



Ricerca di Sistema elettrico

## Acquisizione e interpretazione dei dati provenienti da sonde precedentemente installate per la determinazione del contenuto della CO<sub>2</sub>

A. Plaisant, V. Anardu  
S.E. Beaubien, M.-C. Tartarello, S. Graziani, L. Ruggiero, S. Bigi, S. Lombardi,

## AQUISIZIONE E INTERPRETAZIONE DEI DATI PROVENIENTI DA SONDE PRECEDENTEMENTE INSTALLATE PER LA DETERMINAZIONE DEL CONTENUTO DI CO<sub>2</sub>

A. Plaisant, V. Anardu (Sotacarbo S.p.A.)

S.E. Beaubien, M.-C. Tartarello, S. Graziani, L. Ruggiero, S. Bigi, S. Lombardi (Università La Sapienza, CERI)

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 CO<sub>2</sub>

Task 4: Verifica e gestione di sonde precedentemente installate per la determinazione del contenuto della CO<sub>2</sub> con le quali sperimentare i sistemi di trasmissione dati in continuo

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 MSE-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 CO<sub>2</sub>" e riguarda l'attività del task 4 "Verifica e gestione di sonde precedentemente installate per la determinazione della CO<sub>2</sub> con le quali sperimentare i sistemi di trasmissione dati in continuo".

Lo studio si inquadra nella definizione delle condizioni di baseline in un area del Sulcis, già avviato diversi anni prima. Il presente rapporto tecnico descrive gli ultimi risultati di questo monitoraggio in continuo della CO<sub>2</sub> e sono state campionate ed analizzate le acque per determinarne le concentrazioni dei gas disciolti.

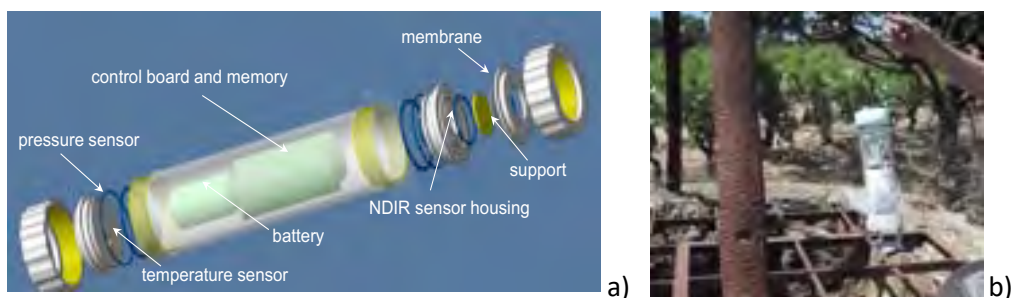
Queste informazioni sulle condizioni di baseline sono richieste per stabilire i criteri di soglia per futuri esperimenti e monitoraggi nell'ambito della ricerca sulla cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS) nell'area di studio.

## 1 Introduzione

Nell'area del Sulcis sono stati proposti diversi esperimenti relativi alla ricerca per il CCS (Cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica), comprendenti l'iniezione profonda alla scala del pilota e un'iniezione più superficiale in una faglia. Quest'ultimo, noto come Sulcis Fault Lab (SFL), si trova nella fase finale di pianificazione ed autorizzazione; una volta costruito, esso sarà utilizzato per condurre esperimenti volti a comprendere meglio i meccanismi di migrazione dei gas e a testare tecnologie di monitoraggio innovative. Durante la fase preparatoria, Sotacarbo ha affidato diversi studi di caratterizzazione dell'area a diversi istituti di ricerca e università italiane. A tal proposito, il CERI-Università Sapienza di Roma ha studiato faglie e fratture, ha costruito i modelli geologici 3D e ha fornito i dati geochimici di riferimento per l'area.

Il monitoraggio geochimico è stato focalizzato sulle misure discontinue e continue dei gas nel suolo e nelle acque sotterranee, con particolare attenzione al biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). Questi dati sono di particolare importanza dato che la CO<sub>2</sub> si trova naturalmente nel sottosuolo a causa di processi chimici e biologici, per cui è necessario comprendere la sua variabilità spaziale e temporale prima dell'inizio dell'iniezione, in modo da aiutare a distinguere le anomalie naturali da quelle che potrebbero essere causate dall'iniezione di CO<sub>2</sub>. Fino ad oggi, il CERI-Sapienza ha fornito tre rapporti tecnici che affrontano i diversi aspetti del monitoraggio geochimico: Bigi et al. (2015) descrive la distribuzione dei gas nella zona non satura del terreno; Beaubien et al. (2016) descrive il campionamento manuale discontinuo di oltre 45 pozzetti nell'area per la determinazione di CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> disciolti, nonché i risultati preliminari del monitoraggio continuo della CO<sub>2</sub> disciolta in 10 pozzetti; Beaubien et al. (2017) è un rapporto supplementare che presenta i risultati relativi a monitoraggio continuo di CO<sub>2</sub> disciolta nei 6 mesi successivi.

Il presente rapporto tecnico descrive gli ultimi risultati di questo monitoraggio in continuo e integrandoli con i nuovi dati raccolti fra aprile e settembre 2017. Questi dati sono stati raccolti mediante l'utilizzo dei sensori GasPro, sviluppati, costruiti e mantenuti dal CERI-Sapienza. Inoltre, sono riportati anche i risultati dei campioni d'acqua prelevati in marzo e giugno 2017 per l'analisi dei gas disciolti, per controllare il corretto funzionamento delle sonde. Poiché si tratta di un set di dati cumulativi, molti degli andamenti e dei processi osservati negli ultimi 6 mesi sono stati già descritti e discussi nei report precedenti. Tuttavia, siccome il periodo di monitoraggio è di circa un anno, alcuni trend stagionali delle variabili considerate sono più chiari.



**Figura 1 – (a) Schema descrittivo della sonda (da Graziani et al., 2014) e (b) installazione di un'unità in un pozzo.**

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Lo studio, condotto nel Sulcis nel 2017, è rivolto al monitoraggio continuo e discontinuo dei gas disciolti per stabilirne gli aspetti geochimici dei gas e della loro variabilità spaziale e temporale.

Questo rapporto descrive i risultati del monitoraggio in continuo dei gas disciolti di pozzi in falde nel periodo giugno 2016 – settembre 2017, condotto con lo scopo di definire la baseline nell'area del Sulcis. La baseline rappresenta una misurazione della variabilità spaziale e temporale in un sito, ed è controllata dai processi chimici, biologici e idrogeologici che avvengono sia nell'acquifero, sia come interazione tra l'acquifero e il pozzo stesso. A seconda della profondità e della configurazione del pozzo, questi processi possono essere influenzati con diversa intensità dai cambiamenti stagionali (temperatura, insolazione, precipitazioni).

Oltre al monitoraggio continuo descritto sopra, le funzionalità del sistema di sensori GasPro sono state ampliate per includere la trasmissione wireless dei dati a un server centrale situato presso l'Università di Roma per il monitoraggio in tempo reale dei sensori installati. Ciò consente ai tecnici responsabili del corretto funzionamento delle sonde di garantire oltre all'interpretazione dei dati prodotti un intervento tempestivo, sia per problemi di manutenzione come il cambio delle batterie esaurite, sia problemi logistici come atti di vandalismo o furto (come è avvenuto sul sito del Sulcis in passato) e sia per ulteriori misurazioni legate ad anomalie osservate o trend dei dati.

I pozzi all'interno dei quali sono state installate le sonde di monitoraggio GasPro possono essere suddivisi in pozzi superficiali scavati a mano e pozzi più profondi trivellati con tecniche moderne.



**Figura 2 Localizzazione dei pozzi superficiali (in giallo) e profondi (in bianco), all'interno dei quali sono installate le sonde di monitoraggio GasPro.**

I risultati mostrano due trend differenti, associabili alla tipologia di pozzo considerata. Infatti, i pozzi profondi mostrano una temperatura molto stabile nel tempo, indicando perciò un buon isolamento da effetti meteorologici, come ad esempio il riscaldamento superficiale. Viceversa, i pozzi superficiali mostrano un aumento continuo della temperatura e della pCO<sub>2</sub> nei caldi mesi estivi, a cui segue una diminuzione durante l'autunno e l'inverno. Questa relazione implica una forte influenza degli effetti superficiali, con un riscaldamento continuo in estate, che può favorire la produzione di CO<sub>2</sub> mediante respirazione microbica e reazioni chimiche, sia nel pozzo stesso, sia nell'acquifero non confinato.

Per quanto riguarda la  $pCO_2$ , due di questi pozzi profondi hanno valori simili nell'ordine di 1-2%, mentre un altro mostra valori molto più bassi, tipici di acqua all'equilibrio con l'aria atmosferica. Gli andamenti della  $pCO_2$  sono mostrati nei grafici seguenti.

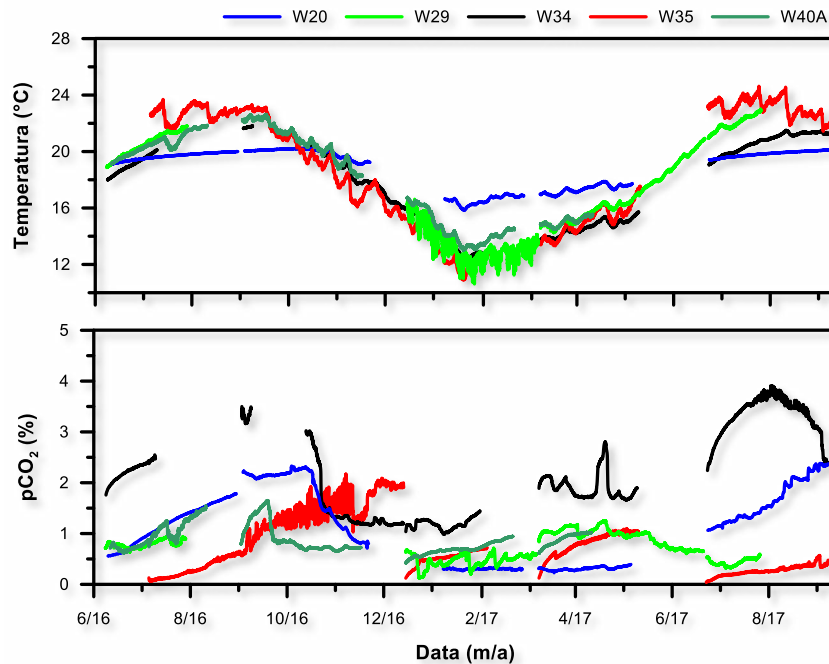


Figura 3 Confronto degli andamenti di temperatura (sopra) e  $pCO_2$  (sotto) nei pozzi superficiali

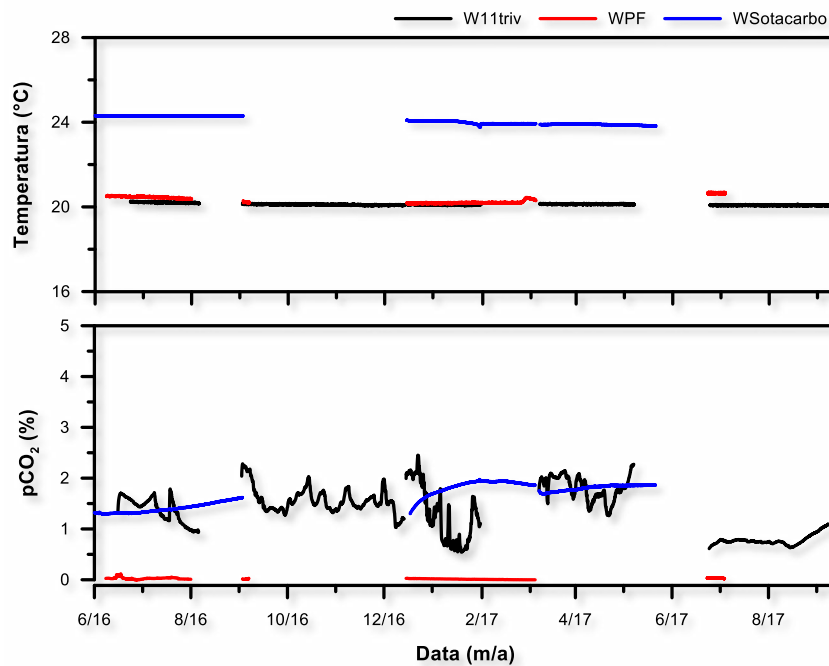


Figura 4 Confronto tra gli andamenti di temperatura (sopra) e  $pCO_2$  (sotto) nei pozzi profondi

Di seguito sono riportati anche i risultati dei campioni d'acqua prelevati in marzo e giugno 2017 per l'analisi dei gas disciolti, per controllare il corretto funzionamento delle sonde.

Pozzo	Marzo, 2017 (ml/l)				Giugno, 2017 (ml/l)			
	CH4	CO2	O2	N2	CH4	CO2	O2	N2
2	5.6E-05	12.2	5.1	19.6				
20	4.3E-04	2.6	8.6	17.4	3.8E-03	10.0	8.7	19.4
21	5.3E-04	5.1	7.5	19.0	5.0E-04	6.9	8.1	20.4
29	4.0E-05	11.3	7.8	21.7	9.0E-05	8.6	7.3	18.3
34	1.2E-04	14.7	6.5	19.1	1.4E-03	26.1	6.3	18.8
35	9.3E-05	1.0	9.9	18.3	2.9E-03	0.8	9.6	17.9
40A	1.4E-04	12.0	6.5	19.4				
43	2.3E-05	6.3	3.5	13.4				
Sotacarbo	2.5E-04	9.5	7.6	21.8	6.7E-04	13.0	7.3	17.4
11TR	8.8E-03	21.2	6.3	23.3	5.3E-03	20.1	5.5	18.7
PF	1.3E-04	0.3	7.7	20.1	1.1E-04	0.3	7.7	17.7

Tabella 1. Concentrazioni dei gas disciolti.

### 3 Allegati



Monitoraggio in continuo di CO<sub>2</sub> disciolta e temperatura nelle falde acquifere nell'area del Sulcis (2017) e sperimentazione di sistemi di trasmissione dei dati in tempo reale.

*S.E. Beaubien, S. Graziani, L. Ruggiero, M.-C. Tartarello, S. Lombardi, S. Bigi  
Centro di ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici - CERI*

## Tabella dei contenuti

<b>1</b>	<b>Introduzione .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descrizione del sito .....</b>	<b>4</b>
2.1	Geologia .....	4
2.2	Idrogeologia .....	5
2.3	Pozzi .....	5
<b>3</b>	<b>Metodi .....</b>	<b>6</b>
3.1	Monitoraggio discontinuo dei gas disciolti .....	6
3.2	Monitoraggio in continuo di CO <sub>2</sub> disciolto .....	7
<b>4</b>	<b>Risultati – GasPro manutenzione e interpretazione dati .....</b>	<b>8</b>
4.1	Analisi dei gas disciolti .....	8
4.2	Sonde per il monitoraggio in continuo – nuovi dati .....	8
4.3	Discussioni dei dati .....	16
<b>5</b>	<b>Risultati – Sviluppo di un sistema di trasmissione dei dati in tempo reale .....</b>	<b>19</b>
5.1	Overview .....	19
5.2	Probes .....	20
5.3	Firmware .....	21
5.4	Trasferimento ed archiviazione dei dati .....	21
<b>6</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>24</b>

## 1 INTRODUZIONE

Nell'area del Sulcis sono stati proposti diversi esperimenti relativi alla ricerca per il CCS (Cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica), comprendenti l'iniezione profonda alla scala del pilota e un'iniezione più superficiale in una faglia. Quest'ultimo, noto come Sulcis Fault Lab (SFL), si trova nella fase finale di pianificazione ed autorizzazione; una volta costruito, esso sarà utilizzato per condurre esperimenti nell'ambito del progetto europeo ENOS, volti a comprendere meglio i meccanismi di migrazione dei gas e a testare tecnologie di monitoraggio innovative. Durante la fase preparatoria, Sotacarbo ha affidato diversi studi di caratterizzazione dell'area a diversi istituti di ricerca e Università italiane. A tal proposito, il CERI-Università Sapienza di Roma ha studiato faglie e fratture, ha costruito i modelli geologici 3D e ha fornito i dati geochimici di riferimento per l'area.

Il monitoraggio geochimico è stato focalizzato sulle misure discontinue e continue dei gas nel suolo e nelle acque sotterranee, con particolare attenzione al biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>). Questi dati sono di particolare importanza dato che la CO<sub>2</sub> si trova naturalmente nel sottosuolo a causa di processi chimici e biologici, per cui è necessario comprendere la sua variabilità spaziale e temporale prima dell'inizio dell'iniezione, in modo da aiutare a distinguere le anomalie naturali da quelle che potrebbero essere causate dall'iniezione di CO<sub>2</sub>. Fino ad oggi, il CERI-Sapienza ha fornito tre rapporti tecnici che affrontano i diversi aspetti del monitoraggio geochimico: Bigi et al. (2015) descrive la distribuzione dei gas nella zona non satura del terreno; Beaubien et al. (2016) descrive il campionamento manuale discontinuo di oltre 45 pozzetti nell'area per la determinazione di CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> disciolti, nonché i risultati preliminari del monitoraggio continuo della CO<sub>2</sub> disciolta in 10 pozzetti usando i sensori GasPro (sviluppati, costruiti e mantenuti dal CERI-Sapienza); Beaubien et al. (2017) è un rapporto supplementare che presenta i risultati relativi a monitoraggio continuo di CO<sub>2</sub> disciolta nei 6 mesi successivi.

Il presente rapporto tecnico descrive due ricerche di tipo diverso condotte nel 2017 dal CERI-Sapienza per conto di Sotacarbo. La prima riguarda la manutenzione delle sonde GasPro precedentemente installate, insieme al download e interpretazione dei dati. In questo rapporto presentiamo gli ultimi risultati di questo monitoraggio in continuo e integrandoli con i nuovi dati raccolti fra aprile e settembre 2017. Inoltre, sono riportati anche i risultati dei campioni d'acqua prelevati in marzo e giugno 2017 per l'analisi dei CO<sub>2</sub> disciolti, per controllare il corretto funzionamento delle sonde. Poiché si tratta di un set di dati cumulativi, molti degli andamenti e dei processi osservati negli ultimi 6 mesi sono stati già descritti e discussi nei report precedenti. Tuttavia, siccome il periodo di monitoraggio è di circa un anno, alcuni trend stagionali delle variabili osservate risultano ora più chiari. La seconda riguarda lo sviluppo dell'hardware e del software che permette la trasmissione dei dati acquisiti dalle GasPro ad un server dell'Università "La Sapienza" per un accesso remoto quasi in tempo reale tramite un portale web. Con questo sistema è possibile accorgersi tempestivamente di eventi anomali, malfunzionamenti e stato delle batterie.

## 2 DESCRIZIONE DEL SITO

### 2.1 Geologia

La geologia dell'area di studio è mostrata in Figura 1. Le unità affioranti includono le vulcaniti mioceniche, i depositi eolici ed alluvionali pleistocenici, e i depositi quaternari (alluvioni, sabbie, depositi lacustri/palustri). In generale, l'area è compresa tra due dorsali orientate circa N-S (con quote fino a 40 m slm) e da un rilievo collinare ad est (circa 70 m slm), composti da rioliti mioceniche (in arancione sulla mappa), che delimitano una zona ribassata (0-15 m slm) riempita da sedimenti pleistocenici e recenti (rispettivamente in giallo e azzurro sulla mappa). Le quote topografiche tendono ad aumentare verso nord. Per maggiori dettagli riguardo la geologia regionale dell'area, si rimanda a Beaubien et al. (2016)

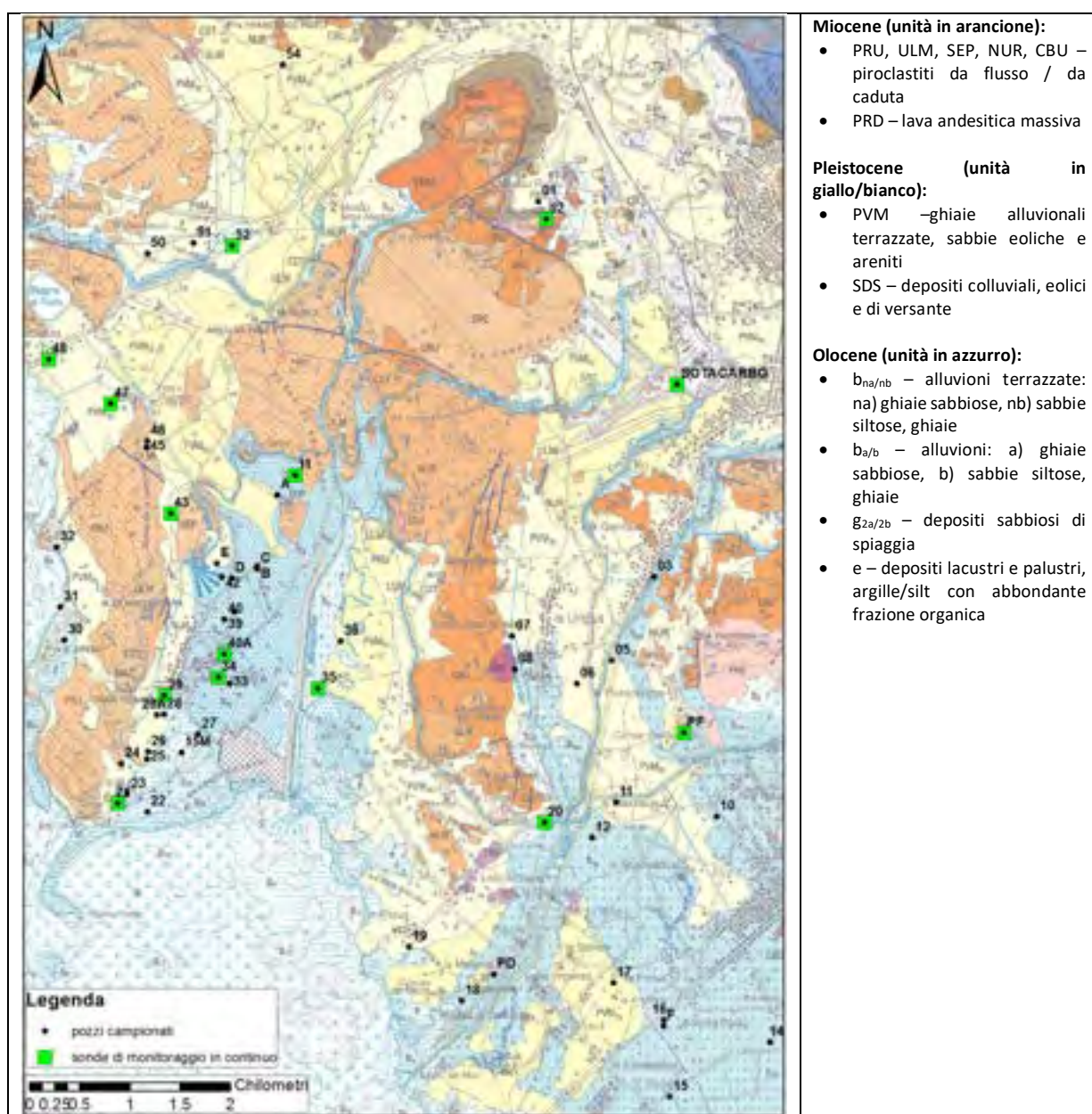


Figura 1. Stralcio della carta geologica 1:50,000 F° 564 "Carbonia" (ISPRA, 2012). Localizzazione dei punti di campionamento delle acque (punti neri) e delle sonde di monitoraggio in continuo (quadrati verdi).

## 2.2 Idrogeologia

In quest'area possono essere riconosciuti tre acquiferi principali (ISPRA, 2012): i) nei depositi alluvionali lungo le aree costiere, costituiti da sabbie argillose o depositi sabbioso-ghiaiosi di versante; ii) in rocce vulcaniche con una trasmissività relativamente bassa; e iii) nelle rocce paleozoiche, ed in particolare i carbonati del Cambriano con alta trasmissività. Nella porzione sud-occidentale dell'area di studio, dove i sedimenti olocenici riempiono la depressione esistente tra i due rilievi vulcanici, la falda superficiale non confinata ha un gradiente piezometrico con un andamento generale da nord a sud, con le curve iso-piezometriche che tendono ad essere parallele alle due dorsali che bordano la piana.

## 2.3 Pozzi

I pozzi campionati (Figura 1) sono perlopiù superficiali, probabilmente scavati a mano e con attrezzature rudimentali. Ciò significa che non si ha la possibilità di avere colonne stratigrafiche dei pozzi, né altre informazioni sulle caratteristiche tecniche di costruzione. I pozzi tendono ad essere relativamente poco profondi (spesso la profondità è inferiore a 5 m), e intercettano l'acquifero superficiale nei depositi alluvionali recenti e nei sedimenti marini. I pozzi hanno un diametro circolare di circa 2 m, con un bocca-pozzo tipicamente di cemento o di blocchetti cementati (Figura 2a); nella maggior parte dei casi il bocca-pozzo è aperto, ma in alcuni casi è coperto da grate metalliche o sportelli. Spesso i pozzi sono abbandonati e l'acqua al loro interno emana un odore sgradevole, indicante acqua stagnante che potrebbe non essere rappresentativa dell'acquifero circostante. I pozzi sono privati o di proprietà del Comune, ed è richiesto un permesso per accedervi.

Un numero limitato di pozzi campionati sono stati, invece, perforati con tecniche moderne, e perciò sono più profondi (fino a 100 m), con un bocca-pozzo stretto (Figura 2b). Facendo riferimento alla nomenclatura dei pozzi utilizzata in Figura 1, i pozzi con queste caratteristiche sono 11 triv, PF e SOTACARBO. Poiché il completamento di questi pozzi è avvenuto in modo consono (ad esempio, con casing, cementazione, intercapedini con sabbia) l'acqua di questi pozzi tende ad essere pulita e senza particolari odori, e quindi dovrebbe essere più rappresentativa della falda acquifera circostante.

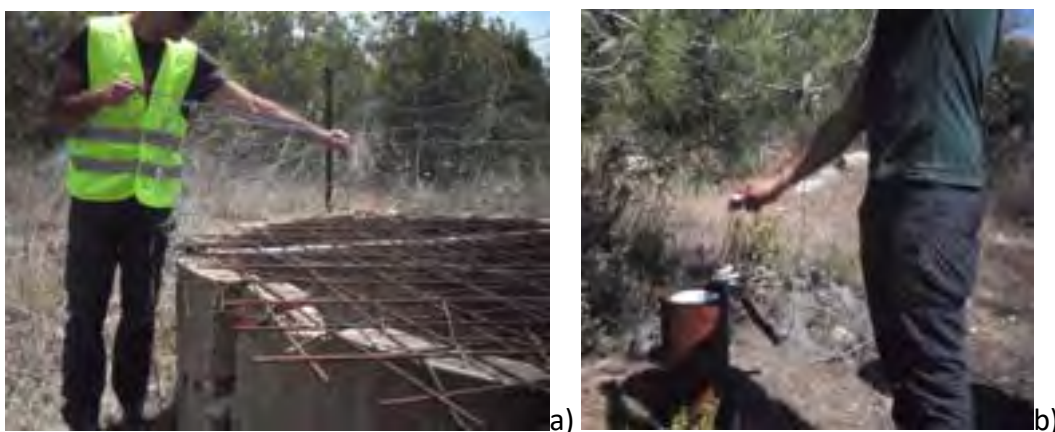


Figura 2. Esempi di pozzi superficiali con elevato diametro: pozzi 52 (a) e di pozzi profondi: PF (b).

**Tabella 1. Descrizione delle caratteristiche dei pozzi monitorati, inclusi il tipo e il numero di sonda GasPro installato.**

Nome del pozzo	Descrizione	Quota pozzo	Profondità pozzo	Geologia superficiale	Tipo di sonda	Nome sonda
2	-	82	Non nota	rocce vulcaniche	pCO <sub>2</sub> e T	P25
20	Pozzo scavato a mano, largo 2 m. Odore di acqua putrida	28.5	12	sabbie e ghiaie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P19
21	pozzo scavato a mano	5.5	Non nota	sabbie e ghiaie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P13
29	Pozzo scavato a mano, largo 2 m. Odore di acqua putrida	9.6	4.5	argille lacustri oloceniche, torbe	pCO <sub>2</sub> e T	P26
34	pozzo scavato a mano, largo 2 m. Odore di acqua putrida	5	3.2	sabbie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P10
35	pozzo scavato a mano, largo 2 m. Odore di acqua putrida	8.8	5.1	ghiaie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P31
40A	pozzo scavato a mano, largo 2 m. Odore di acqua putrida	7	3.3	sabbie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , T	P31 P-CH4
43	-	30.7	Non nota	rocce vulcaniche	pCO <sub>2</sub> e T	P18
Sotacarbo	pozzo perforato, bocca-pozzo stretto	80	Non nota	sabbie e ghiaie alluvionali pleistoceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P14
11triv	pozzo perforato, bocca-pozzo stretto	19	90	sabbie alluvionali oloceniche	pCO <sub>2</sub> e T	P29
PF	pozzo perforato, bocca-pozzo stretto	34.4	80	flussi piroclastici riolitici (NUR)	pCO <sub>2</sub> e T CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , T	P2 P-CH4

La Tabella 1 evidenzia alcune delle caratteristiche dei pozzi monitorati in questo studio. Si noti che le formazioni geologiche superficiali sono state desunte dalla carta geologica alla scala 1:50000 F° 564 "Carbonia" (ISPRA, 2012) mostrata in Figura 1.

### 3 METODI

#### 3.1 Monitoraggio discontinuo dei gas disciolti

Il campionamento di acque per le analisi dei gas disciolti è stato effettuato in due momenti distinti (marzo e giugno 2017) soltanto nei pozzi all'interno dei quali sono posizionate le sonde. Visto il grande volume dei pozzi non è stato possibile effettuare lo spurgo. Per il campionamento è stato utilizzato un bailer di polietilene, il quale viene calato lentamente fino alla profondità di campionamento desiderata (corrispondente a quella dei sensori GasPro) e riportato rapidamente in superficie. Il primo campione raccolto viene scartato e utilizzato per sciacquare il campionatore con l'acqua del pozzo, mentre il secondo viene raccolto per il campionamento ed analisi. L'acqua viene riposta lentamente in vials di vetro VOA (45 ml) in modo da minimizzare il degassamento dovuto alla turbolenza. Le vials vengono poi chiuse con un setto in Teflon/silicone, assicurandosi che non siano presenti delle bolle all'interno. I campioni sono poi conservati in frigorifero a 4°C fino all'analisi.

Le analisi in laboratorio sono state eseguite nelle 2 settimane successive al campionamento, utilizzando la tecnica dello spazio di testa (Capasso & Inguaggiato, 1998). Questo metodo prevede l'iniezione di 10 ml di elio puro all'interno della vial attraverso il setto (spostando un uguale volume di acqua attraverso un secondo ago), un periodo di riequilibrio di almeno 6 ore, e l'analisi dell'aliquota di spazio di testa attraverso gas-cromatografia per CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>+Ar, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ed idrocarburi leggeri.



## 4 RISULTATI – GASPRO MANUTENZIONE E INTERPRETAZIONE DATI

### 4.1 Analisi dei gas disciolti

Le concentrazioni di gas disciolti nei campioni delle due campagne sono riportati in Tabella 3, e le concentrazioni di CO<sub>2</sub> nello spazio di testa sono stati riportati anche nei grafici nella sezione 4.2. Questi campioni sono stati presi per controllare il funzionamento delle sonde.

Tabella 3. Concentrazioni dei gas disciolti.

Pozzo	Marzo, 2017 (ml/L)				Giugno, 2017 (ml/L)			
	CH4	CO2	O2	N2	CH4	CO2	O2	N2
2	5.6E-05	12.2	5.1	19.6				
20	4.3E-04	2.6	8.6	17.4	3.8E-03	10.0	8.7	19.4
21	5.3E-04	5.1	7.5	19.0	5.0E-04	6.9	8.1	20.4
29	4.0E-05	11.3	7.8	21.7	9.0E-05	8.6	7.3	18.3
34	1.2E-04	14.7	6.5	19.1	1.4E-03	26.1	6.3	18.8
35	9.3E-05	1.0	9.9	18.3	2.9E-03	0.8	9.6	17.9
40A	1.4E-04	12.0	6.5	19.4				
43	2.3E-05	6.3	3.5	13.4				
Sotacarbo	2.5E-04	9.5	7.6	21.8	6.7E-04	13.0	7.3	17.4
11TR	8.8E-03	21.2	6.3	23.3	5.3E-03	20.1	5.5	18.7
PF	1.3E-04	0.3	7.7	20.1	1.1E-04	0.3	7.7	17.7

### 4.2 Sonde per il monitoraggio in continuo – nuovi dati

#### Pozzo 2

La sonda GasPro P25 è stata trasferita dal pozzo 52 al 2, quando il primo si è prosciugato. Sfortunatamente, a causa di un malfunzionamento occorso nel momento del trasferimento, la sonda non ha registrato dati. La sonda è stata riparata e riposizionata nel pozzo 2 in dicembre 2016, ma è stata successivamente rubata fra le campagne di marzo e giugno 2017.

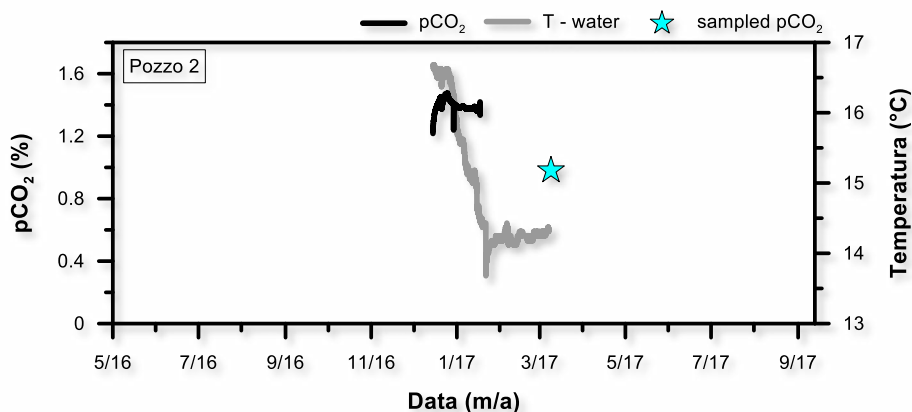


Figura 4. Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 2.

Nel breve periodo intercorso da dicembre 2016 a marzo 2017, si è osservato un rapido decremento della temperatura dell'acqua di circa 3°C in un mese, seguito da valori più stabili di circa 14.2°C (Figura 4). I valori di pCO<sub>2</sub> sono relativamente stabili intorno a 1.5% nel periodo iniziale, mentre nell'ultimo mese e mezzo i valori di concentrazioni misurati sono fuori dal

range di osservazione, e quindi poco affidabili. Il campione di acqua prelevato in marzo sembra essere coerente con i dati della GasPro del periodo precedente, anche se in mancanza dei dati di febbraio, questa resta un'ipotesi da verificare. Come detto sopra, la sonda è stata rubata, e perciò non sono disponibili i dati per il successivo periodo estivo.

### Pozzo 20

La Figura 5 mostra che l'andamento di pCO<sub>2</sub> e temperatura misurati dalla sonda P19 sono simili, con valori minimi durante l'inverno e la primavera, che aumentano invece nei mesi estivi e autunnali. Nel 2016 e nel 2017 sono stati osservati i trend durante l'autunno, mostrando andamenti simili, con valori massimi intorno a 1.5-2% a settembre 2015, 2016 e 2017. I due campioni di pCO<sub>2</sub> prelevati a marzo e a giugno sono in accordo con i valori misurati dalle sonde GasPro nello stesso periodo. La forte correlazione tra temperatura e pCO<sub>2</sub> implica che la CO<sub>2</sub> sia di origine biogenica, prodotta da processi di respirazione, probabilmente formata in situ all'interno del pozzo stesso (come indicato dall'odore putrido dell'acqua). Ulteriori processi all'interno della falda includono effetti stagionali in generale, come ad esempio l'abbassamento del livello piezometrico che può causare l'ossidazione della materia organica dei sedimenti.

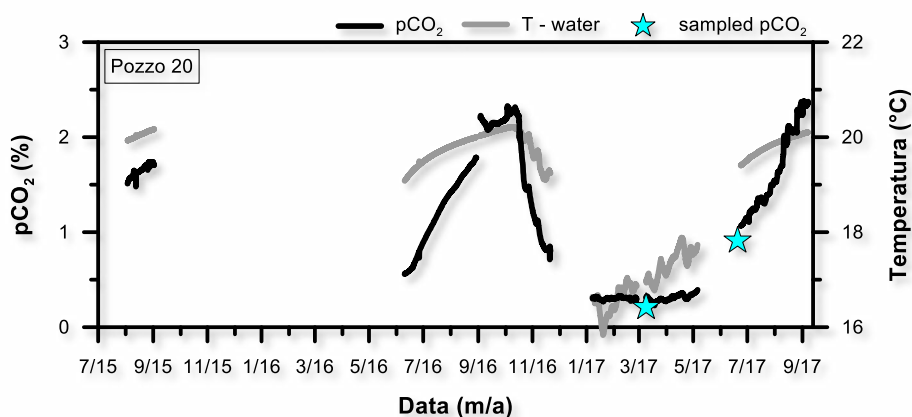


Figura 5. Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 20.

### Pozzo 21

Il pozzo 21 è stato scelto per l'installazione della sonda GasPro P13 in sostituzione di un pozzo ormai prosciugato. Questo pozzo è collocato in prossimità della costa, in un campo coltivato.

Come mostrato nella Figura 6, dall'inizio del periodo di osservazione fino a gennaio 2017, i valori di pCO<sub>2</sub> sono aumentati molto lentamente, mentre la temperatura ha subito una brusca caduta; questo andamento è molto diverso da quello osservato nel pozzo 20. Nell'intervallo successivo (da marzo a settembre) c'è invece una correlazione positiva tra temperatura e pCO<sub>2</sub>, che è molto più simile a quella osservata nel pozzo 20. I due campioni d'acqua hanno una pCO<sub>2</sub> leggermente inferiore di quella misurate dalla sonda GasPro, ma con un andamento del tutto confrontabile.

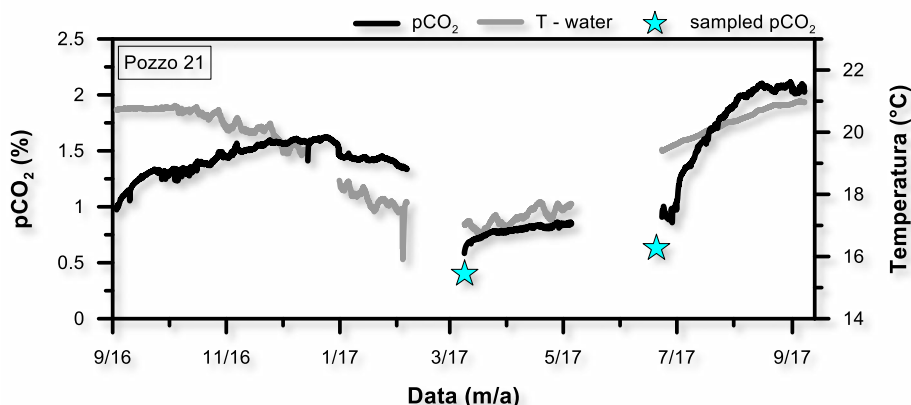


Figura 6. Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 21.

### Pozzo 29

Quando è stata recuperata a settembre 2016, la sonda GasPro P26 presentava la membrana permeabile rotta e l'acqua era entrata nella camera del sensore. Sebbene la sonda abbia registrato i dati fino al suo recupero, i valori misurati dopo il 28 luglio sono irregolari, e ciò può essere messo in relazione con la rottura della membrana; per questo motivo questi dati sono stati rimossi. La sonda è stata riparata e riposizionata in dicembre 2016. Da allora ha funzionato correttamente.

Durante la prima parte del periodo di monitoraggio, ancora una volta i trend generali di temperatura e pCO<sub>2</sub> mostrano valori alti durante l'autunno 2016, per poi decrescere durante l'inverno e la primavera. In aprile 2017, tuttavia, la pCO<sub>2</sub> inizia a diminuire, mentre la temperatura continua ad aumentare durante l'estate e l'inizio dell'autunno. Questo apparente disaccoppiamento tra i due parametri è difficile da spiegare senza l'ausilio di altri dati (ad es. livello dell'acqua, conducibilità, ecc). È da notare, però, che le concentrazioni di pCO<sub>2</sub> misurate in laboratorio nei due campioni d'acqua (rappresentati da stelline nel grafico) danno risultati del tutto comparabili con quelli della GasPro nel medesimo periodo, supportando così la validità dei risultati del monitoraggio.

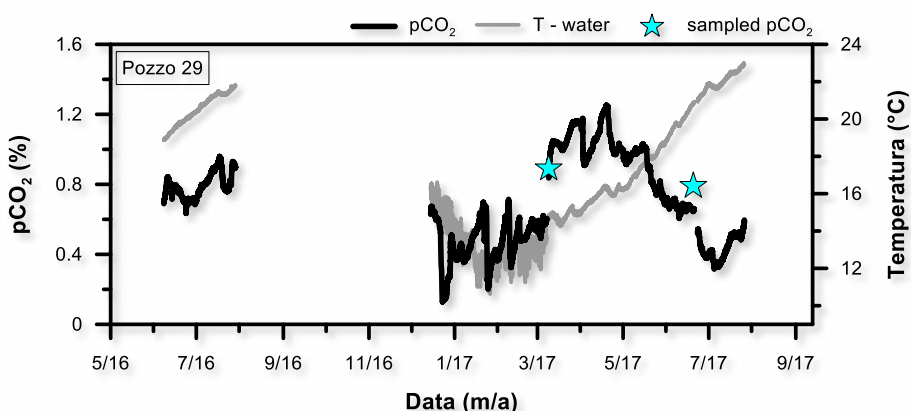


Figura 7. Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 29.

### Pozzo 34

La sonda P10 è stata utilizzata in questo pozzo per l'intero periodo di monitoraggio (Figura 8). A parte qualche problema tecnico in luglio e settembre 2016, questa unità ha sempre funzionato correttamente. La mancanza di dati nei periodi di febbraio e giugno 2017 è dovuta, invece, all'esaurimento delle batterie prima della loro sostituzione.

Come osservato nei pozzi descritti precedentemente, la pCO<sub>2</sub> mostra una correlazione positiva con la temperatura (Figura 8). I valori per entrambi i parametri hanno dei picchi in settembre-ottobre nel 2015, 2016 e 2017, mentre i valori più bassi si registrano solitamente in inverno, da gennaio a maggio. I picchi di pCO<sub>2</sub> sono molto simili negli ultimi due anni, con valori intorno al 3%, mentre nel 2015 erano più alti, anche a causa della temperatura maggiore. Nonostante questi trend generali, i risultati di pCO<sub>2</sub> mostrano anche degli andamenti che sono differenti da quelli attesi. In particolare, il crollo dei valori in ottobre 2016 è molto repentino, mentre la "prematura" diminuzione di concentrazione in agosto 2017 è del tutto inaspettata. Le concentrazioni di CO<sub>2</sub> misurate in laboratorio supportano i dati registrati in situ.

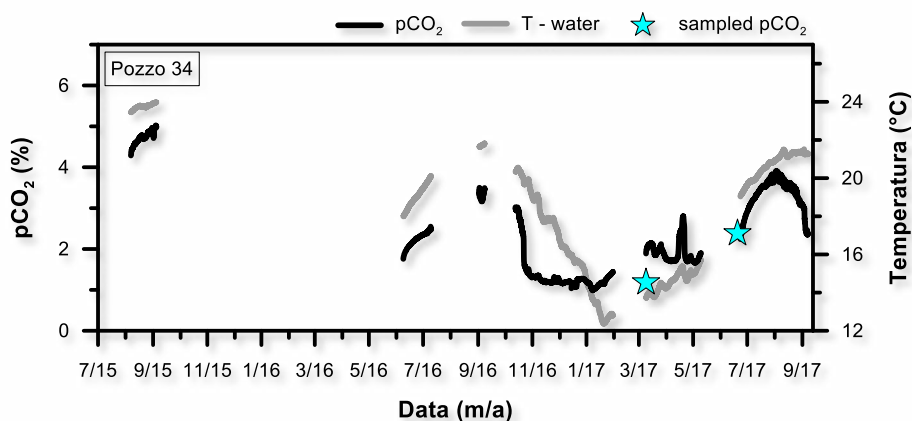
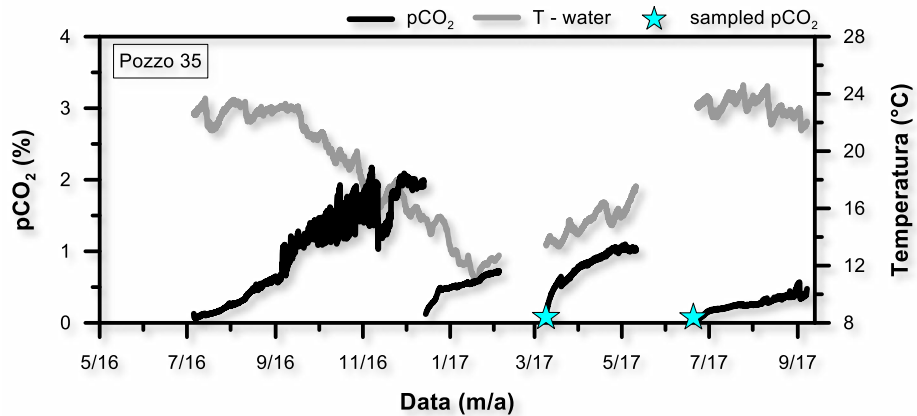


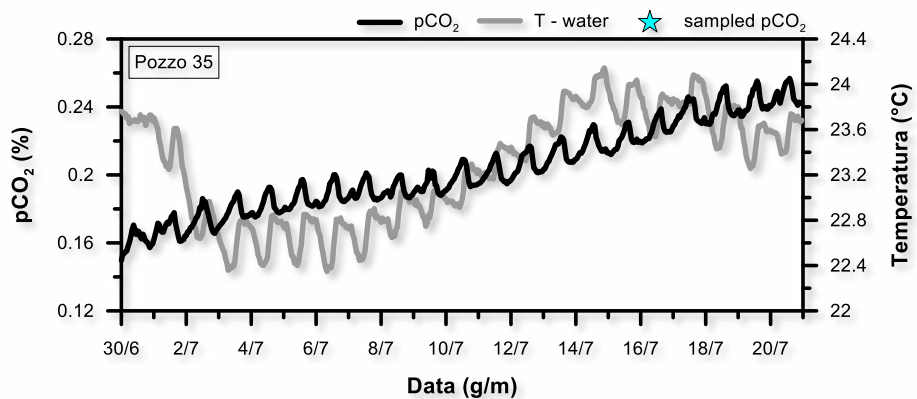
Figura 8. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 34.

### Pozzo 35

I dati di questo pozzo mostrano significanti oscillazioni della temperatura dell'acqua, a cui si sommano piccole oscillazioni diurne (Figura 9a), indicanti che l'acqua del pozzo è fortemente influenzata dagli effetti superficiali e meteorologici. Anche i dati di pCO<sub>2</sub> hanno delle oscillazioni, ma sovrapposte a un generale trend in aumento. Un esame più attento degli andamenti di questi due parametri nel periodo di luglio 2017 mostra una correlazione inversa, cioè a valori alti di temperatura corrispondono picchi bassi di pCO<sub>2</sub>, e viceversa (Figura 9b). Questo tipo di relazione è stata spesso osservata nei laghi, dove la fotosintesi consuma la CO<sub>2</sub> durante le ore diurne, più calde, mentre la CO<sub>2</sub> viene rilasciata durante la notte mediante i processi di respirazione. Ciò mostra chiaramente che i processi microbici controllano il contenuto di CO<sub>2</sub> in questo pozzo, e che forse si ha una scarsa ricarica del pozzo con l'acquifero circostante.



a)



b)

Figura 9. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 35: (a) dataset completo; (b) periodo di 3 settimane.

Guardando i dati complessivamente, l'andamento della temperatura segue quello stagionale. Il trend della pCO<sub>2</sub>, invece, non segue un andamento prevedibile. Sebbene le misure di laboratorio collimino con i risultati della GasPro nel momento dell'installazione, l'andamento simile seguito da una nuova caduta per ogni periodo di monitoraggio potrebbe far presupporre un problema tecnico della sonda.

### Pozzo 40A

La sonda GasPro P31 è stata posizionata nel pozzo 40A dal 10 giugno al 5 luglio 2016 (prima di essere trasferita al pozzo 35). È stata rimpiazzata nel pozzo 40A da un nuovo prototipo che misura pCO<sub>2</sub> e pCH<sub>4</sub>. Purtroppo le concentrazioni di metano nel pozzo sono al di sotto della sensibilità strumentale, e per questo motivo non sono presentati i relativi dati.

Come per la maggior parte dei pozzi superficiali, i valori della temperatura dell'acqua aumentano fino ad un valore massimo intorno alla metà di settembre, per poi cominciare a diminuire nei successivi mesi invernali, raggiungendo il valore minimo alla fine di gennaio (Figura 10). In febbraio la temperatura inizia ad innalzarsi nuovamente. Generalmente, la pCO<sub>2</sub> mostra un trend simile, sebbene siano presenti alcuni picchi ben definiti e un rapido crollo delle concentrazioni a metà settembre, per poi seguire un andamento relativamente stabile durante i mesi invernali. In aggiunta al trend generale, si possono notare eventi specifici, come ad esempio il picco negativo a metà luglio o l'inizio del trend crescente all'inizio di febbraio in

entrambe le variabili. Questa relazione implica una forte influenza dei processi meteorologici superficiali e biologici in situ. Il campione d'acqua prelevato in marzo 2017 mostra un valore di pCO<sub>2</sub> simile a quello misurato nello stesso periodo dalla sonda.

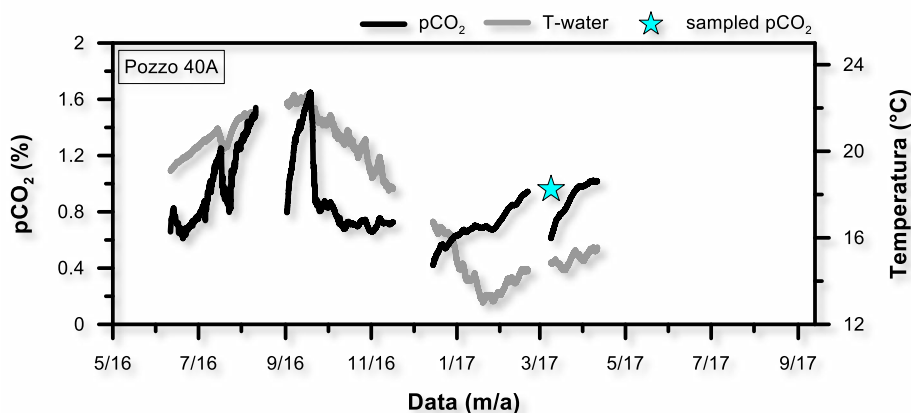


Figura 10. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 40A.

### Pozzo 43

Questo pozzo è stato scelto per sostituirne un altro che si è prosciugato durante la precedente installazione. I dati sono stati raccolti da settembre 2016 fino ad oggi utilizzando la sonda GasPro P18 (Figura 11).

Come mostrato in altri pozzi superficiali, i valori di temperatura mostrano una generale diminuzione da un massimo di 20°C di settembre ad un minimo di 16°C durante i mesi invernali, e un generale incremento durante la primavera e l'estate. Inoltre, è ben visibile una certa variabilità durante il periodo invernale con alcuni picchi negativi. La pCO<sub>2</sub>, invece, inizia con un valore molto elevato (4-5%), ma subisce una brusca diminuzione a metà settembre, con valori intorno al 2%. Dopo questo periodo, i valori sono diminuiti fino all'1%, e sono rimasti intorno a tale valore fino a giugno 2017. Il campione d'acqua analizzato in laboratorio ha una concentrazione di CO<sub>2</sub> simile a quella misurata dalla GasPro a marzo. Sfortunatamente, vi è una mancanza di dati a giugno, ma in luglio si osserva un netto incremento di pCO<sub>2</sub>, simile a quelli osservati ad agosto-settembre dell'anno precedente.

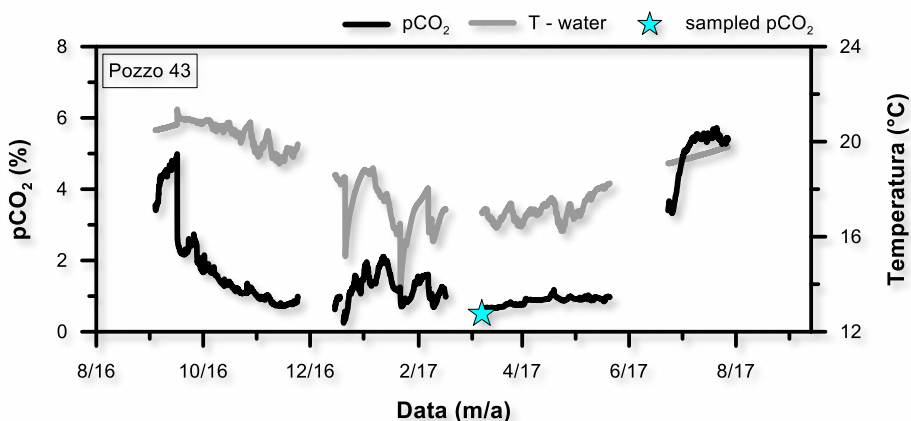


Figura 11. Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 43.

### Pozzo SOTACARBO

Quando la sonda P14 è stata recuperata a settembre 2016, si è notata una certa quantità di acqua all'interno della camera del sensore. Non è noto quando questo sia successo, ma la sonda ha registrato i dati fino al suo recupero. Essa è stata rispedita alla Sapienza per la manutenzione e reinstallata a dicembre 2017. Durante il periodo luglio-settembre 2017, la sonda ha avuto dei malfunzionamenti tecnici.

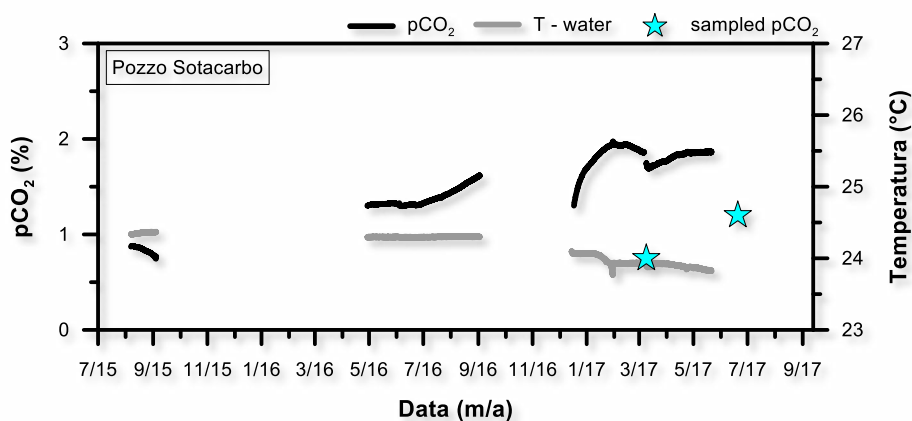


Figura 12. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo Sotacarbo.

Questo pozzo di proprietà della Sotacarbo mostra valori di temperature dell'acqua molto stabili sull'intero periodo di osservazione (Figura 12), indicando un isolamento dagli effetti di riscaldamento superficiale. I valori di pCO<sub>2</sub>, invece, sono abbastanza regolari, e mostrano deboli incrementi da 1.4 a 1.6% durante l'estate del 2016. Dopo il riposizionamento della sonda avvenuta in inverno, i valori aumentano rapidamente all'inizio (forse per equilibrarsi con l'acqua del pozzo), per poi seguire un andamento relativamente costante, con valori intorno al 2%. Questo trend potrebbe essere il risultato delle variazioni stagionali nell'acquifero profondo. La breve installazione durante l'estate del 2015 mostra temperature simili a quelle di agosto 2016, mentre i valori di pCO<sub>2</sub> sono circa la metà. I due campioni analizzati in laboratorio danno valori di pCO<sub>2</sub> che sono molto inferiori a quelli registrati dalla sonda GasPro nello stesso periodo, ma simili a quelli dell'anno precedente. Questo è l'unico caso in cui i dati di pCO<sub>2</sub> delle sonde non corrispondono con quelli misurati in laboratorio. Sebbene ciò possa essere dovuto a un problema di campionamento, questa discrepanza potrebbe indicare anche un problema tecnico della sonda (ad es., calibrazione). Questa ipotesi sarà investigata al più presto, visto che la sonda è in manutenzione.

### Pozzo 11triv

Anche questo pozzo trivellato mostra una temperatura dell'acqua relativamente stabile, intorno a 20.2°C (Figura 13). I valori di pCO<sub>2</sub> in generale hanno un trend decrescente, da circa 1.7% a 1% nel primo periodo di monitoraggio nell'estate 2016, con due chiari picchi l'8 e il 18 luglio. Durante l'autunno i valori rimangono mediamente intorno all'1.5%, con un picco di breve periodo fino al 2%, per poi decrescere fino a un valore medio dello 0.5% nel periodo dicembre 2016-febbraio 2017.

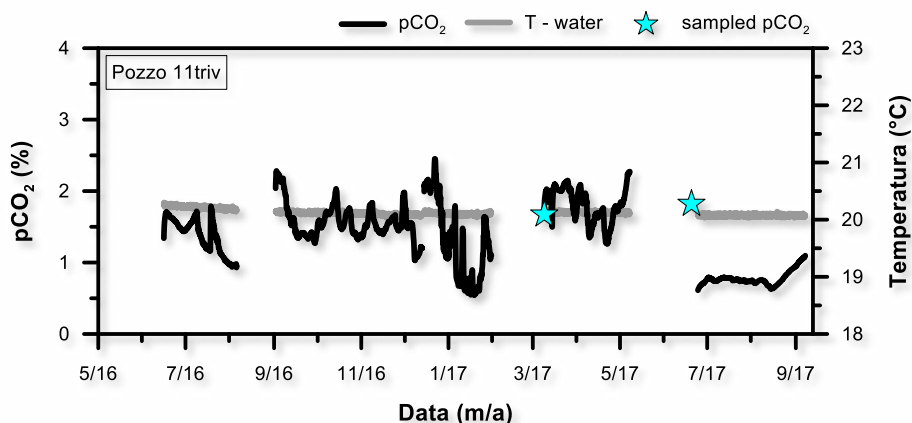


Figura 13. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo 11triv.

Visti i valori di temperatura molto stabili e la natura profonda di questo pozzo, questi picchi possono essere dovuti ad episodi di breve periodo che comportano la risalita di CO<sub>2</sub> da livelli più profondi. La mancanza di altri dati geochimici rende l'interpretazione dell'origine di questi episodi molto difficoltosa. I dati dell'ultimo periodo di monitoraggio (luglio-agosto 2017) sono significativamente più bassi (intorno a 0.5%) e più stabili. L'acqua campionata per l'analisi dello spazio di testa della CO<sub>2</sub> disciolta mostra valori intorno al 1.5%, che sono molto simili a quelli del periodo precedente. Questa differenza così netta nelle concentrazioni e sul trend generale indica che è necessaria della manutenzione della sonda P29 durante la prossima campagna.

### Pozzo PF

Nel pozzo PF sono state installate due sonde GasPro (P2 e P0-CH4) in momenti diverse. Per un periodo il P2 non ha registrato i dati in seguito ad una diminuzione del livello piezometrico (che ha lasciato la sonda in aria).

I valori di temperatura sono relativamente stabili, sebbene sembra che ci siano minime variazioni stagionali tra i valori massimi estivi (intorno a 20.5°C) e quelli invernali (circa 20°C). Queste piccole variazioni sono rappresentative dell'acquifero stesso, e non sono dovute a influenze superficiali all'interno del casing. Questo dataset mostra i livelli di pCO<sub>2</sub> più bassi tra tutti i pozzi, con la maggior parte dei valori tra 0.02 e 0.04% (simili alle concentrazioni atmosferiche), con un picco positivo intorno al 13-18 giugno. Questi dati sono in perfetto accordo con quelli misurati in laboratorio a marzo e giugno 2017. Inoltre, i valori di pH misurati qui sono i più alti tra tutti i pozzi analizzati (8.62), e ben si correlano con i valori di pCO<sub>2</sub> bassi, poiché con un pH elevato, la maggior parte del carbonio inorganico disciolto si trova sotto forma di ione bicarbonato, e non di CO<sub>2</sub>.

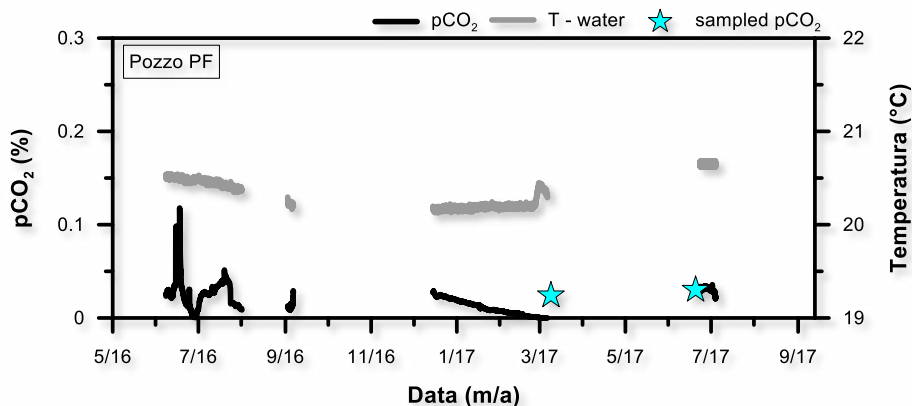


Figura 14. . Monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura dell'acqua nel pozzo PF.

### 4.3 Discussioni dei dati

I pozzi all'interno dei quali sono state installate le sonde di monitoraggio GasPro possono essere suddivisi in due categorie principali (Figura 15): i) pozzi superficiali, scavati a mano, che si trovano vicino alla costa e in sedimenti olocenici, e che hanno accesso all'acquifero superficiale non confinato; e ii) pozzi più profondi, trivellati con tecniche moderne, localizzati nelle zone interne e a quote maggiori, perforati in vulcaniti mioceniche (sebbene sia nota solo la litologia del pozzo PF). Un confronto diretto dei risultati di questi due gruppo può essere utile per identificare analogie negli andamenti osservati, e di conseguenza ipotizzare potenziali meccanismi di controllo comuni.



Figura 15. Localizzazione dei pozzi superficiali (in giallo) e profondi (in bianco), all'interno dei quali sono installate le sonde di monitoraggio GasPro.

Considerando i pozzi superficiali, la temperatura dell'acqua mostra un chiaro andamento stagionale (Figura 16). In 4 dei 5 pozzi, in agosto-settembre di entrambi gli anni si hanno dei picchi di 22°C, mentre i valori minimi si aggirano intorno ai 12°C a metà gennaio. Il quinto pozzo (W20) mostra anch'esso delle oscillazioni, anche se non così pronunciate come quelle degli altri pozzi. Spesso, specifici "eventi" sono stati osservati contemporaneamente in più pozzi, come ad esempio la serie di piccoli picchi registrata da ottobre a dicembre 2016, che è stata osservata nei pozzi 34, 35 e 40A. Il trend generale e il comportamento simile della temperatura dell'acqua implica un'influenza significativa dell'insolazione e del riscaldamento superficiale durante i caldi mesi estivi, con conseguenze dirette sia sul pozzo stesso (se il flusso della falda è lento e l'acqua nel pozzo è relativamente stagnante), sia sull'acquifero superficiale non confinato. Le forti oscillazioni diurne osservate nel pozzo 35 e i picchi di breve periodo osservati in più pozzi suggeriscono la prima ipotesi.

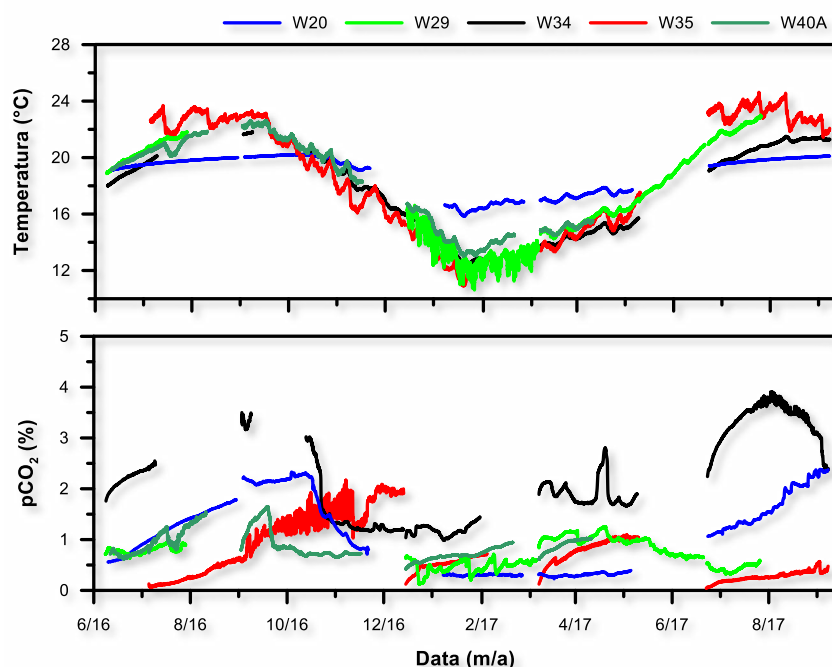


Figura 16. Confronto degli andamenti di temperatura (sopra) e pCO<sub>2</sub> (sotto) nei pozzi superficiali.

Gli andamenti della pCO<sub>2</sub> sono mostrati nello stesso grafico (Figura 16). In tutti i pozzi è possibile riscontrare un aumento dei valori di pCO<sub>2</sub> durante l'estate e nella prima parte dell'autunno del 2016, parallelamente ai dati di temperatura. In generale, i valori aumentano da circa 0.5% in giugno a circa 2% a settembre 2016, sebbene il pozzo W34 presenti i valori più alti e il W35 quelli più bassi. In diversi momenti e a seconda dei pozzi, i valori di pCO<sub>2</sub> crollano rapidamente in un periodo di 1-2 mesi, ritornando a concentrazioni intorno a 0.5%. Questa caduta si osserva a metà ottobre 2016 nei pozzi 20 e 34 e a metà settembre 2016 nel pozzo 40A, mentre i dati sono mancanti per il pozzo 29. Stranamente, la pCO<sub>2</sub> misurata nel pozzo 35 continua a salire durante l'intero periodo fino a metà dicembre 2016, con significanti oscillazioni che non sono state osservate negli altri pozzi; dopo il riposizionamento della sonda sono stati misurati valori più bassi e più stabili, che potrebbero indicare presenza di "biofouling" sulla membrana della sonda nel periodo precedente. A cavallo tra la fine

dell'inverno e l'inizio dell'estate i valori sono rimasti relativamente bassi e stabili, iniziando però ad aumentare nuovamente a marzo 2017, e continuando con questo trend fino all'inizio di settembre. Questo andamento è particolarmente chiaro nei pozzi 20 e 34, mentre nel pozzo 29 i valori diminuiscono durante questo periodo.

Sebbene in molti pozzi si osservi una relazione chiara tra la temperatura dell'acqua (legata alla stagionalità) e la concentrazione di CO<sub>2</sub> disciolta, i valori assoluti di pCO<sub>2</sub> e i suoi trend giornalieri sembrano essere influenzati anche dalle condizioni locali di ogni pozzo. Ad esempio, la temperatura del pozzo 35 ha i valori più alti, ma quelli di pCO<sub>2</sub> sono i più bassi. Mettendo insieme queste informazioni, si può dire che il riscaldamento è un fattore di controllo importante della produzione di CO<sub>2</sub> dovuta alla respirazione microbica nei pozzi superficiali, ma bisogna considerare anche altri parametri che giocano anch'essi un ruolo importante (ad esempio, il contenuto di carbonio organico e inorganico disciolto, il pH e la velocità di scambio tra le acque nel pozzo e l'acquifero circostante).

Prima di discutere i risultati dei pozzi profondi, è opportuno puntualizzare che le sonde installate sono state progettate per una profondità in acqua non superiore ai 20 metri, e per questo motivo non è stato possibile posizionarle a fondo pozzo (fino a 100 m) all'interno dell'acquifero vero e proprio. Le sonde sono state, invece, collocate solo qualche metro al di sotto del livello piezometrico, per cui i risultati sono relativi all'acqua che si trova nel pozzo; la similarità di quest'acqua con quella dell'acquifero profondo dipende dal miscelamento (anche mediante pompaggio) all'interno della tubazione.

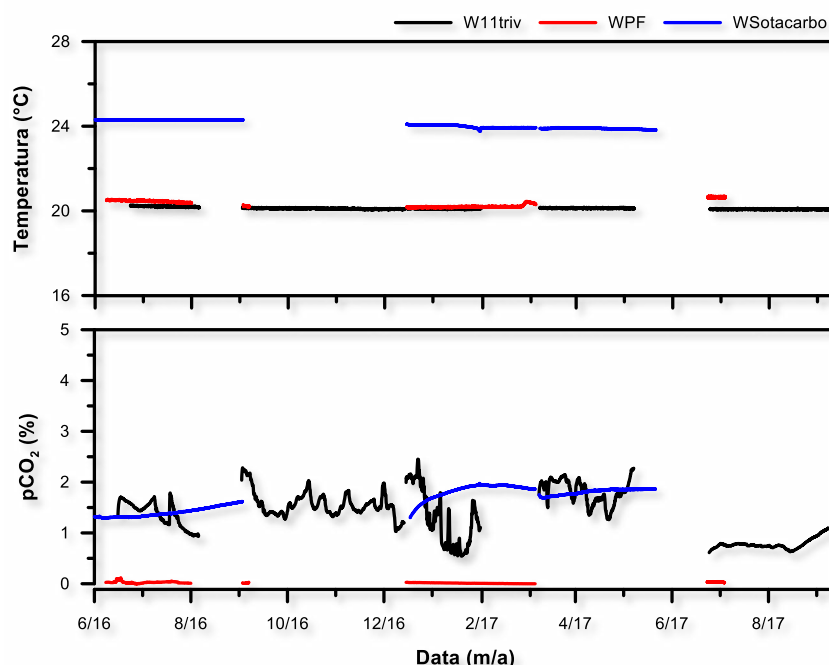


Figura 17. Confronto tra gli andamenti di temperatura (sopra) e pCO<sub>2</sub> (sotto) nei pozzi profondi.

I pozzi profondi hanno un comportamento (Figura 17) che è alquanto differente da quello osservato in quelli superficiali descritti in precedenza (Figura 16). Innanzitutto, i valori di temperatura sono molto più stabili. Due pozzi hanno valori quasi identici (W11triv e WPF),

mentre quelli del pozzo SOTACARBO sono significativamente più elevati; per confermare questo risultato, è necessaria un controllo della calibrazione dei sensori. La stabilità dell'andamento della temperatura indica un isolamento dagli effetti superficiali.

Per quanto riguarda i valori di pCO<sub>2</sub>, quelli misurati nei pozzi 11triv e SOTACARBO sono nello stesso range (circa 1-2%) fino a luglio 2017. Sfortunatamente, nell'ultimo periodo di monitoraggio, da luglio a settembre 2017, la sonda installata nel pozzo Sotacarbo non ha funzionato, per cui non sono disponibili i dati, mentre i risultati molto bassi e stabili del pozzo 11triv in questo periodo potrebbero non essere rappresentativi (si veda la discussione sopra). I valori di pCO<sub>2</sub> misurati nel pozzo PF, invece, sono molti bassi lungo l'intero periodo di monitoraggio e prossimi a quelli dell'acqua a contatto con l'atmosfera (circa 300 ppm), fino a un massimo di 1000 ppm.

Questi risultati indicano che i pozzi più profondi hanno parametri geochimici più stabili, meno influenzati dagli effetti superficiali, e sono quindi potenzialmente rappresentativi delle condizioni dell'acquifero. Per poter comprendere appieno la sorgente di CO<sub>2</sub>, sarebbero utili delle informazioni riguardanti la mineralogia e la chimica dell'acquifero.

## 5 RISULTATI – SVILUPPO DI UN SISTEMA DI TRASMISSIONE DEI DATI IN TEMPO REALE

### 5.1 Overview

I sensori GasPro installati nel sito del Sulcis hanno dato buoni risultati, tuttavia il fatto che le unità vengono ispezionate solo ogni 2-3 mesi comporta che ogni problema tipico delle installazioni di strumenti a lungo termine (come malfunzionamenti, batterie scariche o atti di vandalismo) potrebbe essere scoperto molto tempo dopo l'evento, con conseguente perdita dei dati. Per risolvere questi problemi il CERISapienza, nell'ambito del presente progetto, ha focalizzato il nuovo sviluppo del GasPro sulla trasmissione automatica ed in tempo reale dei dati ad un server centrale, permettendo così a ricercatori e al personale tecnico di monitorare da remoto i dati ed il corretto funzionamento del sistema.

Un disegno schematico del nuovo sistema GasPro Network 3 è mostrato in Figura 18. Esso consiste di una sonda di pCO<sub>2</sub> e temperatura posizionata sotto la falda acquifera, collegata tramite un cavo impermeabile ad una scatola sulla superficie contenente le batterie intercambiabili, il data logger e l'antenna di comunicazione (GPRS o Wi-Fi). I dati misurati dalla sonda vengono trasmessi in modo wireless a un server situato presso l'Università di Roma ed archiviati in un database MySQL per le queries ed il download dei dati.

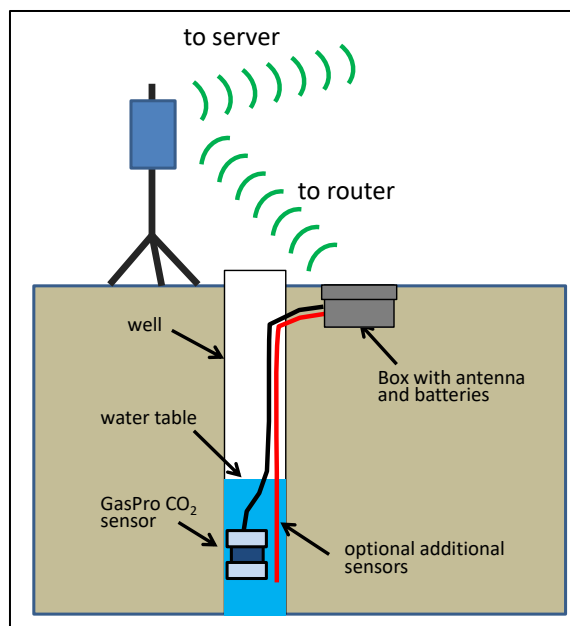


Figura 18. Disegno schematico che mostra il layout e l'implementazione di un sistema GasPro Network 3 in un pozzo.

## 5.2 Probes

Le sonde del nuovo sistema sono simili a quelle già utilizzate nel Sulcis e descritte sopra nella Sezione 3.2, ma con importanti miglioramenti e modifiche. Ad esempio, mentre il sensore NDIR utilizzato è lo stesso, l'elettronica è stata ottimizzata e modificata per indirizzare le scelte progettuali per la nuova architettura. In particolare, la sonda nel pozzetto ora comprende solo i sensori di CO<sub>2</sub> e temperatura e l'elettronica di controllo correlata (il che significa che è molto più piccola), mentre il datalogger, le batterie ed i moduli di comunicazione sono stati trasferiti nella scatola di superficie dove sono facilmente accessibili e dove l'antenna può trasferire i dati a un hub Internet (Figura 18).

Le batterie contenute in ogni sonda sono di tipo "D" e devono avere una tensione nominale di 3,6 V ciascuna. Le batterie a Litio sono consigliate per tempi di implementazione più lunghi, come le SAFT LSH20, che hanno una tensione di 3,6V ed una capacità nominale di 13 Ah. Acquisendo una volta ogni ora, due di queste batterie dovrebbero durare dai 6 agli 8 mesi (a seconda del consumo delle trasmissioni radio).

La ridondanza dei dati è garantita dal fatto che i risultati vengono sia caricati sul server centrale sia salvati sul data logger interno di ogni sonda.

Se necessario (ad esempio, per cambiare la frequenza di acquisizione), ciascuna sonda può essere riattivata dalla modalità di sleep, posizionando un magnete vicino all'interruttore magnetico sulla scheda elettronica di controllo nella scatola di superficie.

Ogni sonda può connettersi ad rete wi-fi esistente oppure funzionare come un access point. Quando la sonda esce dallo sleep mode con il magnete, funziona come un access point e può essere riprogrammata connettendosi alla sua rete (es. Probe1-net).

Con un qualsiasi browser si può accedere alla sonda digitando l'indirizzo IP: 192.168.4.1:1336, che dà accesso a varie informazioni sulla sonda e variabili del sistema definite dall'utente, come ad esempio:

- i valori correnti misurati dai sensori.
- la data e l'ora.
- il warm-up time del sensore infrarosso, la frequenza di acquisizione e l'ID della sonda.
- effettuare il download dei dati memorizzati localmente nella sonda e formattare la memoria.
- impostare la rete Wi-Fi e la chiave di sicurezza.

### 5.3 Firmware

Il firmware delle sonde controlla l'acquisizione ed il trasferimento dei dati, che può essere riassunta come segue:

- La sonda si attiva in base alla frequenza di campionamento definita dall'utente. L'impostazione predefinita è una volta ogni ora.
- Le sonde accendono il sensore di CO<sub>2</sub> per i 2 minuti di riscaldamento.
- Durante questi due minuti ogni sonda tenta di connettersi al server, tramite GPRS o Wi-Fi, per trasferire i dati appena raccolti al database centrale. Dopo i due minuti di riscaldamento, tutte le sonde salvano un valore per i vari parametri misurati e quindi ritornano in sleep mode.

### 5.4 Trasferimento ed archiviazione dei dati

Ad ogni collegamento la sonda invia al server un file tramite il protocollo FTP. Un apposito programma sul server verifica ogni pochi secondi la presenza di un file valido proveniente da una sonda ed inserisce i valori in un database MySQL. Un utente autorizzato può accedere al server inserendo le credenziali (Figura 19).

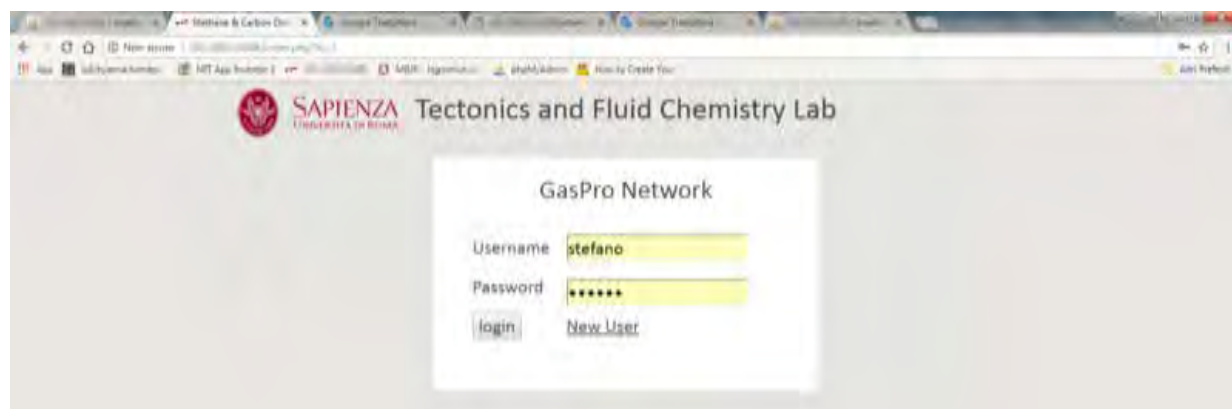


Figura 19. Schermata della pagina di accesso al database.

Ogni utente accreditato può visualizzare i valori registrati dalle sonde, scegliendo il periodo di interesse ed effettuare il download dei dati (Figura 20). Con una trasmissione dei dati in real-time è possibile accorgersi tempestivamente di eventi anomali, malfunzionamenti e soprattutto dello stato di carica delle batterie.

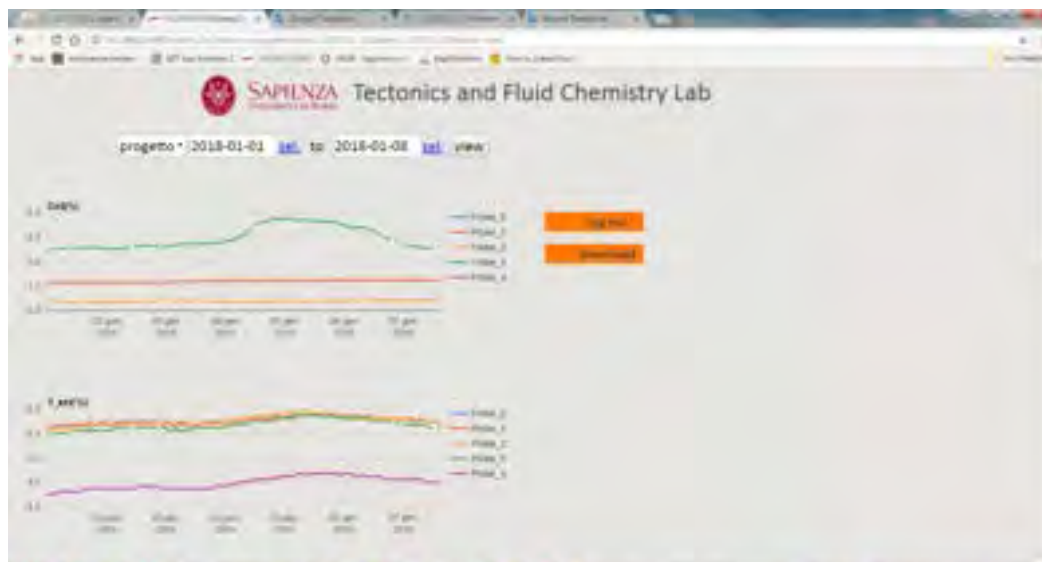


Figura 20. Esempio di dati di CO<sub>2</sub> e temperatura del GasPro visualizzati su un browser web.

## 6 CONCLUSIONI

Questo rapporto descrive i risultati del monitoraggio in continuo dei gas disciolti di pozzi in falde nel periodo giugno 2016 – settembre 2017, condotto con lo scopo di definire la baseline nell'area del Sulcis. La baseline rappresenta una misurazione della variabilità spaziale e temporale in un sito, ed è controllata dai processi chimici, biologici e idrogeologici che avvengono sia nell'acquifero, sia come interazione tra l'acquifero e il pozzo stesso. A seconda della profondità e della configurazione del pozzo, questi processi possono essere influenzati con diversa intensità dai cambiamenti stagionali (temperatura, insolazione, precipitazioni). Queste informazioni sulle condizioni di baseline sono richieste per stabilire i criteri di soglia per futuri esperimenti e monitoraggi nell'ambito della ricerca sulla cattura e stoccaggio dell'anidride carbonica (CCS) nell'area di studio.

In totale, sono stati monitorati 14 pozzi per periodi di tempo diversi. Alcuni di essi sono stati abbandonati poiché il livello dell'acqua è diventato troppo basso per consentire la raccolta di dati significativi. Nel periodo di studio, sono state installate 11 sonde GasPro per il monitoraggio in continuo di pCO<sub>2</sub> e temperatura, per un periodo di tempo variabile tra 1 e 14 mesi. I risultati mostrano due trend differenti, associabili alla tipologia di pozzo considerata. Infatti, i pozzi profondi mostrano una temperatura molto stabile nel tempo, indicando perciò un buon isolamento da effetti meteorologici, come ad esempio il riscaldamento superficiale. Per quanto riguarda la pCO<sub>2</sub>, due di questi pozzi hanno valori simili nell'ordine di 1-2%, mentre un altro mostra valori molto più bassi, tipici di acqua all'equilibrio con l'aria atmosferica. Viceversa, i pozzi superficiali mostrano un aumento continuo della temperatura e della pCO<sub>2</sub>

nei caldi mesi estivi, a cui segue una diminuzione durante l'autunno e l'inverno. Questa relazione implica una forte influenza degli effetti superficiali, con un riscaldamento continuo in estate, che può favorire la produzione di CO<sub>2</sub> mediante respirazione microbica e reazioni chimiche, sia nel pozzo stesso, sia nell'acquifero non confinato.

Tenendo conto che l'attività di monitoraggio in continuo ha la finalità di definire la baseline dell'area in esame, al fine di migliorare l'efficienza della rete e di garantire una maggiore continuità, si potrebbero adottare alcuni accorgimenti:

- Installare le sonde in pozzi di buona qualità e rappresentativi almeno della falda più superficiale;
- Ridurre il numero di punti di osservazione, prevedendo due sonde per ogni pozzo in modo di garantire la sostituzione e la continuità delle misure;
- Considerare di installare almeno una parte delle sonde disponibili in terra ad profondità variabili tra 1m e 5 m.

Oltre al monitoraggio continuo descritto sopra, le funzionalità del sistema di sensori GasPro sono state ampliate per includere la trasmissione wireless dei dati a un server centrale situato presso l'Università di Roma per il monitoraggio in tempo reale dei sensori installati. Ciò consente ai tecnici responsabili del corretto funzionamento delle sonde di garantire oltre all'interpretazione dei dati prodotti un intervento tempestivo, sia per problemi di manutenzione come il cambio delle batterie esaurite, sia problemi logistici come atti di vandalismo o furto (come è avvenuto sul sito del Sulcis in passato) e sia per ulteriori misurazioni legate ad anomalie osservate o trend dei dati.

## 7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Beaubien, S.E., Tartarello, M.-C., Graziani, S., Ruggiero, L., Bigi, S., Lombardi S., 2017, Rapporto integrativo sul monitoraggio in continuo della CO<sub>2</sub> disciolta e della temperatura in acqua. Report prepared by the Centro di ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici – CERI under contract to Sotacarbo SpA., pp. 23.
- Beaubien, S.E., Tartarello, M.-C., Graziani, S., Bigi, S., Ruggiero, L., Lombardi S., 2016, Monitoraggio e caratterizzazione geochimica dell'area del bacino carbonifero del Sulcis. Report prepared by the Centro di ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici – CERI under contract to Sotacarbo SpA., pp. 43.
- Bigi, S., Tartarello, M.-C., Ruggiero, L., De Angelis, D., Sacco, P., Graziani, S., and Lombardi, S., 2015, Monitoring and geochemical characterization of the coal basin of Sulcis, Sardinia. The Matzaccara basin, Report prepared by the Centro di ricerca Previsione, Prevenzione e Controllo dei Rischi Geologici – CERI under contract to Sotacarbo SpA., pp. 24.
- Capasso, G., and Inguaggiato, S., 1998, A simple method for the determination of dissolved gases in natural waters. An application to thermal waters from Vulcano Island: Applied Geochemistry, v. 13, p. 631-642.
- Graziani, S., Beaubien, S.E., Bigi, S., and Lombardi, S., 2014, Spatial and Temporal pCO<sub>2</sub> Marine Monitoring Near Panarea Island (Italy) Using Multiple Low-Cost GasPro Sensors: Environmental Science & Technology, v. 48, p. 12126-12133.
- ISPRA, 2012, Carta Geologica d'Italia, Foglio 564 Carbonia con note illustrative.