km² ed è bordata ad est dalle rocce del basamento Paleozoico e a ovest dal mare.

I depositi Paleogenici del bacino del Sulcis raggiungono uno spessore massimo di 140 m e corrispondono ad un ciclo sedimentario trasgressivo-regressivo. I sedimenti carboniferi continentali furono depositi all'interno del picco regressivo (Dreesen et al., 1997). Questa unità di carbone, detta Formazione Produttivo, si trova al di sopra di sedimenti calcarei marini (Formazione del Miliolitico) ed è ricoperta tramite una superficie di discordanza da depositi detritici (Formazione del Cixerri). La Formazione Eocenica del Produttivo ha una estensione nel sottosuolo superiore ai 100 Km² affiorando a est e immergendo di circa 8-10° a SSW. Il suo spessore varia da 40 m nell'area della miniera del Monte Sinni (a 400 m di profondità) a un massimo di 70 m verso sud-ovest.

I sedimenti vulcanici calcalcalini dell'Oligocene-Miocene furono depositi per attività dell'arco magmatico tra 32.4 e 13.8 Ma (Beccaluva and Civetta, 1985), in associazione all'apertura del Mediterraneo occidentale e alla rotazione anti-oraria del blocco Sardo-corso (Vigliotti and Langenheim, 1998). La deposizione dei sedimenti vulcanici della regione avvenne in condizioni subaeree e in due fasi principali, un periodo iniziale (28.4-17.7 Ma) dominato da colate laviche a composizione da calcalcaline, a basaltica e intermedia, e subordinatamente da prodotti piroclastici seguiti da un successivo periodo (17.6–13.8 Ma) caratterizzato da grandi emissioni di ignimbriti da calcalcaline a perialcaline, e da dacitiche a riolitiche (Poli and Rosi, 2005). Queste ignimbriti dacitiche – riolitiche sono state trovate in affioramento nell'area in corrispondenza degli alti topografici.

Per ultimo, i sedimenti del Neogene-Quaternario sovrastano le rocce vulcaniche e sono costituiti da ghiaie e sabbie nel settore meridionale e lungo la costa, e da conglomerati con sabbia, limo e argilla nei settori più settentrionali dell'area.

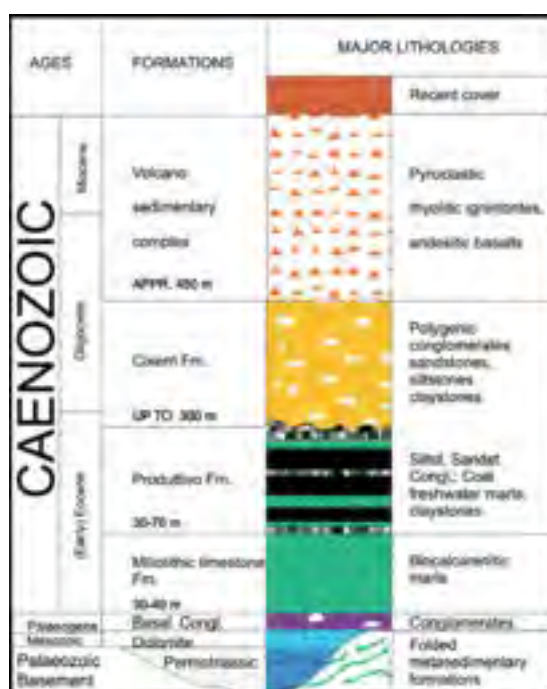


Figura 9. Stratigrafia dell'area del Bacino carbonifero del Sulcis (Rossi et al., 2009).

La Formazione del Produttivo è stata interessata da faglie orientate E-W e NNW-SSE, le quali possono essere correlate alla rotazione antioraria del blocco Sardo-corso durante le fasi tettoniche successive dell'orogenesi Alpina (Poli and Rosi, 2005). La deformazione post-eruttiva della successione vulcanica fu moderata, con faglie verticali mostrandoti un offset di 40 m che portarono il bacino in condizioni sommerse (Dreesen et al., 1997).

Una di queste faglie rappresenta l'obiettivo del SFL, con un orizzonte di iniezione ubicato all'interno delle rocce vulcaniche interessate da deformazione fragile o nei sovrastanti sedimenti quaternari. In letteratura è stata riscontrata una mancanza di informazioni riguardanti la stratigrafia locale superficiale (primi 100 – 200 m) e per tale ragioni studi futuri saranno indirizzati a colmare tale lacuna durante la progettazione e la pianificazione del SFL.

3.2 Potenziale sviluppo e uso del sito

3.2.1 Panoramica sullo sviluppo del sito proposto

Di seguito è riportata una descrizione preliminare dell'infrastruttura che dovrebbe essere costruita nel laboratorio della Faglia del Sulcis nel sud-ovest della Sardegna. È da sottolineare che tale documento rappresenta una prima bozza tecnica del sito, e come tale i temi specifici e le loro descrizioni qui riportate saranno soggette a cambiamenti così come per i costi. Verranno consultate figure professionali esperte per la fase di perforazione e verranno prese decisioni relative agli strumenti scientifici da utilizzare.

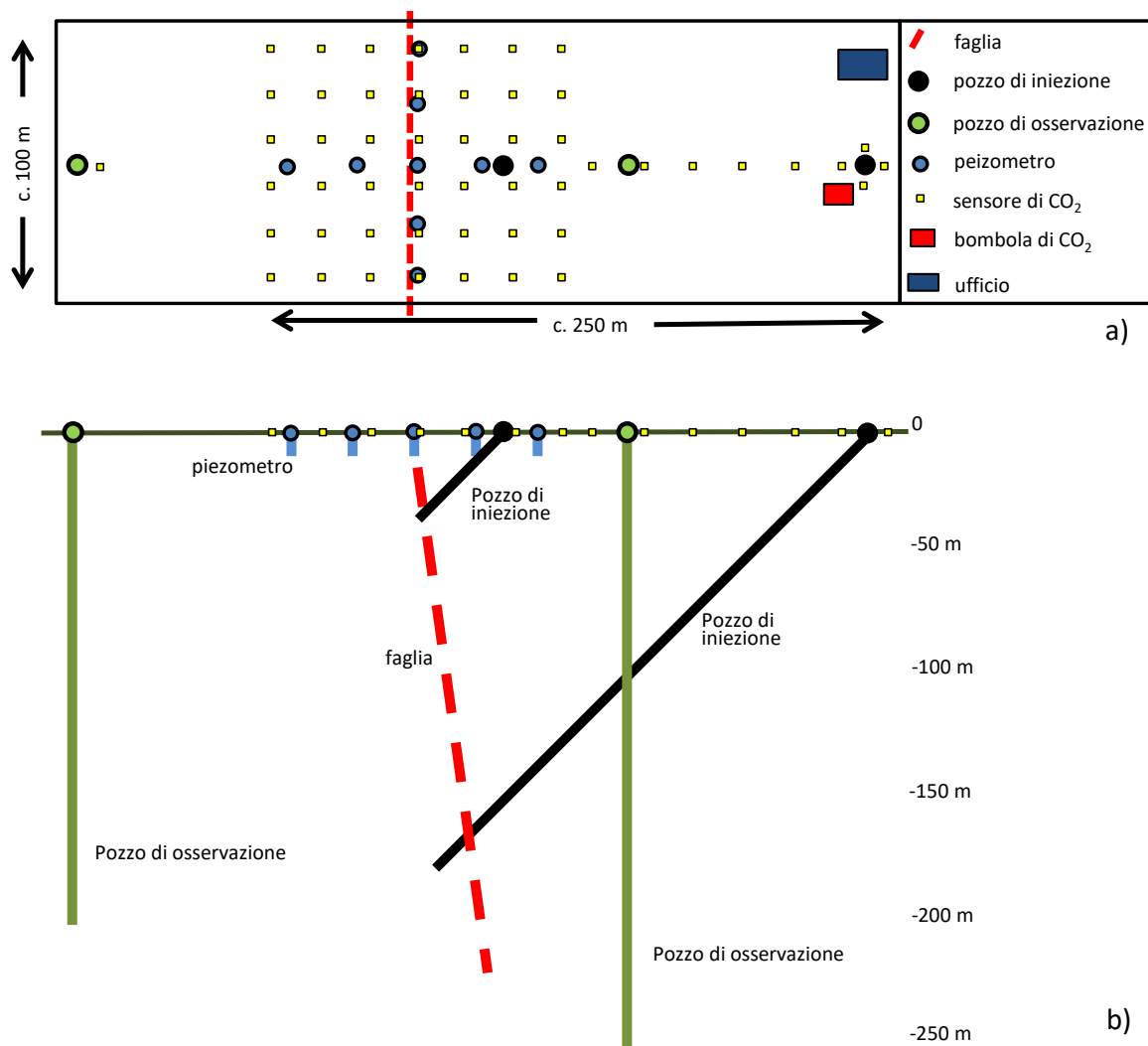


Figura 10. Disegno schematico del laboratorio SFL in mappa (a) e in sezione (b).

Con riferimento al disegno schematico riportato in Figura 23, il Laboratorio della Faglia del Sulcis (SFL) consisterà di:

- Due **pozzi di iniezione inclinati** di 45° che intersecano la faglia definita tramite indagini sismiche. Le profondità di iniezione proposte sono 175 e 35 m (lunghezza della

perforazione 250 e 50 m); notare che la seconda profondità, più superficiale, è opzionale e sarà eseguita solo nel caso in cui quella più profonda non possa essere realizzata per mancanza delle caratteristiche di iniezione necessarie. I pozzi di iniezione saranno sigillati per prevenire dispersione di gas lungo il pozzo;

- Due **pozzi verticali di osservazione** da entrambi i lati della faglia per una profondità di 200-250 m. Questi saranno equipaggiati con strumenti geofisici che saranno posizionati in maniera permanente sia tra il rivestimento (*casing*) e il pozzo che a fondo pozzo; le decisioni finali riguardanti tali strumenti determineranno l'eventuale perforazione, il diametro del *casing* e del materiale;
- Nove pozzi di monitoraggio delle acque del sottosuolo (**piezometri**) perforati fino ad una profondità massima di 10 – 15 m, sigillati in PVC; due piezometri avranno un diametro più grande per consentire l'inserimento di sensori per misure continue;
- Fino a 50 **sonde di monitoraggio della CO₂** distribuite su una griglia ad una profondità di circa 80 cm;
- Una **stazione meteorologica** per misurare il vento, la temperatura, la pressione barometrica e le precipitazioni;
- Un **sistema on-site di stoccaggio della CO₂** e un **sistema di controllo di iniezione di gas** / collettore, quest'ultimo in una struttura protettiva o edificio. Il sistema di controllo avrà bisogno di elettricità per il computer di monitoraggio e di elettrovalvole, controllori di flusso di massa, ecc .;
- Un **edificio per l'alloggio del personale di ricerca**, per computer, strumenti, conservazione e una piccola officina, con elettricità e connessione internet.

3.2.2 *Permessi del sito, comunicazione, ecc.*

Come già detto la maggior parte dei siti di test di iniezione descritti in letteratura sono stati posizionati su un terreno che era di proprietà e gestito da uno dei partner di ricerca, il che significa che i permessi erano spesso già in atto (o facilmente ottenuti) per gli esperimenti e c'era poco bisogno di comunicare o ottenere supporto da parte della popolazione locale. Due eccezioni a questo sono stati CO₂FieldLab e QICS, come già descritto nelle sezioni 2.1.2 e 2.1.3.

Per quanto riguarda il permesso di costruire e utilizzare il laboratorio SFL, Sotacarbo ha già una concessione mineraria per l'area che consente di condurre la perforazione ed è in procinto di contattare i vari dipartimenti governativi e le autorità locali per le autorizzazioni a condurre gli esperimenti. Di importanza critica sarà spiegare chiaramente che la quantità di iniezione è piccola e che sarà condotta solo a fini sperimentali, e pertanto non dovranno essere considerate le leggi che regolano l'immagazzinamento di grandi volumi di CO₂. Inoltre, Sotacarbo sta contattando i proprietari dei terreni del sito proposto per negoziare l'accesso.

Per quanto riguarda la sensibilizzazione del pubblico, i ricercatori dell'Università della Sapienza insieme a Sotacarbo condurranno un lavoro con la popolazione locale per spiegare il CCS in generale, e nello specifico gli esperimenti proposti. Come sottolineato da Taylor *et al.* (2015), il lavoro a QICS non sarebbe stato possibile senza il supporto locale, che è stato ottenuto da

una vasta campagna di consultazione con la comunità locale, organizzando eventi pubblici, prima, durante e dopo il rilascio di CO₂, dando accesso al pubblico curioso (previo accordo) durante le attività scientifiche di perforazione e iniezione, e istituendo un gruppo di parti interessate per trasferire informazioni. Simili temi dovranno essere considerati per il SFL, soprattutto se si considera che la mancanza di supporto locale potrebbe potenzialmente bloccare completamente la costruzione e l'utilizzo del sito sperimentale. Inoltre, il supporto locale può risultare utile anche per ridurre il rischio di atti vandalici nel sito.

3.2.3 Caratterizzazione del sito proposto / guida durante il monitoraggio

Diverse indagini da eseguire nell'area vasta a carattere geofisico (ad esempio, sismico, ERT), idrogeologico, geologico, strutturale, e geochimico (chimica delle acque, composizione del gas al suolo e di flusso, ecc) sono state commissionate da Sotocarbo. Più di recente, un'indagine sismica eseguita dall'OGS è stata utilizzata per scegliere l'attuale posizione proposta per il SFL (al di sopra di una faglia visibile in sezione), e attualmente invece è utilizzata per caratterizzare maggiormente il sito e pianificare le indagini da condurre localmente. In generale questo lavoro permetterà di ottenere:

- *Caratterizzazione del sito*: per meglio definire le condizioni geologiche e idrogeologiche, in quanto questi influenzeranno la migrazione della CO₂ verso l'alto, e
- *Baseline*: per definire le naturali risposte geofisiche e geochimiche dei parametri che ci si attende possano cambiare durante l'esperimento di iniezione.

Di seguito vengono descritte una serie di indagini che saranno molto utili per raggiungere gli obiettivi del SFL, includendo le indagini che verranno appositamente realizzate per questo scopo così come il lavoro relativo allo sviluppo delle infrastrutture del sito (ad esempio pozzi, si veda la sezione 3.2.4).

Geofisica

Un'indagine GeoRadar (GPR) è prevista per la prima metà del 2017, con il principale obiettivo di caratterizzare il sito in esame. Questa tecnica fornisce immagini ad alta risoluzione della stratigrafia e delle strutture del sottosuolo nei primi 10 - 15 m. L'obiettivo di questa indagine è quello di definire la stratigrafia e le caratteristiche idrogeologiche dei sedimenti superficiali allo scopo di determinare eventuali strati secondari di accumulo di gas, supportare il monitoraggio delle acque sotterranee poco profonde, e definire la litologia superficiale. L'interpretazione di tale indagine sarà supportata da *log* di pozzo, da misure GeoProbe, se saranno condotte (vedi sotto), e da perforazioni di tipo Augered se necessario. Tale indagine verrà utilizzata anche per determinare se il rigetto delle faglie osservato nei profili di sismica profonda interessa anche i termini superiori della colonna stratigrafica, dato che la continuità della faglia verso la superficie potrebbe influenzare la migrazione della CO₂ iniettata fino ai livelli più superficiali. Infine le misure di GPR saranno utilizzate anche per determinare la

profondità del contatto tra la bedrock (che affiora a ovest del sito di iniezione) e lo strato di copertura, per supportare l'interpretazione delle indagini sismiche.

Altri metodi geofisici che potrebbe essere considerati per dettagliare l'area in esame includono indagini di sismica a riflessione superficiale, la tomografia della resistività elettrica (ERT), e l'Elettromagnetismo (EM). La sismica superficiale fornirebbe informazioni relative alla caratterizzazione del sito che sarebbero complementari ai risultati del GPR (ma potenzialmente con una penetrazione più profonda), mentre l'ERT e l'EM fornirebbero principalmente i dati di base per determinare in prossimità della superficie la conducibilità / resistività che potrebbero cambiare a seguito di perdite di CO₂.

Il monitoraggio della micro-sismicità sarà condotto durante l'esperimento di iniezione di ENOS, e, quindi, è fondamentale ottenere informazioni di base per capire se l'attività micro-sismica osservata è legata all'iniezione o invece ad altri processi non correlati.

E' inoltre raccomandato di effettuare i seguenti log geofisici a fondo pozzo su tutti e tre i pozzi profondi che devono essere perforati (vale a dire, i due di osservazione e uno di iniezione): sonic log, log di resistività (1D e / o tomografia), d'induzione (SP e GR), caliper, log dello stress in situ, e il log di Imaging della parete del pozzo (CBIL). Questi dati relativi alla caratterizzazione del sito saranno utilizzati come dati di input per la modellazione (geologica, e di portata) e per l'interpretazione delle indagini geofisiche da eseguire in foro. Tali misure saranno organizzate dal tecnico di perforazione.

Qualsiasi altro metodo geofisico previsto durante l'esperimento deve essere utilizzato per raccogliere dati di base e, se possibile, dati per la caratterizzazione del sito. In particolare, il progetto ENOS installerà sensori acustici di rilevamento (Silixa), per attraversare il pozzo e per produrre profili sismici verticali (VSP). Tali misure effettuate prima dell'iniezione forniranno ulteriori immagini ad alta risoluzione della faglia tra i due pozzi verticali di osservazione e definiranno la risposta pre-iniezione del pacco stratigrafico per definire eventuali anomalie.

Un'indagine magnetometrica potrebbe essere condotta per identificare infrastrutture metalliche sepolte, in combinazione con uno studio sul "catasto" locale, per eliminare eventuali rischi durante la perforazione o l'installazione delle infrastrutture di monitoraggio. Questo metodo dovrebbe essere evitato, tuttavia, se i sedimenti locali di origine vulcanica hanno un alto contenuto di minerali magnetici.

Idrogeologia (fisica e chimica)

Prove idrauliche dovranno essere condotte sui due pozzi di iniezione, mentre test simili andranno condotti sui piezometri in prossimità della superficie. Conducendo sia *slug test* che *bail test* (cioè aggiungendo o rimuovendo rispettivamente, una colonna d'acqua da un pozzo per monitorare il recupero del livello dell'acqua in condizioni di equilibrio) è possibile calcolare la trasmissività e / o permeabilità dell'orizzonte interessato dal flusso dell'acqua. Questi dati forniranno un'indicazione indiretta della permeabilità dei gas, e possono aiutare a stimare i

tassi di iniezione di gas da utilizzare per gli eventuali esperimenti di CO₂. Prove di pompaggio dovrebbero essere condotte per determinare la connettività idraulica tra piezometri superficiali. Misure statiche precise del livello d'acqua devono essere effettuate nei piezometri per definire la direzione locale del flusso nella falda/e acquifera monitorata.

Il monitoraggio passivo della pressione a bocca pozzo sarebbe utile per determinare se ci sono eventuali variazioni giornaliere (ad esempio, l'influenza delle maree, che indicherebbe la permeabilità su larga scala) o variazioni stagionali.

Campioni d'acqua saranno raccolti da tutti i pozzetti disponibili, pozzi e piezometri in almeno 3 diverse occasioni, uno o due mesi prima dell'iniezione della CO₂, per definire il sistema chimico e determinare eventuali variazioni temporali a causa di processi naturali o di recupero dopo la perforazione. I campioni dovranno essere analizzati per tutti i parametri del sistema carbonatico (pH, pCO₂, alcalinità, e DIC), per analizzare la chimica degli ioni maggiori, gli elementi in traccia (in particolare, i metalli tossici che possono essere rilasciati durante l'aggiunta di CO₂), T, ossigeno disciolto, salinità, TDS, e Eh. I dati geochimici di base dell'acqua saranno confrontati con i dati del periodo di iniezione per caratterizzare eventuali anomalie di CO₂ indotte, e saranno utilizzati come input per la modellazione geochimica e per la preparazione di esperimenti di laboratorio. Inoltre, sarà molto importante capire se la salinità delle acque sotterranee aumenta con la profondità nel pozzo di iniezione, considerando la vicinanza del sito al mare, poichè la solubilità della CO₂ è fortemente dipendente da questo parametro e dovrà essere considerata durante la modellazione. Inoltre, sarà necessario capire se esiste qualche rischio di mobilitazione verso l'alto (verso la falda superficiale) dell'acqua salina presente in profondità.

La tecnologia Direct Push è uno strumento potenzialmente utile per definire l'idrostratigrafia nei primi 20 m, e deve essere presa in considerazione per lavori dettagliati alla SFL se i fondi lo permettono. Questi strumenti consistono nell'introdurre nel sottosuolo una sonda per misurare i vari parametri con un alto dettaglio. Per lo scopo del presente lavoro la misura della conducibilità elettrica (CE) e della permeabilità tramite uno strumento idraulico (HPT) sarebbe molto utile; un esempio di uno di questi strumenti commerciale è mostrato in Figura 24. Tali dati sarebbero di supporto per determinare la stratigrafia e l'idrostratigrafia del sito, come input nel modello geologico statico (dato che i sedimenti superficiali formeranno una barriera per la risalita di CO₂), per scegliere la profondità e la posizione dei piezometri superficiali, e come supporto al GPR.

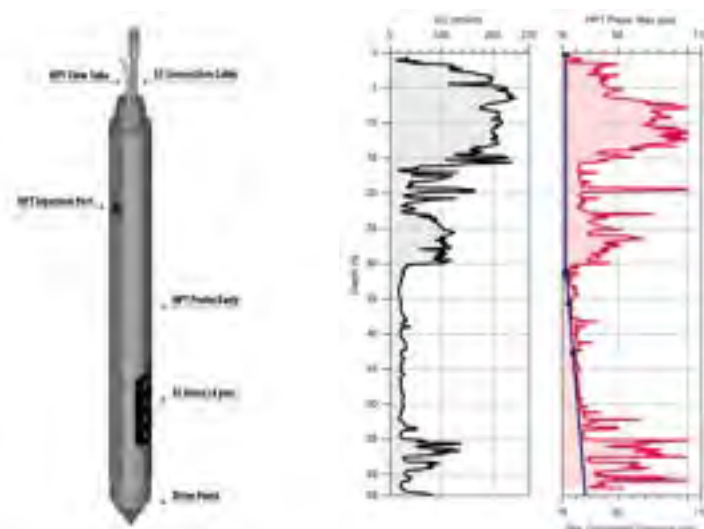


Figura 11. Profilo dello strumento idraulico GeoProbe (HPT) (a) conducibilità elettrica altamente dettagliata e risultati della massima pressione misurata fino a circa 20 m di profondità (<http://geoprobe.com/hpt-hydraulic-profiling-tool>).

Geologia

Oltre ai dati geofisici e idrostratigrafici circoscritti che aiuteranno a definire la geologia locale (ad esempio, GPR, log geofisici down-hole, sonda Direct Push), diversi altri lavori dovranno essere condotti per definire nel miglior modo possibile la stratigrafia, la litologia, la mineralogia, e la struttura del sito. Questi dati sono necessari per poter prevedere il processo di iniezione del gas, la sua migrazione, e le reazioni chimiche indotte mediante aggiunta di CO₂. A questo proposito, il recupero di materiale sotto la superficie sarà importante.

Un campionamento continuo per l'intera lunghezza di almeno un pozzo profondo è assolutamente necessario, poiché i dati ottenuti saranno utilizzati sia per popolare il modello geologico statico che per modellare gli scenari di migrazione dei gas. Si propone inoltre che il pozzo di iniezione inclinato sia riempito per tutta l'intera lunghezza, così come i primi 100 m di uno dei pozzi profondi di osservazione verticale. Questa necessità chiaramente influenzerà la tecnologia di perforazione utilizzata, come descritto di seguito. L'interno del pozzo campionato sarà soggetto a misure per analizzare la stratigrafia, per analisi mineralogiche, di chimica di massa, e per analisi degli elementi in traccia, e inoltre altri campioni dovranno essere raccolti per determinare la porosità, permeabilità, le condizioni di stress, nonché per lo svolgimento di esperimenti geochimici. Particolare attenzione dovrà essere posta nel raccogliere campioni intatti e nel conservarli in situ per mantenere la loro integrità geotecnica e chimica. Un piano dettagliato della sequenza di misure, campionamento, ecc. sarà preparata dal tecnico di perforazione.

La perforazione per i piezometri superficiali permetterà sia il campionamento dell'interno del pozzo sia il campionamento dei detriti di perforazione; entrambi dovranno essere misurati e sotto-campionati per correlarli con i risultati del Direct Push (se eseguita) e del GPR. Ciò è necessario sia per capire l'eventuale migrazione del gas sia per ampliare la portata dei pozzi

poco profondi per esperimenti futuri. Infine, campioni di terreno superficiali potrebbero essere analizzati per ottenere informazioni sull'impatto in caso di eventuale dispersione superficiale di CO₂.

Geochimica dei gas

Misure di gas al suolo e del flusso sono state condotte nell'area vasta, tuttavia dati temporali più dettagliati dovranno essere raccolti nei mesi precedenti l'iniezione. Le concentrazioni al suolo di CO₂ e i valori di flusso variano naturalmente a causa di processi biologici, sia nel tempo (a scala diurna e stagionali) che spazialmente (in funzione del tipo di terreno, umidità, ecc.). Per questo motivo, i campioni devono essere raccolti su una griglia regolare nel sito prescelto del SFL (preferibilmente quella che verrà utilizzata durante il monitoraggio della fase di iniezione) in due o tre occasioni differenti nei mesi che precedono l'iniezione per definire la variabilità basale e le anomalie biogeniche. Oltre alle misure di flusso di CO₂, tutti i campioni di gas al suolo dovranno essere analizzati per misure di CO₂, N₂, O₂, idrocarburi leggeri, e He mentre un quantitativo di gas dovrà essere analizzato per determinare la composizione degli isotopi stabili di CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$). I campioni di gas al suolo verranno raccolti tra 50 e 80 cm di profondità utilizzando un tubo in acciaio inox del diametro di 6 mm, mentre il flusso verrà misurato utilizzando una camera di accumulo posta sulla superficie del terreno.

In aggiunta a questo campionamento manuale intermittente, un certo numero di sonde che monitoreranno in continuo la CO₂ al suolo (GasPro; Figura 29) dovranno essere distribuite per raccogliere i dati di base. Il progetto ENOS prevede la realizzazione di un gran numero di questi sensori (da 30 a 50) per monitorare le concentrazioni di gas al suolo durante l'esperimento di iniezione. Inoltre, almeno altre 3-5 unità dovranno essere distribuite sul sito di iniezione il più presto possibile per avviare il monitoraggio della variazione naturale stagionale e diurna. Tutti i sensori GasPro dovranno essere installati in un punto di monitoraggio sulla griglia almeno un mese prima dell'iniezione per assicurarsi che l'intero sistema funzioni e che i dati di base siano disponibili per l'intera griglia.

Poiché le concentrazioni di CO₂ in prossimità della superficie e i valori di flusso variano naturalmente a causa di processi biologici e delle condizioni meteorologiche, una stazione meteo dovrà essere installata sul sito per tutto il periodo di riferimento, di iniezione, ed eseguire un monitoraggio post-iniezione. Tale stazione dovrebbe essere in grado di monitorare almeno le precipitazioni, la velocità del vento, la temperatura dell'aria, e l'irraggiamento solare.

Geologia Strutturale

Considerando l'obiettivo del laboratorio SFL di iniettare il gas in una zona di faglia, risulta importante una chiara comprensione della geologia strutturale del sito. Oltre al lavoro regionale già completato, saranno eseguiti ulteriori studi dettagliati del sito, compreso studi nel sottosuolo e analisi del regime dello stress locale sulle faglie tramite misure geotecniche

sui campioni profondi. Questi dati saranno utilizzati per sviluppare un modello geomeccanico del sito.

3.2.4 Infrastruttura proposta e disegno sperimentale

Accesso al sito

È necessario prendere in considerazione di recintare almeno alcune parti del sito di studio, in particolare l'area di stoccaggio, il pozzo di iniezione, l'ufficio in loco, in modo da prevenire incidenti e potenziali atti vandalici. Dei protocolli riguardanti l'accesso al sito devono essere creati, sia per questioni di sicurezza che di responsabilità.

Sistemi di erogazione del gas

CO₂ pura è stata usata essenzialmente in tutti i test descritti riguardanti l'iniezione di CO₂ relativi al CCS, ed è quindi consigliata per il SFL. Teoricamente altri gas traccianti potrebbero essere mescolati con la CO₂, come ad esempio l'He o l'H₂ aggiunti nel sito INAS (Susanto et al., 2016); ciononostante, questo potrebbe incrementare i costi e limiterebbe le opzioni di stoccaggio (ad es., solamente bombole e non cisterne per liquidi- vedi sotto).

Una parte del gas iniettato dovrà essere stoccato in sito, con il sistema di stoccaggio rifornito periodicamente in funzione della quantità e tasso di iniezione. Ci sono due principali opzioni di stoccaggio, una con bombole contenenti CO₂ gassosa pressurizzata (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) oppure attraverso un serbatoio contenente CO₂ liquida. La scelta di quale sistema adottare dipenderà dal volume totale di gas che dovrà essere iniettato, dalla disponibilità locale, e dai costi.



Figura 12. Opzioni di stoccaggio in sito: (a) porta bombolei di gas o (b) un singolo serbatoio di CO₂ liquida.

Tra i siti dove tale informazione è disponibile, è noto che bombole di gas sono state usate a Grimsrud Farm, Latera (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), Vrogum (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), Maguelone (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), QICS (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), INAS (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), e Siena. Tenendo conto dell'informazione proveniente da QICS secondo cui sono state usate 80 kg di bombole (con una stima di volume

di 62 l) in rastrelliere di 15 unità per una massa totale di iniezione di 4.2 tonnellate di CO₂ (Taylor et al., 2015), e assumendo bombole a 200 bar di pressione, si possono calcolare quante bombole (e porta bombole da 15 unità) sarebbero necessarie per il SFL, in funzione della massa totale da iniettare. Questo è illustrato in Figura 2, la quale mostra come 1 t di CO₂ richiederebbe 45 bombole (o 3 porta bombole), mentre 10 t di CO₂ richiederebbero 450 bombole (o 30 porta bombole). Quando le rastrelliere per le bombole è vuota, è necessario rimandarle indietro al fornitore e sostituirle con delle nuove. Potrebbe essere accorto proteggere al di sotto di un riparo i portabombole, come è stato fatto nel sito di QICS site (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** a, b).

Dei serbatoi sono stati invece usati ad ASGARD (due da 200 l; **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**a), ZERT, Ginninderra (serbatoi da 2.5 t di CO₂ liquida; **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**f), CO₂FieldLab (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**b). Tali serbatoi esistono in diverse misure, sono probabilmente più convenienti ne caso in cui vengano usati grossi volumi, e possono essere riforniti direttamente in sito attraverso delle autocisterne (piuttosto che essere rimpiazzati come le bombole). Una piazzola di cemento potrebbe o no essere necessaria come supporto laddove la cisterna sarà posizionata; in ogni caso, la cisterna non avrà bisogno di essere messa al riparo. Usando come confronto la cisterna da 2.5 t di CO₂ liquida a Ginninderra, un'iniezione totale di 10 t richiederebbe circa 4 rifornimenti.

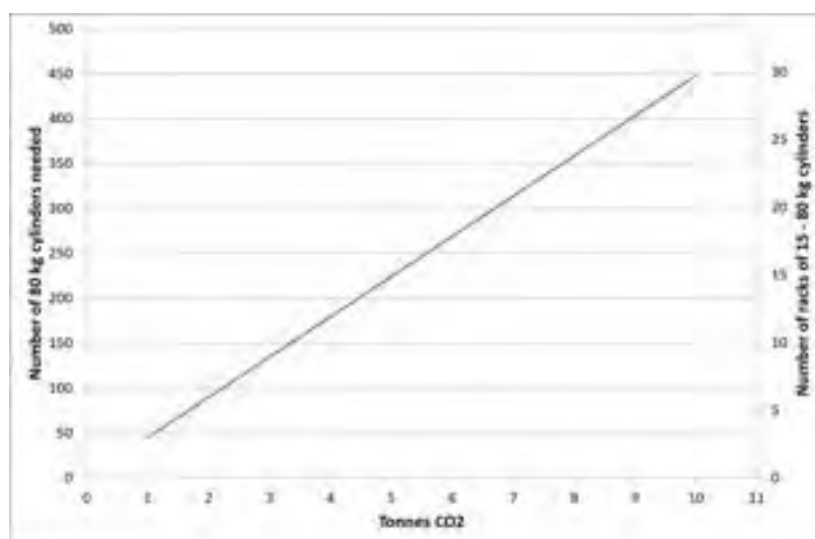


Figura 13. Grafico mostrante quante bombole da 80 kg (asse y a sinistra) e quanti porta bombole da 15 unità, 80 kg di bombole (asse y a destra) servirebbero per un dato numero di tonnellate iniettate di CO₂.

Il flusso di CO₂ dall'unità di deposito (bombole o cisterne) al pozzo di iniezione verrà gestito da un sistema collettore controllato e monitorato da un computer. Per il SFL è raccomandabile l'utilizzo del sistema disegnato per il sito QICS (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**c) come template, tenendo conto chiaramente anche all'input tecnico dell'ingegnere di perforazione e della compagnia contrattata per la fornitura di CO₂. Questo sistema collettore deve trovarsi in un posto riparato, ma dovrebbe altresì essere fornito di una buona

ventilazione per prevenire accumulo di CO₂ in caso di fuoriuscita, e dovrebbe essere equipaggiato con un sensore/allarme di CO₂ per la sicurezza.

Questo sistema collettore dovrebbe consistere in almeno dei seguenti componenti, descritti in ordine dal deposito della CO₂ alla testa pozzo:

- Valvola di isolamento- per permettere la sostituzione delle bombole o il rifornimento delle cisterne.
- Riduttore di pressione – per abbassare la pressione a quella di iniezione prescelta, la quale deve trovarsi al di sopra della pressione idrostatica, ma al di sotto di una soglia di sicurezza più bassa della pressione litostatica.
- Valvola automatica di spegnimento di sicurezza – potrebbe essere installata e innescata in base a dei protocolli di sicurezza definiti dall'utente (ad es., rapidi abbassamenti di pressione, che potrebbero significare perdite dalle tubature etc).
- Radiatori – Nel caso QICS, dove sono state usate bombole, sono stati installati dei radiatori per prevenire il congelamento del collettore durante l'abbassamento della pressione da quella della bombola a quella di iniezione, ad alti tassi di iniezione. Inoltre, sarebbe preferibile iniettare alle temperature in situ.
- Valvola di scambio automatica – questa scambia il flusso di gas dal blocco delle bombole attive a quello delle bombole di riserva nel caso in cui il primo sia quasi vuoto. Non è necessaria nel caso si usi un grande serbatoio al posto delle bombole.
- Dispositivo di controllo di flusso di massa (MFC) – Controlla la quantità di CO₂ che entra nel pozzo di iniezione (ad es., kg/s) basandosi su un set point definito dall'utente. Il flusso sarà plausibilmente incrementato durante l'esperimento per ottenere condizioni ideali. Il range di flusso dell'MFC sarà deciso in base ai massimi tassi di iniezione previsti.
- Misuratore di flusso di massa – potrebbe essere aggiunto a valle a conferma dei valori dell'MFC.
- Computer dotato di software che gestisce le component del collettore (valvole, MFC, etc.) e la registrazione dei dati (pressione, flussi, temperature, etc.).
- Valvola di non ritorno – questa valvola unidirezionale permette il flusso nel pozzo, ma previene il ritorno del flusso di gas o acqua dal pozzo verso il collettore, nel caso in cui la pressione dovesse cadere a monte (e.g., perdita, shut-down per la ricarica, etc.).
- Valvola di spegnimento– per isolare manualmente il pozzo per sicurezza o per test di pressione.
- Manometro e sensore di temperatura – monitoraggio a testa pozzo di P e T, necessario specialmente nel caso in cui queste non siano monitorate down-hole.

L'effettiva quantità e tasso di CO₂ da iniettare sarà funzione della permeabilità dell'orizzonte in cui si inietta e della faglia per tutta la sua lunghezza, come descritto nella Sezione 0. Un altro problema correlato che dovrebbe essere considerato, è la profondità di iniezione pianificata e come la pressione idrostatica in situ in quel punto influenzerà il volume del gas in situ (e di

conseguenza la quantità di CO₂ che deve essere acquisita per l'iniezione). Ciò è illustrato nella Figura 27, dove i tassi di iniezione dei quattro esperimenti di iniezione principali sono estrapolati dalla profondità originale a una profondità considerata per il SFL (i.e., 200m), assumendo costante sia il tasso volumetrico di iniezione (a) o il tasso di iniezione di massa (b).

La Figura 14a è stata calcolata assumendo che lo stesso tasso volumetrico di iniezione di gas in situ è iniettato a differenti profondità, mostrando come la massa totale cresce per mantenere lo stesso volume a maggiori pressioni. Ad esempio, 4.5 m³ CO₂ / d sono stati iniettati alle condizioni di pressioni in situ (8 m of carico idraulico) presso il sito con il tasso di iniezione minore (Vrogum), il che equivale a un tasso di iniezione di massa di circa 16 kg/d. Se fosse possibile iniettare lo stesso tasso di volume di 4.5 m³/d nelle condizioni di pressione in situ incontrate a 200 m di profondità, sarebbero necessari 190 kg/d; in altre parole, la replica dell'esperimento di Vrogum a 200 m per lo stesso lasso di tempo, richiederebbe un totale di 13 t di CO₂ invece delle originali 1.6 t di CO₂ (i.e., circa 8 volte tante). Un'analisi simile può essere condotta per altre profondità, e a varie profondità per i parametri di iniezione negli altri tre siti (Figura 27a). La Figura 27b è simile, ma mostra come il volume in situ cambierebbe se il tasso di massa totale iniettata fosse lasciato costante. Usando nuovamente Vrogum come esempio, mentre l'iniezione di 16 kg / d risultano in un effettivo tasso volumetrico in situ di 4.5 m³/d (a 8 m di profondità), a 200 m questa iniezione corrisponderebbe a un tasso volumetrico di iniezione in situ di circa 0.4 m³/d.

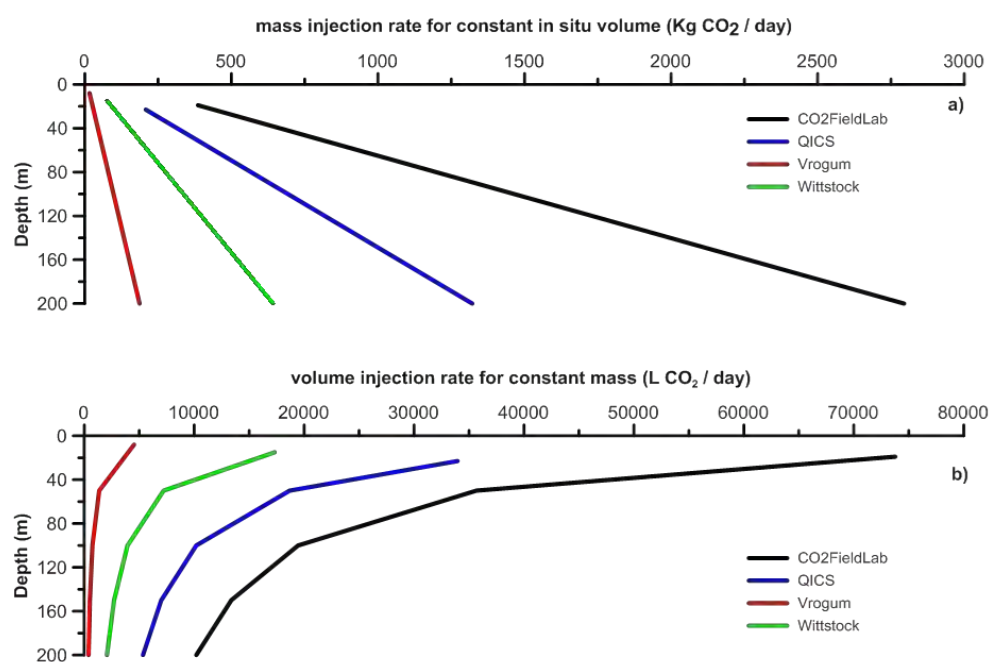


Figura 14. Grafici ipotetici dell'impatto dell'incremento della pressione con la profondità (assumendo un incremento costante di pressione idrostatica) mantenendo un parametro costante: (a) volume di gas iniettato in situ (b) massa. Vedi testo per spiegazione.

Al posto del tasso di iniezione, la Figura 15 mostra il volume in situ occupato da 1 t di CO₂ a varie profondità e le associate pressioni in situ (assumendo costante la pressione idrostatica). Questa figura è presentata per illustrare come il gas iniettato ad una data profondità

aumenterà di volume mano a mano che migra verso l'alto. Ad esempio, il gas iniettato a 100 m aumenterebbe di circa 10 volte in volume se raggiungesse la superficie (da 50 a 500 m³), e questa espansione contribuirà alle forze che guidano la migrazione. Questa relazione avrà anche un impatto sulla capacità dei metodi geofisici profondi di rilevare un'anomalia, in quanto una data massa di CO₂ sotto forma di gas pocket risulterà essere un target (i.e., volume) molto più piccolo a grandi profondità piuttosto che una massa equivalente a minori profondità.

Anche la solubilità della CO₂ influenzerà la migrazione, in quanto la solubilità di un gas cresce con il crescere della pressione, ma decresce con l'aumento della salinità. Non è noto se l'acqua interstiziale in profondità nel Sulcis sia salina o meno, considerando la vicinanza con il mare.

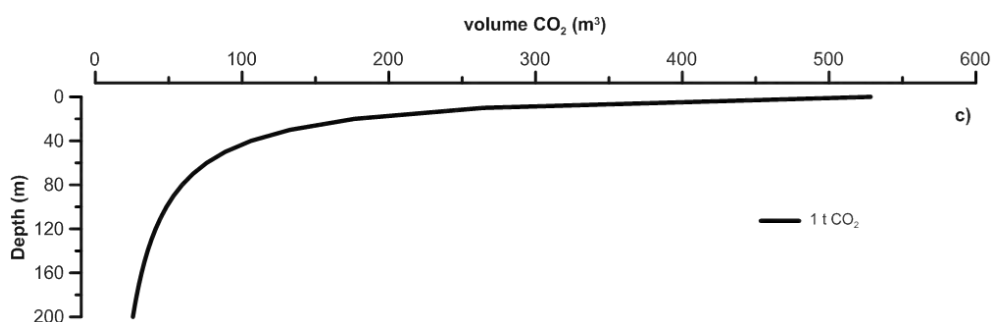


Figura 15. Variazione di volume di 1 t di CO₂ con la profondità, assumendo un gradiente costante di pressione idrostatica.

Pozzi- generalità

Considerando la mancanza di una dettagliata conoscenza della stratigrafia del sito, la natura innovativa del SFL (i.e., perforare e iniettare CO₂ lungo un piano di faglia), l'importanza di creare un sito in maniera opportuna e con le caratteristiche necessarie tali che possano essere usate con successo nel progetto ENOS finanziato dalla CE, e il costo totale della costruzione del sito, è imperativo che le decisioni per la pianificazione e le infrastrutture da costruire siano ottimizzate in modo da aumentare il potenziale di successo. E' quindi altamente raccomandabile che un esperto esterno con esperienza sufficiente e conoscenza relative al lavoro pianificato, in modo specifico un ingegnere di perforazione, sia assunto per pianificare e seguire l'esecuzione dello sviluppo del sito. Basandosi sulle necessità scientifiche del progetto e l'input del cliente, l'ingegnere di perforazione sarà responsabile della creazione di tre documenti: la proposta del pozzo, la progettazione base del pozzo, e il programma operativo del pozzo.

I primi due documenti definiscono le necessità del progetto, elencano le specifiche necessarie per le infrastrutture, descrivono la progettazione e forniscono i calcoli necessari per eventuali implementazioni. In particolare, si riferiscono a quei punti come: la sequenza di lavoro, la valutazione del gradiente di pressione nel sottosuolo e l'associato controllo della pressione stessa e dei protocolli di sicurezza (e.g., prevenzione dei blow-out), la profondità e il diametro del pozzo, il metodo di perforazione da usare, il tipo e la quantità necessaria di fango di perforazione da usare, il materiale per la cementazione e le procedure (capacità di sealing,

resistenza alla CO₂, etc.), i log geofisici da eseguire nel momento opportuno e nella giusta sequenza, la strumentazione geofisica da installare permanentemente a fondo pozzo o calata lungo il casing, il casing necessario (diametro, materiale, spessore, intervallo di profondità, progettazione, etc.), la progettazione e il collegamento della testa pozzo e del collettore di iniezione, la creazione di un piano per la sicurezza, la gestione e lo smaltimento dei fanghi di perforazione e dei cuttings, l'eventuale chiusura ed abbandono del sito. La progettazione di base del pozzo costituisce il documento principale per la richiesta di varie autorizzazioni, come la Valutazione di Impatto Ambientale (i.e., VIA). Invece il terzo documento, il programma operativo del pozzo, descrive in grande dettaglio l'ingegneristica del pozzo, l'attrezzatura necessaria, e la procedura esatta da seguire per garantire che il prodotto finale raggiunga gli obiettivi della proposta di perforazione e che questa abbia le caratteristiche tecniche illustrate nella progettazione. Durante questa fase inoltre, l'ingegnere di perforazione seguirà direttamente il lavoro operativo in loco.

Il focus della progettazione e dello sviluppo del sito deve essere quello di raggiungere l'obiettivo di iniettare CO₂ in una zona di faglia. Due questioni devono quindi essere attentamente affrontate: primo, la faglia scelta deve essere intercettata in modo preciso; secondo, delle buone caratteristiche di iniezione sono necessarie affinché sufficiente CO₂ entri nella faglia. Per quanto riguarda la prima, più sono i dati di sottosuolo, maggiore saranno le chances di successo. Per questa ragione sarebbe meglio se i due pozzi profondi di osservazione fossero perforati e le misure geofisiche condotte prima della perforazione del pozzo di iniezione; questo fornirebbe un'analisi stratigrafica dettagliata attraverso i campioni di carote e una più esatta caratterizzazione della localizzazione ed architettura della faglia attraverso i metodi sismici downhole. Quest'ultimi, per quanto riguardala capacità di iniezione, dipenderanno non solo dalle caratteristiche in situ della faglia ma anche dalle caratteristiche progettuali del pozzo di iniezione (scelti da un ingegnere esperto di perforazione).

Pozzo di iniezione

Il pozzo di iniezione, profondo 250 m, è l'obiettivo primario del SFL. Si raccomanda, in ogni caso, la richiesta di permesso per perforare lungo la faglia (se necessario) un secondo pozzo di iniezione inclinato, di 50 m, per due ragioni:

Innanzitutto, se un solo pozzo di iniezione è perforato e questo pozzo non ha le caratteristiche di permeabilità necessarie per una sufficiente iniezione di gas, c'è il rischio che gli obiettivi di sviluppo del sito e gli esperimenti relativi ad ENOS (così come qualsiasi uso futuro del sito per altre ricerche) non siano raggiunti. Questo metterebbe a rischio il significativo investimento finanziario relativo al SFL. Sebbene teoricamente un secondo pozzo di iniezione potrebbe essere perforato anche in un secondo momento, il costo aggiuntivo di ri-mobilizzazione per un nuovo pozzo potrebbe essere maggiore di quello necessario per costruire contemporaneamente con il primo pozzo. Inoltre, il ritardo necessario per la messa in servizio

e il completamento di un secondo pozzo comprometterebbe il ristretto periodo di 3 anni durante il quale le ricerche di ENOS devono essere completate, compromettendo quindi anche le ricerche e i risultati previsti dai contratti dei tanti partners europei. Se è vero che il peggior scenario sarebbe che nessuno dei due pozzi abbia le caratteristiche necessarie, la probabilità che questo accada è estremamente bassa e sarà minimizzata dall'ulteriore lavoro di caratterizzazione superficiale del sito, pianificato per il prossimo futuro (vedi Sezione 3.2.3).

In secondo luogo, se invece entrambi i pozzi di iniezione avessero le caratteristiche adatte, i differenti tipi di esperimenti che potrebbero essere potenzialmente condotti nel SFL verrebbero raddoppiati. Questo sarebbe principalmente dovuto all'effetto della pressione (i.e., profondità di iniezione) sul volume di gas, solubilità, ed eventuale migrazione (vedi sezione precedente), così come il fatto che alcuni metodi di monitoraggio siano più efficaci in assetti superficiali o profondi. Il pozzo superficiale dovrebbe probabilmente essere bloccato durante l'iniezione più profonda in modo da garantire che esso non fornisca una via diretta di migrazione.

Un carotaggio continuo è necessario per la perforazione dei due pozzi di iniezione inclinati, come descritto nella Sezione 3.2.3, il che limiterà il tipo di tecniche di perforazione utilizzabili. Discussioni dovranno essere portate avanti con l'ingegnere di perforazione e le potenziali società di perforazione per comprendere le capacità tecniche e le limitazioni delle diverse tecniche, in modo che la più appropriata a raggiungere gli obiettivi del progetto possa essere scelta.

Le questioni che devono essere affrontate dall'ingegnere di perforazione nel momento di scegliere una tecnica di perforazione includono:

- Il recupero di sedimenti non consolidati è spesso difficile a causa della loro natura mobile. Per gli obiettivi del progetto, il recupero delle carote deve essere il più completo possibile;
- Considerando la profondità e la natura sconosciuta del target nel sottosuolo, un controllo preciso della direzione, dell'inclinazione e della posizione del foro durante la perforazione in avanzamento è fondamentale per garantire che la faglia sia intercettata alla profondità desiderata;
- Sebbene non sia prettamente una questione riguardante la perforazione, il riconoscimento della faglia attraverso i core recuperati non sarà necessariamente facile (a seconda della litologia) e, quindi, un'alta qualità di core sarà necessaria per aumentare le probabilità di una corretta interpretazione.
- Completamento del pozzo, che comprende il lavaggio del foro fino alla profondità necessaria per rimuovere qualsiasi fango di perforazione o zona di smear, fondamentale per garantire la connessione idraulica con l'orizzonte target e per la sufficiente iniezione di CO₂. A questo proposito il progetto dovrebbe prendere in considerazione l'uso di fanghi di perforazione biodegradabili seguito da un lavaggio

attraverso un “enzyme breaker” come fatto a ZERT (vedi Sezione 2.1.5, ZERT), al fine di garantire che la zona di iniezione rimanga permeabile.

- Molti dei precedenti test di iniezione di CO₂ hanno avuto difficoltà a creare un efficace seal intorno al pozzo di iniezione, con vari siti (e.g., CO₂FieldLab, Maguelone) che hanno segnalato perdite intorno alla testa pozzo. Il sealing è stato particolarmente difficoltoso a causa della natura non consolidata dei sedimenti e del foro inclinato. Inoltre, alcune tecniche di perforazione sono più inclini a creare delle “damage zone” intorno al pozzo, le quali possono risultare in vie di fuga aggiuntive. Quindi, opportuni metodi di perforazione e di sigillatura devono essere scelti in modo che non vi siano perdite lungo il pozzo di iniezione nel SFL.

Vari altre questioni riguardanti la costruzione, la strumentazione e i test devono essere considerati insieme all'ingegnere di perforazione, tra cui:

- Quale diametro di pozzo è richiesto, e si tratterà di un singolo diametro o sarà ridimensionato a maggiori profondità?
- Log geofisici da eseguire: sonico, resistività (1D e/o tomografia), induzione (SP, GR), caliper, stress in situ, e Circumferential Borehole Imaging (CBIL)
- Rivestimento e sensori: le opzioni includono plastica o vetroresina se saranno condotti indagini geoelettriche down-hole, o acciaio per resistere alla corrosione.
- Cementazione: che tipo di cemento sarà usato, è resistente alla corrosione, e sopra quale intervallo verrà posato?
- Quale sarà la lunghezza dell'intervallo sufficiente a garantire tutte le analisi?
- Strumentazione a fondo pozzo: pressione e temperature saranno monitorate a fondo pozzo o testa pozzo? Saranno installati sensori geofisici al di sotto del punto di iniezione? (un sensore sismico è stato suggerito da un gruppo di ricerca);
- Che tipo di test idraulici verranno condotti e di che tipo? Come descritto nella Sezione 3.2.3 – Idrogeologia, prove con carico crescente (bail tests) dovrebbero essere condotte su tutti i pozzi, e possibilmente una prova di pompaggio dovrebbe essere eseguita nel pozzo di iniezione e nel piezometro superficiale centrale.
- Come sarà campionata l'acqua per l'analisi chimica / monitoraggio?
- In che modo si svolgerà l'iniezione? Verrà usato un packer per isolare l'intervallo di profondità individuato in modo da garantire l'iniezione a quella sola profondità? Se sì, che caratteristiche devono avere il packer e le relative tubazioni per fornire la CO₂?

Per garantire che il sito abbia la capacità per l'iniezione, se nella peggiore delle ipotesi i due fori di iniezione non siano permeabili all'interno della faglia, una iniezione molto superficiale potrebbe essere presa in considerazione (ca. 2m, come ZERT e Ginninderra) inserendo manualmente un piezometro a 45° in un sedimento poroso.

Pozzi di monitoraggio profondi

I pozzi di monitoraggio profondi si troveranno ad affrontare alcune delle stesse sfide dei fori di iniezione inclinati, tuttavia essi saranno più semplici a causa della loro natura verticale, della mancanza di contatto con la CO₂, e dei minori criteri per il loro completamento.

È necessario che nei 100 m superiori di uno dei pozzi di monitoraggio siano fatti dei carotaggi, il che significa che la tecnica di perforazione utilizzata per il pozzo di iniezione sarà la stessa usata per questo pozzo. Altre questioni che dovrebbero essere affrontate dall'ingegnere di perforazione includono:

- Gli stessi logs geofisici di downhole sopra descritti dovrebbero essere utilizzati anche in entrambi i pozzi di monitoraggio.
- Il pozzo avrà un intervallo fenestrato per il campionamento di acque profonde o sarà "dry"?
- Quale materiale di rivestimento verrà usato? Questo è importante in termini di strumenti geofisici che verranno utilizzati, in quanto un casing metallico non potrà essere utilizzato nel caso si pianifichino indagini geoelettriche. Come sopra, le varie opzioni includono plastica, vetroresina, acciaio.
- Quale diametro del foro è necessario?
- Quali sensori / array di sensori di fondo pozzo verranno impiegati nel cemento tra il pozzo e il casing, e come questo influenzerà il diametro del foro, del casing, e le proprietà del cemento? Secondo la proposta di ENOS almeno il Distributed Acoustic Sensors (DAS) per misure sismiche verrà fornito dalla società Silixa; informazioni tecniche saranno necessarie da questo fornitore.
- L'impiego di un Sistema "WestBay multi-level" deve essere preso in considerazione per uno o entrambi i pozzi profondi (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**e) per monitorare le variazioni di pressione durante l'iniezione?

Piezometri/ pozzi di osservazione delle acque superficiali

Un totale di 9 piezometri sarà installato nel sito, tenendo conto delle seguenti caratteristiche e problemi:

- Perforati fino ad una profondità di 10-15 m.
- fenestrati sullo strato poroso più profondo incontrato, probabilmente al di sopra di un intervallo dai 50 a 100 cm, a seconda dello spessore dell'unità.
- ciascun foro deve essere lavato, e completato per buona connessione idraulica.
- Packer di sabbia per l'intervallo fenestrato, copertura di bentonite per resto del tubo verticale.
- I piezometri dovrebbero avere un diametro interno di almeno 5 cm per consentire l'impiego di sensori di monitoraggio continuo, con due pozzi aventi un diametro di 10 cm per l'utilizzo di strumenti più grandi.
- I piezometri possono essere realizzati con PVC standard.
- La perforazione può essere fatta con "hollow stem auger"

- I cuttings dovrebbero essere registrati (se non ci sono carotaggi) ed analisi mineralogiche eseguite.
- Alcuni pozzetti potrebbero essere equipaggiati con degli array permanenti a fondo foro sulla superficie esterna dei piezometri per condurre, ad esempio, misure di resistività.
- Test a carico crescente e di pompaggio dovrebbero essere condotti per determinare la permeabilità e la connessione idraulica tra i pozzi.
- Poiché questi pozzi sono appena al di sopra del punto di iniezione, bisogna fare attenzione ad assicurarsi che siano sigillati e che non rappresentino essi stessi dei potenziali punti di leakage.

Sonde per il monitoraggio della CO₂ del suolo (GasPro)

Come introdotto precedentemente nella discussione sugli studi di riferimento necessari, una griglia 2D di sensori GasPro (Figura 16a) sarà sepolto a una profondità di circa 80 cm in 10 cm di larghezza, in buchi perforati a mano (Figura 16b), per il monitoraggio in continuo (una volta ogni ora) della concentrazione della CO₂ e della temperatura nello strato di terreno sottosaturo; alcuni punti monitoreranno anche l'umidità del suolo. Come mostrato schematicamente in figura 23, questa griglia sarà composto da 30 a 50 sensori distanziati su una griglia con una spaziatura nominale dai 10 ai 20 m (a seconda dello spazio disponibile), con il potenziale per un'ulteriore copertura, più dettagliata, nelle vicinanze dei punti con un rischio di fuoriuscita di CO₂ (e.g., in prossimità dei pozzi di iniezione, di osservazione o dei piezometri).

Il sensore sarà sepolto a 80 cm di profondità e sarà collegato via cavo ad una scatola impermeabile posizionato appena sotto la superficie del terreno (Figura 29b), che ospiterà batterie intercambiabili e una antenna a radio frequenza che comunicherà in modalità wireless con una stazione di controllo centrale. Questa stazione di controllo, che si troverà molto probabilmente nell'ufficio in loco (vedi sotto) interrogherà ogni sonda individualmente su base oraria e quindi caricherà questi dati a un server centrale presso l'Università di Roma. Questo monitoraggio in tempo reale consentirà la rapida scoperta di eventuali errori di sistema (e la loro risoluzione tempestiva), così come la valutazione dettagliata e il riconoscimento di qualsiasi segnale di perdita associato con l'esperimento.

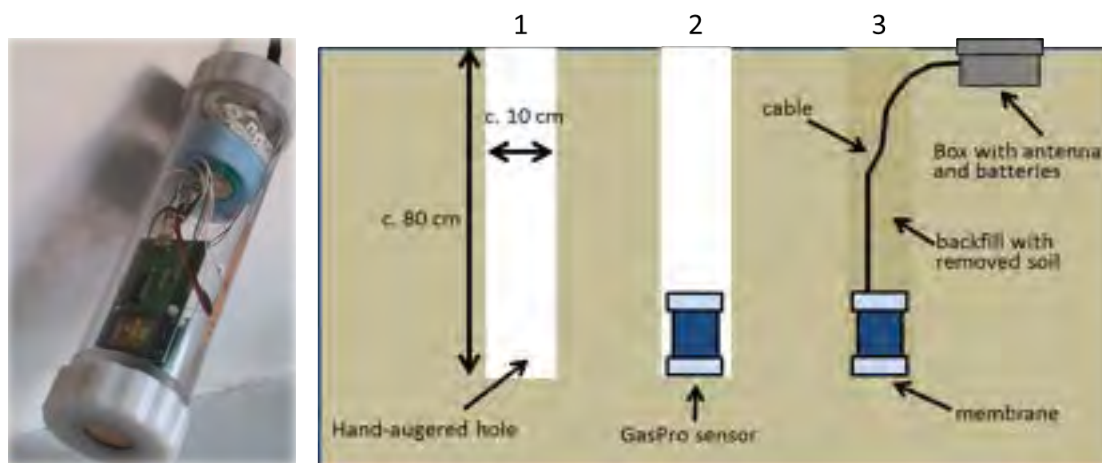


Figura 16. Fotografia di una sonda GasPro di monitoraggio della CO₂ (a) e la sua procedura di installazione (b).

Ufficio in sede

Un ufficio in loco sarà necessario per ospitare i ricercatori e le attrezzature di ricerca durante i lavori di baseline, di iniezione e di monitoraggio post-iniezione. Questa struttura, che molto probabilmente sarà una roulotte/caravan, richiede energia elettrica, accesso internet, tavoli, e un magazzino. Sarà usato per alloggiare i dispositivi di monitoraggio (ad esempio, la stazione centrale di gas del suolo illustrata in precedenza), i computer utilizzati per il monitoraggio di altre apparecchiature, gli strumenti e le attrezzature necessarie per la manutenzione del sito, per il deposito degli strumenti di campionamento, etc. Questo ufficio non ospiterà il collettore di iniezione di gas, in quanto l'infrastruttura di iniezione del gas deve essere mantenuta separata dagli uffici per motivi di sicurezza.

3.4 Stima preliminare dei costi delle infrastrutture del SFL

Stime dei costi precise e dettagliate non sono possibili senza lo svolgimento di una effettiva gara, in cui sono specificati gli esatti dettagli tecnici delle infrastrutture necessarie. Alcune stime iniziali per la perforazione e il completamento di un pozzo possono comunque essere fatte, sulla base di informazioni pubbliche disponibili dal governo. Per la seguente discussione, i costi illustrati sono presi dal "Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici" della Regione Autonoma della Sardegna (RAdS, 2009) e la "Tariffa unificata di Riferimento dei Prezzi per l'Esecuzione di opere pubbliche" della Regione Basilicata (RB, 2015). Mentre è stato possibile trovare prezzari più recenti per le altre regioni (e.g., RB, 2015), il documento relativo a 7 anni fa sembra essere la versione più recente disponibile su internet per questa regione.

La Tabella 4. Stime dei costi per le diverse configurazioni del pozzo, sulla base dei prezzi pubblicati in RAdS (2009). riporta alcuni esempi di calcolo realizzati con i costi rappresentativi per la Sardegna riportati nel RAdS (2009). Parti rilevanti del documento originale sono indicate nell'appendice 1, in cui sono riportati i codici, descrizione dettagliata, e costi di ogni elemento

elencato nella tabella. Sono stati scelti articoli singoli che più si avvicinano a quelli previsti per il SFL, sebbene chiaramente approssimazioni, compromessi, ed assunzioni devono essere fatte, considerando che i pozzi del SFL avranno diverse esigenze da queste opzioni "standardizzate".

Queste scelte avranno chiaramente un impatto sulle stime finali dei costi, e quindi dovranno essere aggiornate con una valutazione più accurata basata su offerte più attuali. Alcune variabili importanti sono:

- Diametro foro. Per un carotaggio continuo, le opzioni fornite sono o <85 mm o da 85 a 101 millimetri; per gli obiettivi di questo sito è stato sempre scelto il diametro maggiore. Invece, per la perforazione distruttiva (cioè senza carotaggi), il diametro citato era "fino a 145 mm".
- Profondità della perforazione. I prezzi per le varie opzioni di perforazione di solito sono indicati per 3 diversi intervalli: 0-20m, 20-40m, e 40-60m. I prezzi non sono indicati per pozzi più profondo di 60 m e, quindi, sono state fatte delle stime per gli intervalli di 60-100m, 100-150m, 150-200m, e 200-250 basandosi sui trend dei tre intervalli precedenti.
- Litologia / durezza della roccia - sedimenti. Sono previsti diversi prezzi per il carotaggio in continuo nei sedimenti formati da (in ordine di prezzo crescente): i) sabbie e argille; ii) sabbie ghiaiose con alcune rocce; iii) ghiaia, ghiaia sabbiosa e rocce. Considerando che la stratigrafia esatta del sito non è conosciuta, la litologia più grossolana (e più costosa) è stata scelta per questi calcoli.
- Litologia / durezza della roccia - vulcaniti. Se la litologia incontrata è troppo dura per la tecnica di perforazione standard, come potrebbe verificarsi con le unità vulcaniche locali, una punta di diamante dovrà essere utilizzata. RAdS (2009) riporta un costo aggiuntivo di 47 euro per metro per l'uso di tale tecnica. Quindi, per ogni pozzo profondo nella tabella 4 c'è un costo complessivo calcolato utilizzando solo la tecnica di perforazione standard, ed un secondo costo totale che include il primo più il costo aggiuntivo della corona di diamante.
- Casing e completamento del pozzo. La descrizione in RAdS (2009) afferma che nel costo di perforazione è "compresa la tubazione di rivestimento del foro", ma il tipo di materiale o lo spessore non è descritto, il che significa che ci potrebbero essere costi aggiuntivi. Inoltre sviluppo, spurgo e sigillatura dell'anello tramite cementazione non è menzionato, e quindi questi possono comportare costi aggiuntivi.
- Altri costi. Questi includono la mobilitazione, l'ubicazione del pozzo, e la fornitura di core boxes.

Considerando che i prezzi della regione Sardegna sono vecchi di più di 7 anni, e che i prezzi indicati possono essere significativamente datati, alcuni calcoli di esempio sono stati effettuati anche utilizzando i valori di un simile, ma molto più recente, documento della Regione Basilicata (RB, 2015). Parti rilevanti di questo documento sono riportate nell'Appendice 2.

La

Tabella 5. Stime dei costi per le diverse configurazioni pozzo/piezometri, sulla base dei prezzi pubblicati in RB (2015). riporta questi calcoli. Similmente a come scritto in precedenza, varie ipotesi sono state necessarie per quanto riguarda il tipo di roccia (di nuovo l'opzione a

granulometria maggiore dei sedimenti è stata scelta), profondità e intervalli di profondità, e diametri del pozzo (qui l'opzione è > 85 mm senza un tetto massimo). Una differenza in questo documento è che si elenca un prezzo fisso per ogni corona di diamante consumata, rendendo difficile stimare questo costo aggiuntivo. In generale, i costi calcolati qui sono superiori di circa il 50% rispetto a quelli stimati in Tabella 4, il che può essere dovuto all'inflazione nel corso degli ultimi 7 anni, e / o ai maggiori costi in Basilicata, e / o diversi criteri di voce. Questo confronto mette in evidenza l'importanza di ottenere stime più accurate, aggiornate, dei prezzi locali.

Tabella 4. Stime dei costi per le diverse configurazioni del pozzo, sulla base dei prezzi pubblicati in RAdS (2009).

Codice	Descrizione	u.m.	prezzo	numero	metri / pozzo	prezzo parziale	prezzo totale
Cantiere							
D.0002.0001.0001	Impianto di cantiere per indagini	caduno	830.57	1		831	831
9 piezometri fino 12 m profondità, diametro 101 mm, con carotaggio continuo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	9		2,186	
D.0002.0001.0014	Perforazione (vedi descrizione)	m	71.89	9	12	7,764	
D.0002.0001.0044	Fornitura e posa di piezometro, tipo	m	18.05	9	12	1,949	
D.0002.0001.0032	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	32.83	9	12	709	12,609
9 piezometri fino 12 m profondità, diametro fino 145 mm, con distruzione di nucleo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	9		2,186	
D.0002.0001.0025	Perforazione 0-20 m (vedi descrizione)	m	49.41	9	12	5,336	
D.0002.0001.0044	Fornitura e posa di piezometro, tipo	m	18.05	9	12	1,949	9,472
1 pozzo di osservazione fino 200 m profondità, diametro 101 mm, con carotaggio continuo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	1		243	
D.0002.0001.0014	Perforazione 0-20 m (vedi descrizione)	m	71.89	1	20	1,438	
D.0002.0001.0017	Perforazione 20-40 m (vedi descrizione)	m	88.23	1	20	1,765	
D.0002.0001.0020	Perforazione 40-60 m (vedi descrizione)	m	104.58	1	20	2,092	
stimato	Perforazione 60-100 m	m	150	1	40	6,000	
stimato	Perforazione 100-150 m	m	200	1	50	10,000	
stimato	Perforazione 150-200 m	m	300	1	50	15,000	
D.0002.0001.0032	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	32.83	1	200	1,313	37,850
D.0002.0001.0030	Sovrapprezzo per l'impiego di corone diamantate, prezzo valido fino 60 m	m	47.01	1	200	9,402	47,252
1 pozzo di osservazione fino 200 m profondità, diametro fino 145 mm, con distruzione di nucleo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	1		243	
D.0002.0001.0025	Perforazione 0-20 m (vedi descrizione)	m	49.41	1	20	988	
D.0002.0001.0026	Perforazione 20-40 m (vedi descrizione)	m	57.15	1	20	1,143	
D.0002.0001.0027	Perforazione 40-60 m (vedi descrizione)	m	63.71	1	20	1,274	
stimato	Perforazione 60-100 m	m	80	1	40	3,200	
stimato	Perforazione 100-150 m	m	120	1	50	6,000	
stimato	Perforazione 150-200 m	m	150	1	50	7,500	20,348
D.0002.0001.0030	Sovrapprezzo per l'impiego di corone diamantate, prezzo valido fino 60 m	m	47.01	1	200	9,402	29,750
1 pozzo di iniezione, inclinato a 45°, fino 250 m profondità, diametro 101 mm, con carotaggio continuo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	1		243	
D.0002.0001.0021	sovrapprezzo per perforazione ad 45°	m	7.31	1	250	1,828	
D.0002.0001.0014	Perforazione 0-20 m (vedi descrizione)	m	71.89	1	20	1,438	
D.0002.0001.0017	Perforazione 20-40 m (vedi descrizione)	m	88.23	1	20	1,765	
D.0002.0001.0020	Perforazione 40-60 m (vedi descrizione)	m	104.58	1	20	2,092	
stimato	Perforazione 60-100 m	m	150	1	40	6,000	
stimato	Perforazione 100-150 m	m	200	1	50	10,000	
stimato	Perforazione 150-200 m	m	300	1	50	15,000	
stimato	Perforazione 200-250 m	m	400	1	50	20,000	
D.0002.0001.0032	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	32.83	1	250	1,642	60,006
D.0002.0001.0030	Sovrapprezzo per l'impiego di corone diamantate, prezzo valido fino 60 m	m	47.01	1	250	11,753	71,758
1 pozzo di iniezione, inclinato a 45°, fino 50 m profondità, diametro 101 mm, con carotaggio continuo							
D.0002.0001.0002	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	242.91	1		243	

D.0002.0001.0021	sovrapprezzo per perforazione ad 45°	m	7.31	1	50	366	
D.0002.0001.0014	Perforazione 0-20 m (vedi descrizione)	m	71.89	1	20	1,438	
D.0002.0001.0017	Perforazione 20-40 m (vedi descrizione)	m	88.23	1	20	1,765	
D.0002.0001.0020	Perforazione 40-60 m (vedi descrizione)	m	104.58	1	10	1,046	
D.0002.0001.0032	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	32.83	1	50	328	5,185
D.0002.0001.0030	Sovrapprezzo per l'impiego di corone diamantate, prezzo valido fino 60 m	m	47.01	1	50	2,351	7,535

Tabella 5. Stime dei costi per le diverse configurazioni pozzo/piezometri, sulla base dei prezzi pubblicati in RB (2015).

		u.m.	prezzo	numero	metri / pozzo	prezzo parziale	prezzo totale
Cantiere							
M.04.001	Trasporto in andata e ritorno di attrezzatura per sondaggi	km	2.43	100		243	
M.04.002	Approntamento di attrezzature per sondaggi e prove in sito	corpo	556.5	1		557	800
9 piezometri fino 12 m profondità, diametro minimo 85 mm, con carotaggio continuo							
M.04.003	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	298.36	9		2,685	
M.04.006	Perforazione 0-20m (vedi descrizione)	m	151.29	9	12	16,339	
M.05.001.02	Fornitura e posa in opera di piezometri a tubo aperto in PVC	m	19.79	9	12	2,137	
M.04.017	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	28.73	9	12	621	21,782
9 piezometri fino 12 m profondità, diametro 85 - 145 mm, con distruzione di nucleo							
M.04.003	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	298.36	9		2,685	
M.04.009	Perforazione 0-30 m (vedi descrizione)	m	78.62	9	12	8,491	
M.05.001.02	Fornitura e posa in opera di piezometri a tubo aperto in PVC	m	19.79	9	12	2,137	13,314
1 pozzo di osservazione fino 200 m profondità, diametro minimo 85 mm, con carotaggio continuo							
M.04.003	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	298.36	1		298	
M.04.006.01	Perforazione 0-20m (vedi descrizione)	m	151.29	1	20	3,026	
M.04.006.02	Perforazione 20-40 m (vedi descrizione)	m	189.13	1	20	3,783	
M.04.006.03	Perforazione 40-60 m (vedi descrizione)	m	236.43	1	20	4,729	
M.04.006.04	Perforazione 60-100 m (vedi descrizione)	m	283.71	1	40	11,348	
stimato	Perforazione 100-150 m	m	350	1	50	17,500	
stimato	Perforazione 150-200 m	m	400	1	50	20,000	
M.04.017	Fornitura di cassetta catalogatrice	caduno	28.73	1	200	1,149	61,833
1 pozzo di osservazione fino 200 m profondità, diametro fino 145 mm, con distruzione di nucleo							
M.04.003	Installazione di attrezzatura per sondaggio	caduno	298.36	1		298	
M.04.009.01	Perforazione 0-30 m (vedi descrizione)	m	78.62	1	30	2,359	
M.04.009.02	Perforazione 30-60 m (vedi descrizione)	m	113.2	1	30	3,396	
M.04.009.03	Perforazione 60-100 m (vedi descrizione)	m	132.08	1	30	3,962	
stimato	Perforazione 100-150 m	m	160	1	50	8,000	
stimato	Perforazione 150-200 m	m	200	1	50	10,000	28,015
Sovrapprezzo per l'uso di corone diamantate							
M.04.007	Sovrapprezzo per l'uso di corone diamantate durante l'esecuzione di sondaggi a rotazione, in successioni rocciose	caduno	645.15			?	?

Sebbene indagini locali siano necessarie per la CO₂ richiesta, una stima molto approssimativa può essere fatta per CO₂ gassosa. Assumendo 55 euro per un contenitore di 62 l a 200 bar, 10 tonnellate di CO₂ costerebbe circa 25.000 euro. Tuttavia, questo si basa su un unico pezzo, e l'acquisto all'ingrosso dovrebbe essere molto più economico. Inoltre, le indagini devono essere fatte anche per il costo di utilizzo di CO₂ liquida.

Altri costi delle infrastrutture che non sono stati stimati qui, ma che devono essere affrontati, includono la preparazione del sito per lo stoccaggio di CO₂, il collettore di iniezione e le tubazioni, l'ufficio in loco, recinzioni per la sicurezza, etc.

3.4.1 Sintesi dei costi e responsabilità

Le seguenti tabelle riassumono chi è responsabile per il lavoro, da dove verranno i fondi e, ove possibile, una stima approssimativa dei costi. Questo comprende: autorizzazione per il sito e comunicazione (Tabella 6), il monitoraggio di baseline (Tabella 7), la perforazione (Tabella 8), e altre infrastrutture (Tabella 9). Sebbene non esaustive, queste tabelle devono agire come una struttura che può essere ampliata e aggiornata mano a mano nuove informazioni diventino disponibili. I costi di perforazione, in particolare, dovrebbero essere considerati molto preliminari. Si noti che ad alcuni elementi corrisponde più di una opzione, e che le stime di perforazione si basano principalmente su quelli calcolati nella tabella 5.

Tabella 6. Sintesi delle richieste di permesso del sito e delle attività di comunicazione, tra cui una stima approssimativa dei costi (dove disponibile) e l'istituto responsabile di ogni voce e la fonte di finanziamento. Una stima più accurata dei costi deve essere ottenuta per ogni voce mediante gare.

oggetto	descrizione	Costi stimati	Organizzazione responsabile	Provenienza dei fondi
Permesso di perforazione	Richiesta per la perforazione dei pozzi profondi e superficiali	?	Sotacarbo	Sotacarbo
Permesso di iniezione di CO2	Richiesta di iniettare una piccola quantità di CO2	?	Sotacarbo (Sapienza/OGS?)	Sotacarbo
Attività di sensibilizzazione della pubblica opinione	Dialogo e discussione con le realtà locali, mediante gruppi pubblici di lavoro, convegni e attività di comunicazione diretta con la popolazione	?	Sapienza, Sotacarbo	ENOS, Sotacarbo

Tabella 7. Sintesi di monitoraggio della baseline, tra cui una stima approssimativa dei costi (dove disponibile), l'istituto responsabile per ogni voce e la fonte di finanziamento. Stime dei costi più accurate devono essere ottenuti per ogni voce mediante gare. Si noti che i logs geofisici down-hole sono stati descritti sotto la voce "drilling".

Item	Option description	Estimated cost	Responsible organisation	Source of funds
Ground penetrating radar	Per definire la stratigrafia superficiale	20,000	Sapienza	Sotacarbo
microsismicità	Per definire la baseline della sismicità e microsismicità	?	INGV?	Sotacarbo
EM, ERT (opzionale)	Per definire la baseline della conduttività	?	?	Sotacarbo
Magnetometria (opzionale)	Per individuare possibili strutture antropiche sepolte prima di perforare	?	?	Sotacarbo
Direct push or penetrometer (optionable)	Per preparare la perforazione e definire la idrostratigrafia superficiale. La sensoristica potrebbe includere strumenti per la conducibilità e un profilo idraulico.	?	?	Sotacarbo
VSP, borehole, cross-hole seismic measurements	Uso di Distributed Acoustic Sensors per la sismica in pozzo	?	OGS, Silixa	ENOS
Test idraulici in pozzo	Bail tests per stimare la permeabilità, test di pompaggio per stabilire la connessione tra pozzi, monitoraggio del livello piezometri statico per definire il gradiente	?	Sapienza	ENOS
Campioni di acqua di falda	Campioni verranno prelevati da tutti i pozzi in 2-3 occasioni a verranno analizzati	?	Sapienza	EcaNOS

Campionamento gas nel suolo / flusso di gas	Verranno prelevati campioni lungo una griglia di campionamento 2-3 volte durante l'esperimento sopra il punto di iniezione e analizzati	?	Sapienza	ENOS
Analisi dello stress in situ	Analisi dello stress in situ mediante analisi del core	?	Sapienza, Sotacarbo	Sotacarbo
Modello geomeccanico	Modellazione al computer del campo di stress	?	Sapienza	Sotacarbo
Logs stratigrafici e campionamento in pozzo	Descrizione in situ, report fotografico, test vari, logs in pozzo e ulteriori campionamenti del core	?	Sapienza, OGS, BRGM	ENOS
Analisi mineralogica e geotecnica el core	Analisi di laboratorio e test	?	Sapienza, BRGM	ENOS

Tabella 4. Sintesi dei costi approssimativi associati alla perforazione e istituto responsabile. Si noti che, poiché le stime sono basate su documenti governativi obsoleti (RAdS, 2009), e che i dettagli di ogni elemento in questi documenti non necessariamente rispondono alle esigenze del sito SFL, queste stime DEVONO essere aggiornati basandosi su gare aggiornate per una bando di gara dettagliato preparato da un ingegnere di perforazione. I valori utilizzati sono in genere superiore del 50% rispetto a quelli calcolati utilizzando RAdS, 2009, che sono simili a quello calcolato con RB, 2015.

Oggetto	Descrizione	Costi stimati	organizzazione responsabile	Provenienza dei fondi
Mobilità nel sito	Costi del personale e trasporti	1,000	Sotacarbo	Sotacarbo
piezometri profondi 9 - 12m	Carotaggio continuo	20,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	Senza carotaggio	14,000	Sotacarbo	Sotacarbo
1 - pozzo di osservazione verticale profondo 200 m con carotaggio continuo / e contenitori per carote	Tutti sedimenti – argille, sabbie con clasti	60,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	Tutto vulcanico – richiede la punta diamante	70,000	Sotacarbo	Sotacarbo
1 – pozzo di osservazione verticale di 200m deep vertical senza core	Tutti sedimenti – argille, sabbie con clasti	30,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	Tutto vulcanico – richiede la punta diamante	40,000	Sotacarbo	Sotacarbo
1 – pozzo inclinato lungo 250m con carotaggio continuo / e scatole per le carote	Tutti sedimenti – argille, sabbie con clasti	90,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	Tutto vulcanico – richiede la punta diamante	100,000	Sotacarbo	Sotacarbo
1 – pozzo inclinato lungo 50m con carotaggio continuo / e scatole per le carote	Tutti sedimenti – argille, sabbie con clasti	10,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	Tutto vulcanico – richiede la punta diamante	12,000	Sotacarbo	Sotacarbo
Manutenzione di tutti i pozzi per assicurare una buona connessione con la falda (senza inquinanti)	Rimozione del fango di perforazione, spurgo, test idraulici	?	Sotacarbo	Sotacarbo

Logs geofisici Down-hole in tutti e tre i pozzi	Log sonico, log di resistività di induzione, analisi stress in situ, caliper, imaging logs CBIL	Questo costo può essere molto alto?	Sotacarbo	Sotacarbo
Ingegnere di perforazione per progetto esecutivo e preparazione del sito di iniezione	Circa un mese di lavoro	20,000	Sapienza	ENOS
Ingegnere di perforazione, preparazione delle gare di appalto per le perforazioni	Tempo da definire – costo medio di 1000 euro al giorno	?	Sotacarbo	Sotacarbo
Ingegnere di perforazione, supervisione dei lavori in cantiere	Tempo da definire – costo medio di 1000 euro al giorno	?	Sotacarbo	Sotacarbo
Possibili costi aggiuntivi	Come altri necessità del pozzo, casing, intervalli fenestrati, cementazione e cementi del pozzo profondo, particolari procedure di cementazione degli strumenti	?	Sotacarbo	Sotacarbo

Costi stimati totali relative a Sotacarbo

Costi minimi stimati per 9 piezometri superficiali 1 pozzo di osservazione a carotaggio continuo, 1 pozzo di osservazione senza carotaggio e 1 pozzo inclinato di iniezione (escludendo possibili costi aggiuntivi e la geofisica di pozzo)	Carotaggio continuo per i pozzi superficiali, punta diamante per i pozzi profondi, carotaggio continuo per 1 pozzo verticale e uno inclinato (escludendo possibili costi aggiuntivi e la geofisica di pozzo)	265,000	Sotacarbo	Sotacarbo
---	--	---------	-----------	-----------

Tabella 5. Sintesi di varie infrastrutture del sito SFL non relative alla perforazione, tra cui una stima approssimativa dei costi (dove disponibile) e l'istituto responsabile per ogni voce e la fonte di finanziamento. Stime dei costi più accurati devono essere ottenuti per ogni voce sulla base di precise gare.

oggetto	Descrizione	Costo stimato	Organizzazione responsabile	Provenienza dei fondi
CO2	CO2 <u>gas</u> in bombole da 80kg (c. 65L a 200 bar) a c. 55 Euro / bombola, compreso trasporto - 10 t CO2 (450 canisters)	25,000	Sotacarbo	Sotacarbo
	CO2 <u>liquida</u> in una sola tank incluso l'affitto della tank e la sua ricarica - 10 t CO2	?	Sotacarbo	Sotacarbo
Preparazione del sito per lo stoccaggio di CO2	Contenitore per le bombole (e.g., QICS)	?	Sotacarbo	Sotacarbo
	Pavimento di cemento per la tank di CO2 liquida	?	Sotacarbo	Sotacarbo
recinzione	Per ragioni di sicurezza la zona intorno all'iniezione di CO2 dovrebbe essere protetta da una recinzione.	?	Sotacarbo	Sotacarbo

Sistema di iniezione	Questo sistema comprende tubature, valvole manuali e automatiche, controllo del flusso, sensori di pressione, riscaldatore per gas, computer e software di controllo tubature per il pozzo, sistema di iniezione, ecc.	?	Sotacarbo	Sotacarbo
Ufficio di campo	Acquisto o affitto di un piccolo ufficio da campo (ATCO type) equipaggiato con elettricità, internet tavoli e sedie e un magazzino	(10 x2 m con bagno 6000 euro)?	Sotacarbo	Sotacarbo
Stumenti per downhole permanenti	saranno installati Distributed Acoustic Sensors (DAS) per sismica in pozzo Potenzialmente anche altri strumenti.	?	OGS, Silixa	ENOS
Sensori per l'analisi del soil gas	Fino a 50 stazioni saranno installate a circa 1 metro di profondità, 10 cm di diametro in pozzetti fatti a mano	?	Sapienza	ENOS
Stazione meteorologica	Per monitorare le condizioni meteorologiche e raccogliere dati per l'interpretazione dei dati dei gas nel suolo.	?	Sapienza	ENOS

3.5 Possibili scenari di iniezione e migrazione durante l'esperimento(i) SFL

Mentre la presenza di una faglia nel bedrock nell'area del Sulcis è stata riconosciuta mediante il recente rilievo sismico eseguito da OGS, le sue caratteristiche idrodinamiche (ad esempio la sua capacità di sostenere migrazione e iniezione di CO₂) non saranno note fino a quando non verranno eseguiti i pozzi. Ed anche in questo caso, questa sarà attraversata in solo uno o due punti lungo la sua lunghezza e quindi è piuttosto complicato prevedere l'eventuale quantità e il comportamento della CO₂ iniettata. Come illustrato schematicamente nella Figura 30 ci sono 5 potenziali situazioni limite possibili, che dipendono dalla permeabilità dell'orizzonte in cui si inietta e dalla permeabilità della faglia lungo la sua intera lunghezza fino alla superficie. Queste due caratteristiche controlleranno quanto rapidamente (e quanta) CO₂ può essere iniettata nella faglia (quindi la sua iniettività) e se migrerà tutta verso l'atmosfera o ancora se tutta o una porzione rimarrà in qualche livello nel sottosuolo. Questo ultimo punto è particolarmente importante per capire che tipo di monitoraggio può essere in grado di osservare (e di quantificare) il gas iniettato che fuoriesce, includendo tra questi metodi la geofisica profonda, l'analisi della falda e la misura di gas nel suolo in superficie.

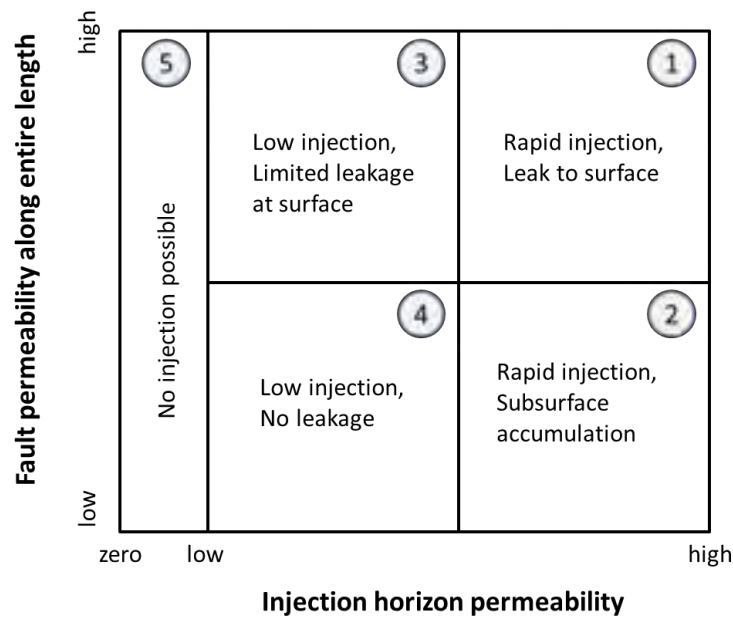


Figure 17. schema dove sono indicate le cinque situazioni limite per il test di iniezione del Sulcis Fault Lab, basate sulla iniettabilità e permeabilità lungo la faglia e l’emissione dalla superficie. Leggere il testo per una ulteriore descrizione.

I cinque casi limite sono discussi di seguito. Ci si aspetta che la reale situazione che si verificherà durante l’esperimento può essere considerata una via di mezzo tra due o tre di questi casi limite. Queste situazioni limite sono inoltre da considerare valide sia entrambe le profondità di iniezione considerate, sebbene i rischi e le difficoltà aumentano con la profondità a causa di una maggiore compattazione dei terreni (maggiore carico litostatico), un percorso più lungo di risalita della CO₂ attraverso anisotropie maggiori e maggiori possibilità di variazione delle caratteristiche idrodinamiche della zona di faglia. Detto questo, è anche possibile che un pozzo più profondo in rocce vulcaniche fratturate possa essere più permeabile di un pozzo più superficiale in sedimenti plastici.

Questi casi illustrano quanto sarà complicato lo sviluppo del sito e che c’è un rischio potenziale di non riuscire ad ottenere i risultati sperimentali attesi usando i pozzi profondi. A questo riguardo, altri pozzi più superficiali saranno necessari come seconda scelta per consentire ai ricercatori di eseguire la fase di monitoraggio prevista per il progetto ENOS e nei progetti futuri.

3.5.1 *Caso 1 – Tasso di iniezione da moderato ad alto – emissioni in superficie da moderata ad alta.*

Questo caso limite prevede che la faglia sia permeabile lungo tutta la sua estensione verticale dall’orizzonte di iniezione alla superficie. Questo permetterebbe al gas di essere iniettato ad una pressione solo poco superiore al valore idrostatico e di migrare verso la superficie seguendo un percorso piuttosto regolare. In questo caso le emissioni al suolo sarebbero localizzate direttamente sopra il punto di iniezione lungo il piano di faglia, e il gas potrebbe potenzialmente anche migrare lateralmente lungo la faglia seguendo “canali” più permeabili.

Se la faglia è molto permeabile c'è anche la possibilità di accumuli di gas lungo i percorsi di risalita favorendo un forte segnale per il monitoraggio geochimico mentre per i metodi geofisici si creerebbe un'anomalia relativamente ridotta. Se invece la faglia è moderatamente permeabile una minore ma significativa quantità di CO₂ può raggiungere la superficie, ma una parte del gas iniettato può migrare lungo eventuali orizzonti sedimentari a permeabilità maggiore che sono tagliati dalla faglia stessa. In questo caso accumuli secondari di gas in questi strati possono costituire un più grande e significativo target per il monitoraggio geofisico (specialmente se il volume di gas aumenta mentre si muove verso l'alto verso zone a pressione progressivamente più bassa). In questo caso si può avere anche un maggiore impatto sulla geochimica delle acque di falda nelle quali la CO₂ si è accumulata e la possibilità di intercettare l'anomalia sarà in funzione della profondità del piezometri stessi.

3.5.2 Caso 2 – Tasso di iniezione da moderato ad alto – emissioni in superficie da basse a nulle.

Questo caso comprende una permeabilità da alta a moderata in profondità, in modo di permettere l'iniezione del gas ad un tasso da alto a moderato e una faglia con una permeabilità che si riduce verso l'alto al punto da impedire e fermare la migrazione. Un esempio potrebbe essere costituito da una faglia sepolta come una faglia che taglia i depositi vulcanici ma che è poi coperta da depositi orizzontali composti da sabbia e argilla che causano un sealing verticale. Un altro esempio potrebbe essere una zona di faglia che passa verso in una sequenza litologica che cambia le proprietà della faglia stessa da *conduit* a *barrier*.

In questo caso sarebbe necessario iniettare una quantità ragionevole di CO₂, ma una volta incontrata la barriera alla migrazione verticale lo stesso gas potrebbe muoversi lateralmente in orizzonti porosi come per esempio sabbie e ghiaie. Questi grandi volumi di gas in profondità potrebbero dare luogo ad una anomalia significativa per la geofisica profonda. Questo però dovrebbe essere localizzato tra i due pozzi di monitoraggio e nel piano di acquisizione della sismica 2D, nel caso si usi solo il metodo cross hole mentre potrebbe essere identificato se questa viene combinata con tecniche di rilievo anche superficiali (per esempio VSP).

Poiché gran parte del gas sarebbe intrappolato in profondità nello scenario descritto la quantità di gas che sarebbe emesso in superficie sarebbe ridotto o addirittura nullo. A seconda della quantità di gas emesso e la sua distribuzione spaziale (diffuso o concentrato), il metodo geochimico di superficie potrebbe essere poco efficiente. Per quanto riguarda il monitoraggio della falda, come per il caso precedente, il potenziale per questo metodo di osservare una anomalia dipenderà dalla profondità dell'accumulo di CO₂ in profondità rispetto alla profondità del piezometro e del pozzo di osservazione.

3.5.3 Caso 3 – Basso tasso di iniezione, basse emissioni in superficie.

In questo caso la iniezione risulta possibile, ma il tasso è basso, quindi è probabile che sia necessario aumentare la pressione di iniezione che deve essere maggiore di quella idrostatica ma deve necessariamente rimanere al di sotto di quella litostatica per garantire che le procedure

di sicurezza siano rispettate. Una volta raggiunta la faglia una migrazione verso l'alto è sempre possibile. Un esempio di questo caso potrebbe essere con una faglia interamente permeabile di per sé, ma che il pozzo sia poco permeabile per ragioni di manutenzione e per procedure di drilling non idonee (per esempio presenza del fango di perforazione nel materiale iniettato, presenza di detriti nel pozzo ecc.). Sebbene in questo caso la permeabilità alta della faglia favorirebbe la migrazione verso la superficie, la bassa quantità di CO₂ iniettata probabilmente darà luogo ad un piccolo accumulo difficile da individuare con metodi geofisici. Inoltre una ridotta emissione ci avrà in superficie che potrebbe essere ulteriormente attenuata per dissoluzione, "trapping" idrodinamico o residuale lungo il percorso del flusso. Allo stesso modo la piccola quantità di CO₂ iniettata avrà un impatto minimo sulla chimica delle acque di falda anche nel caso di un acquifero correttamente monitorato.

Se si sospettasse che un pozzo maltenuto sia la causa della bassa iniettività, ci potrebbe essere la possibilità di un lavoro extra per migliorare la permeabilità nella zona circostante il pozzo e questo richiederebbe costi aggiuntivi.

3.5.4 Caso 4 – basso tasso di iniezione, nessuna emissione in superficie.

Come nel caso precedente l'iniezione è possibile ma i tassi sono bassi; questo richiede un aumento delle pressioni sempre al di sotto del valore litostatico. Differente è la mancanza di permeabilità lungo la faglia stessa. In questo caso la CO₂ iniettata non ha la possibilità di migrare verso la superficie e la piccola quantità di CO rimane accumulate in profondità. Non ci saranno anomalie in superficie e le anomalie saranno anche troppo piccole in profondità per essere individuate dalle indagini geofisiche.

3.5.5 Caso 5 – L'iniezione non è possibile

In questo che è il caso peggiore l'orizzonte in cui si iniettività ha una permeabilità così bassa che non è possibile l'iniezione anche aumentando le pressioni fino a valori accettabili per la sicurezza (fino ai valori litostatici). In questo caso questo pozzo non potrà essere usato per l'iniezione (anche può sempre essere utilizzato come pozzo esplorativo) e il progetto deve passare ad una seconda opzione (pozzo più superficiale) che invece garantisce di poter procedere con l'esperimento.

4 RIEPILOGO DELL'ESPERIMENTO SFL

4.1 Riepilogo del sito

Posizione. In base ai risultati dell'interpretazione della sismica profonda è stata individuata una faglia ben visibile con un rigetto di circa 40 metri. Il sito si trova nella parte settentrionale del paese di Matzaccara, nella Sardegna sudoccidentale.

Assetto strutturale La faglia oggetto dell'esperimento di iniezione nell'ambito del progetto ENOS è situata a Nord rispetto all'abitato di Matzaccara. Essa è stata individuata mediante l'interpretazione delle linee sismiche ad alta risoluzione HR1 e HR2 acquisite da OGS ed è stata ricostruita in un modello 3D a cura dei ricercatori del gruppo della Sapienza di Roma, mediante interpolazione con alcuni profili geologici costruiti in base ai dati geologici di superficie, ed in particolare con il profilo geologico n°1 (Fig. 31).



Figura 31 Mappa dell'area di interesse. La faglia oggetto di studio è evidenziata in giallo.

La faglia principale ha una direzione NNE-SSW (100/68) e una lunghezza di circa 450 metri. Lateralmente, si dirama in un piano secondario, visibile nella stessa linea sismica, appartenente al medesimo sistema e avente una direzione NE-SW (130/68). Lungo la direzione la faglia presenta diversi piani vicarianti tra loro e difficili da correlare da una linea all'altra. Questo indica che probabilmente si tratta di una zona di faglia con diversi piani a rigetto variabile.

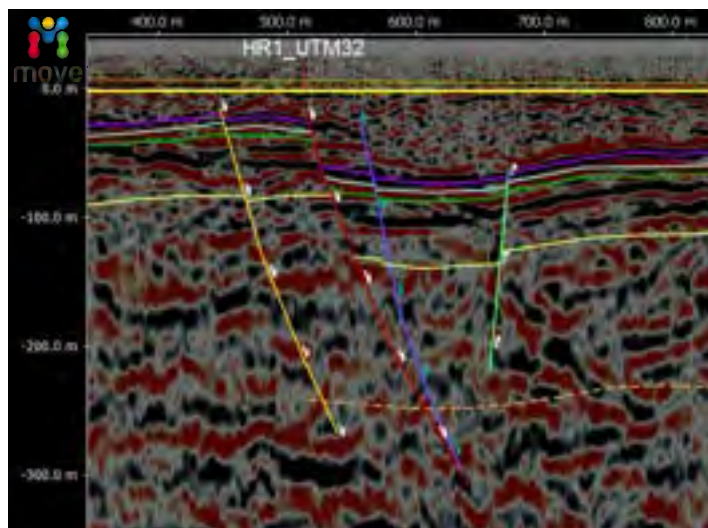


Figura 32 - Dettaglio della linea sismica HR1. In rosso la faglia principale, in blu il piano secondario.

In figura 2 è riportato un dettaglio dell'interpretazione della sezione HR1; la faglia "principale" è riportata in rosso, mentre in blu vi è una faglia appartenente allo stesso sistema, ma con un rigetto inferiore. Le due faglie distano circa 50 metri l'una dall'altra, sebbene la fascia di deformazione dovuta a questo sistema sia più ampia (circa 100 m). Il primo orizzonte dislocato (qui in viola) è correlabile con le Rioliti iperalcaline di Monte Ulmus; il rigetto stimato per la faglia principale è di circa 30-40 m, mentre è di pochi metri per l'altro piano identificato.

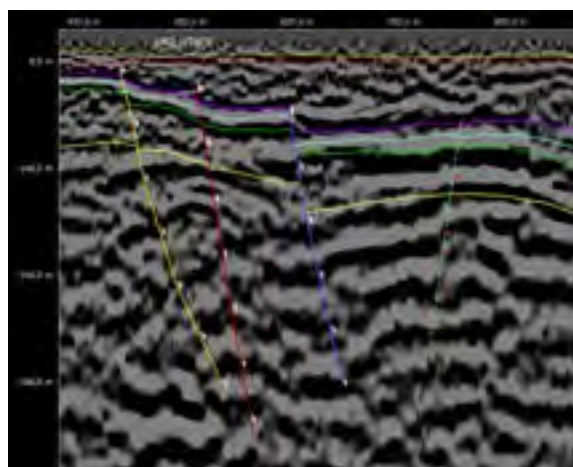


Figura 33 dettaglio della sezione sismica HR2. In rosso la faglia principale, in blu il piano secondario.

Spostandosi verso Nord, sulla linea sismica HR2, sono evidenti le variazioni di rigetto di entrambe le faglie, che tendono quasi ad annullarsi. Infatti, qui il rigetto maggiore si ha in corrispondenza della faglia secondaria (circa 20 metri), mentre la faglia principale ha un rigetto pressoché nullo, se si esclude un leggero piegamento degli strati che potrebbe rappresentare un accomodamento del movimento distensivo.

Sviluppo del sito. Per assicurare il successo dell'esperimento e raggiungere i risultati scientifici richiesti è fortemente raccomandato il coinvolgimento di un ingegnere di perforazione per aiutare nella progettazione dei diversi aspetti tecnici che riguardano i pozzi e il sistema di iniezione e per seguire lo sviluppo delle diverse fasi.

Pozzi. Tre tipi di pozzi saranno effettuati nel sito: iniezione, osservazione e piezometri. La proposta distribuzione di questi pozzi (a seconda dell'accesso) è presentata in figura 34, mentre alcuni dei parametri che dovranno essere definiti (e alcune potenziali opzioni sono presentate in Tabella 10. Le seguenti osservazioni possono essere fatte circa questi pozzi:

- I pozzi di iniezione devono essere resi impermeabili per evitare perdite di gas lungo il pozzo e il cemento deve essere resistente alla corrosione indotta dalla CO₂. Da notare che il secondo pozzo superficiale di iniezione è opzionale e dovrebbe essere perforato solo se il pozzo profondo non avrà le caratteristiche necessarie per l'iniezione.
- I due pozzi di osservazione saranno equipaggiati con strumenti geofisici, alcuni cementati in modo permanente nel pozzo tra il casing e il pozzo stesso e altri temporaneamente introdotti nel pozzo. La decisione finale riguardo questi strumenti determinerà il diametro del pozzo e del casing e il materiale del casing.
- I piezometri saranno usati per monitorare la falda superficiale. Due piezometri saranno più grandi per permettere di equipaggiarli con sensori di monitoraggio in continuo.

Table 6. sommario delle caratteristiche dei pozzi, con potenziali valori (da discutere e definire)

Tipo di pozzo	pozzo	Lunghezza max (m)	profondità (m)	Inclinato/ verticale	Diametro del pozzo (mm)	Core / cuttings	Diametro del casing (mm)	materiale del Casing	Materiale per sigillare
Iniezione	Primario	250	175	Inclinato 45°	100?	core	60?	acciaio?	cemento
	Optional	50	35	Inclinato 45°	100?	core	60?	acciaio?	Cemento
Osservazione	Sorgente	250	250	verticale	100?	core	60?	plastica?	cemento
	Ricevitori	200	200	verticale	100?	cuttings	60?	plastica?	cemento
piezometri	7 pozzi	15	15	verticale	85?	cuttings	50?	PVC	bentonite
	2 pozzi	15	15	verticale	200?	core	150?	PVC	bentonite

Poiché le caratteristiche definitive non sono ancora state stabilite (i parametri nella tabella 10 e altri) ne sono stati richiesti preventivi, è difficile definire i costi totali delle perforazioni, dello sviluppo del sito e della preparazione dei pozzi richiesto per il SFL. considerando tutti questi aspetti, il presente studio ha usato le liste dei prezzi utilizzati da organi statali per fare un preventivo stimato intorno ai 260.000 euro (vedi sezione 3.3), anche se bisogna insistere sul fatto che tali valori potrebbero variare sensibilmente.

Sensori di CO₂ nel suolo. Una infrastruttura non permanente posizionata al disotto della superficie comprende i 50 sensori di CO₂ che misurano in continuo la concentrazione di CO₂ nel suolo con lo scopo di monitorare eventuali emissioni anomale di CO₂. Queste unità, molto

piccole (5X10cm), verranno posizionate ad una profondità di circa 80 cm dalla superficie in pozzetti di 10 cm di diametro e verranno completamente rimosse alla fine dell'esperimento.

Infrastrutture di superficie. Nel sito dovrà essere allestito un piccolo ufficio (un monoblocco 10 metri per 2 con bagno costa circa 6000 euro) equipaggiato con elettricità, tavoli, computer e un magazzino per riporre strumenti ed equipaggiamenti. La CO₂ dovrà essere conservata nel sito sia in bombole o in taniche per CO₂ liquida, dipende dai costi e dalle esigenze logistiche. Poiché tutta la quantità di CO₂ da iniettare non può essere conservata insieme nel sito, è necessario riempire periodicamente questi contenitori. È necessaria una strada di accesso al sito per rifornire le bombole e per le macchine con un parcheggio vicino all'ufficio.

Esperimenti di iniezione di CO₂. Fino a quando non sarà perforato il pozzo di iniezione e la permeabilità della roccia alla profondità prevista per l'iniezione non sarà definita, è impossibile stimare il tasso di iniezione che sarà adottato e la quantità di CO₂ da iniettare (vedi sezione 3.4). Detto questo, i costi possono essere stimati considerando un obiettivo preliminare di iniezione di 10 t di CO₂, accompagnato dalla discussione di tutti gli aspetti necessari in sezione 3.2.4 (sistema di spedizione del gas).

Tenendo presente che una massa di CO₂ equivalente occuperà progressivamente un volume minore all'aumentare della profondità (cioè all'incremento di pressione), come illustrato in figura 28, e che il volume di gas sottoposto alle condizioni del sito controllerà la sua penetrazione nello spazio di poro e lo spostamento dell'acqua, è possibile prendere un tasso di iniezione superficiale plausibile e estrapolarlo alla profondità prevista per il SFL basandosi sul fatto che la permeabilità nel sito del SFL non sarà così alta come in alcuni siti dove erano presenti ghiaie e sabbie sotto consolidate (e.g., CO₂FieldLab, Maguelone), un tasso minore di quello utilizzato a Wittstock può essere considerato un punto di riferimento. Assumendo che nell'esperimento SFL si utilizzi lo stesso tasso di iniezione usato a Wittstock (43m³/giorno), l'equivalente tasso di iniezione alla profondità pianificata di 175 m (con una pressione in sito di 17,5 gaugebar) sarà uguale a poco più di 500 kg / giorno (figure 27°, linea verde). Se si considera l'intero ammontare di 10 tonnellate di CO₂, il periodo totale sarà di almeno 20 giorni a questo massimo tasso di iniezione. Quindi il periodo di iniezione può essere stimato in modo conservativo tra le 2 e le 4 settimane ad un tasso di 500 kg CO₂/giorno, per un totale di 10 tonnellate. Inoltre si stima che il tempo di durata di tutto l'esperimento sarà tra gli 8 e i 12 mesi, incluso l'allestimento del sito, la definizione della baseline seguendo le fasi di definizione della baseline, dell'iniezioni e post iniezione.

4.2 Contesto of the SFL esperimento

Confronto con siti di emissioni naturali di CO₂. La CO₂ è prodotta naturalmente da processi biologici e geologici con grandi quantità che sono trasportate dai suoli nell'atmosfera ogni giorno. La produzione biologica di CO₂, attraverso i microbi e la traspirazione delle radici nei suoli tende ad aver valori di flusso molto bassi sebbene il suo flusso verso l'atmosfera (da 1 a 50 g / m² d) è diffuso su tutta la superficie e risulta un grande quantità di CO₂. D'altra parte la CO₂ può provenire da processi geologici di degassamento dei magmi o dal processo metamorfico di alterazione delle stesse rocce. La CO₂ può migrare fino alla superficie lungo le faglie. Le emissioni di questa CO₂ di origine geologica tende ad avere valori alti di tasso di emissione (da 50 a >10,000 g / m² d) in zone limitate note come gas vents. In Italia centrale l'emissione di grandi quantità di CO₂ sono comuni (Chiodini et al., 2004), e sono messe in relazione con l'attività vulcanica, alti gradienti geotermici, magmi quiescenti e rocce fagliate e fratturate. Un paragone di queste emissioni naturali di CO₂ con l'emissione di 10 t e tasso di circa 550 kg/day pianificati per il SFL aiuta a contestualizzare meglio questo aspetto.

Per esempio un sito che è stato studiato in gran dettaglio è la caldera di Latera, che si trova nel Lazio appena a ovest del Lago di Bolsena. Le stime della quantità totale di CO₂ geogenica che ha raggiunto l'atmosfera all'interno della caldera può variare notevolmente, a seconda di come si separano i contributi biologici e geologici, tuttavia i valori sono comunque molto grandi. Per esempio Annunziatellis et al. (2007) hanno stimato 22 t CO₂ / giorno sulla base del presupposto che la perdita fosse localizzato in gas vent con alte zone di flusso, mentre Chiodini et al. (2007) stimano 350 t CO₂ / giorno in base a una perdita più diffuso. Partendo dal presupposto che il vero valore si trova tra queste due stime (ad esempio, 100 t CO₂ / giorno), la caldera di Latera emette 10 volte più CO₂ in un giorno che quanto sia previsto iniettare per l'intero esperimento SFL. In una scala che è più equivalente al sito sperimentale, un'indagine dettagliata di un singolo, 6 m di sfiato media larga gas nella caldera di Latera ha definito un tasso di perdita di CO₂ geogenica di circa 220 kg / die (Beaubien et al., 2008), un tasso che è un ordine di grandezza (circa la metà) della velocità di iniezione proposto per l'esperimento SFL.

Potenziati impatti. Come discusso sopra nella sezione 3.4, ci sono cinque scenari principali per come l'esperimento SFL può evolvere, da un estremo in cui la CO₂ non può essere iniettata a causa di una bassissima permeabilità dell'orizzonte di iniezione, a tassi potenzialmente elevati di iniezione e di dispersione verso la superficie. Se una percentuale considerevole della CO₂ iniettata migra verso la superficie ci sono due effetti principali che possono verificarsi nella zona limitata dove si verificherebbero le emissioni: il primo è un cambiamento del chimismo della falda e la seconda è una evidenza di stress per le piante (ad esempio, erba). Qualsiasi potenziale impatto non sarà una funzione della quantità totale fuoriuscita, ma piuttosto di come l'emissione è, localizzata o diffusa, e per quanto tempo dura. In altre parole, se una certa quantità di CO₂ sub-superficiali avviene in un area di 1 m² può essere grande abbastanza per avere un impatto, mentre se la stessa quantità avviene in oltre 10 m², la concentrazione sarà ridotta di un decimo in ogni punto e non ci sarà probabilmente alcun impatto. Inoltre,

l'impatto sparisce rapidamente una volta che l'emissione si ferma. Anche se oltre la portata di questo rapporto, possono essere fatte alcune osservazioni generali riguardo gli impatti su eventuali acque sotterranee e sulla salute delle piante.

Per quanto riguarda il primo, numerosi studi hanno esaminato come l'acido debole creato dalla dissoluzione di CO₂ può reagire con le rocce, sedimenti, e minerali di una falda acquifera sotterranea e, successivamente, causare eventuali modifiche della chimica delle acque sotterranee. I risultati di tali studi (tra cui esperimenti di laboratorio, campagne di prospezione e modelli di computer) sono stati riassunti in numerosi articoli di revisione recenti (ad esempio, Lions et al, 2014; Jones et al 2015). Questa ricerca ha dimostrato che impatto sulla qualità delle acque sotterranee di una quantità relativamente piccola di CO₂, sarà piccolo, spazialmente ristretto, e scomparire nel tempo.

Per quanto riguarda il secondo, alte concentrazioni di CO₂ nel suolo sono noti per influenzare la salute delle piante, soprattutto a causa dello spostamento di ossigeno piuttosto che gli effetti tossici di CO₂. Anche in questo caso numerosi studi sono stati condotti su questo tema, come riassunto in articoli di revisione recenti (ad esempio Jones et al., 2015; West et al., 2015). Questi studi hanno dimostrato che la emissione di una quantità di CO₂ come quella da iniettare non avrà alcun effetto sui grandi piante (ad esempio, alberi) ma potrebbero avere un effetto temporaneo su piante più piccole (ad esempio graminacee, colture), specie se la perdita è concentrata in un piccolo area. Tale impatto su piccole piante si manifesta come un ingiallimento e l'essiccazione delle foglie, tuttavia una volta che l'emissione di CO₂ si ferma le concentrazioni nel suolo ritornano rapidamente ai valori normali e le piante recuperano (ad esempio, Smith et al., 2013; Smith et al., 2016).

A conclusione delle osservazioni qui riportate, è ragionevole affermare che l'esperimento non ha nessun impatto sulla salute delle persone e dell'ambiente circostante, in quanto le quantità di CO₂ che verranno iniettate sono nell'ordine di grandezza di quelle emesse naturalmente in diversi siti naturali del territorio italiano. Inoltre, l'esperimento verrà condotto con pressioni e condizioni tali da non comportare nessun problema dal punto di vista della sicurezza per le persone e per le strutture che si trovano nell'area. Eventuali emissioni anomale (comunque al di sotto delle soglie di pericolosità per l'uomo) legate all'esperimento saranno oggetto della sperimentazione e del monitoraggio descritto nel paragrafo seguente.

Monitoraggio per la sicurezza. Durante l'esperimento, nell'ambito del progetto ENOS, monitoraggio estensivo avrà luogo per determinare se CO₂ sta perdendo e per garantire la sicurezza del lavoro. Per cominciare, metodi geofisici saranno utilizzati per valutare se il CO₂ iniettata in profondità si sta muovendo verso la superficie. Per far fronte a qualsiasi potenziale impatto sulla qualità delle acque sotterranee, nove piezometri saranno installate per monitorare la composizione chimica ad una profondità di circa 10 m. Due di questi saranno dotati di sensori che misureranno concentrazioni di CO₂ disciolta ogni 10 minuti, mentre tutti i piezometri saranno campionate in modo intermittente su base regolare per determinare il pH e le concentrazioni maggiori e in traccia. Per quanto riguarda la CO₂ nel suolo che possono

influire sulla salute delle piante, fino a 50 sensori saranno posizionati ad una profondità di circa 80 cm e misureranno le concentrazioni di CO₂ nel terreno una volta ogni ora. Campioni saranno raccolti manualmente usando sonde in acciaio inserite ad una profondità simile, in punti tra i sensori per migliorare la risoluzione spaziale; misurazioni di flusso CO₂ superficiali saranno effettuati allo stesso tempo e posizione. Infine uno strumento innovativo che misura le concentrazioni di CO₂ presso la superficie del terreno ad altissima risoluzione spaziale (circa una volta ogni metro) sarà utilizzata per mappare la zona per cercare possibili punti di perdita.

Esperienza. Il Laboratorio di Tettonica e chimica dei fluidi (TFCL) da La Sapienza di Roma è il partner nell'ambito del progetto ENOS che farà il monitoraggio geochimico (cioè le acque sotterranee, il gas nel suolo, e la chimica di flusso). Questo gruppo ha oltre 30 anni di esperienza nello studio di emissioni di CO₂ naturale (ad esempio, Beaubien et al., 2008; Annunziatellis et al., 2008; Bigi et al., 2013). Ed è stato coinvolto in numerosi progetti con esperimenti di iniezione di CO₂ in Italia (Ciotoli et al., 2005; Annunziatellis et al., 2006) presso il sito ASGARD nel Regno Unito (Smith et al., 2013), e nel sito CO₂FieldLab in Norvegia (Jones et al 2014). In particolare, il test di iniezione della CO₂ a 10-20 m di Siena e Latera (di cui sopra) sono state organizzate dalla TFCL entro due diversi progetti finanziati dalla Comunità Europea. Questo dimostra che tale lavoro è stato riconosciuto dalla CE a fornire importanti dati scientifici, che gli esperimenti sono stati espletati in modo sicuro e con successo, e che il gruppo da La Sapienza ha l'esperienza necessaria per assistere Sotacarbo nella progettazione, l'esecuzione e il monitoraggio della iniezione di CO₂ al Sulcis Fault Lab. Per illustrare questo, i risultati pubblicati dell'esperimento Siena (Ciotoli et al., 2005) sono inclusi nell'Appendice 3.

Appendice 1

Pagine selezionate dal “Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici” della Regione autonoma Sardegna (2009) usate per la stima preliminare dei costi di perforazione.

Appendice 2

Pagien selezionate della della “Tariffa unificata di riferimento dei prezzi per l’esecuzione di opere pubbliche” della regione Basilicata (2015) usate per la stima preliminare dei costi di perforazione.

Appendice 3

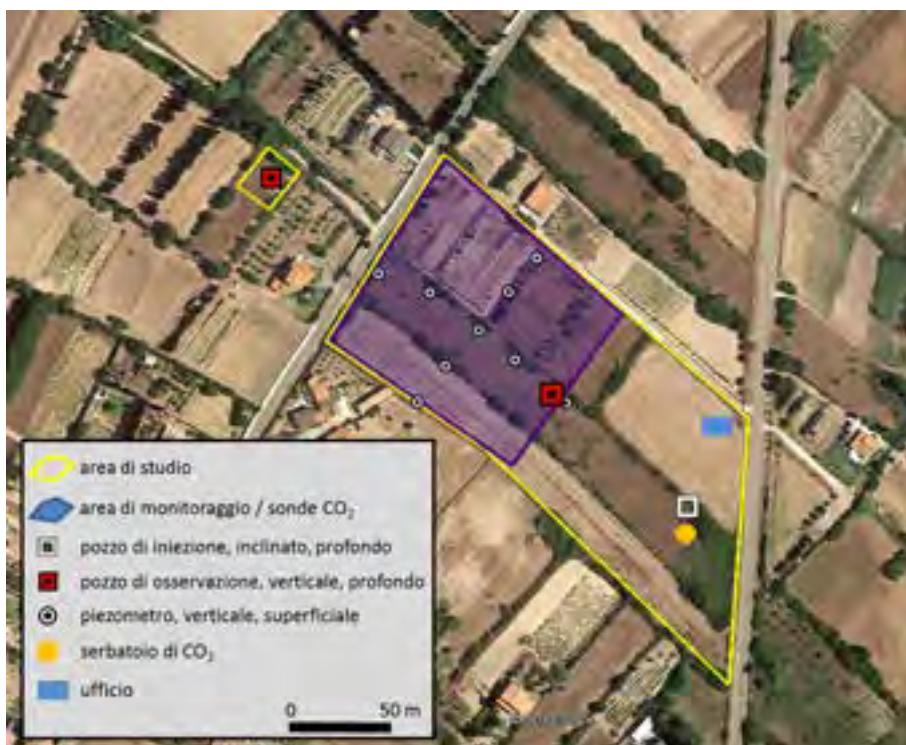
Selected publications

Appendice 4

Schema della zona proposta per il SFL e posizionamento delle strutture previste.



Posizione proposta per il sito del Sulcis Fault Lab.



Dettaglio del sito proposto per il Sulcis Fault Lab.