

UNIVERSITA' DEGLI STUDI ROMA TRE
DIPARTIMENTO DI SCIENZE GEOLOGICHE

Dottorato di Ricerca in Geodinamica
XXI Ciclo

LE EMISSIONI DI GAS ENDOGENO DEI COLLI ALBANI E DELL'ISOLA DI VULCANO E
VALUTAZIONE DELLA LORO PERICOLOSITÀ

Luca Tarchini

Tutor
Prof. Franco Barberi

Il Coordinatore del Dottorato
Prof. Domenico Cosentino

Co-tutor
Dr.ssa Maria Luisa Carapezza

Revisori
Prof.ssa Lucia Civetta
Prof. Roberto Santacroce

Roma, 2009

INDICE

1. Introduzione	1
2. Metodologie geochimiche applicate nello studio	3
— 2.1. Misure di flusso diffuso di gas dal suolo	3
○ 2.1.1. Misure con camera d'accumulo portatile	3
○ 2.1.2. Misure con stazione automatica di monitoraggio	6
— 2.2. Misure di flusso viscoso di gas dal suolo e dall'acqua	8
— 2.3. Misure di concentrazione di CO ₂ e H ₂ S in aria	9
○ 2.2.1. Misure con strumento portatile Dräger	9
○ 2.2.2. Misure con TDL	10
— 2.4. Misure del flusso di SO ₂ dai vulcani con tecnica miniDOAS	11
— 2.5. Misure dei parametri chimico-fisici delle acque	12
— 2.6. Analisi chimiche e isotopiche di acque e gas	13
3. L'apparato vulcanico dei Colli Albani	15
— 3.1. Inquadramento geologico-strutturale	15
— 3.2. Storia eruttiva	18
— 3.3. Idrogeologia e geochimica delle acque	20
— 3.4. Geochimica dei gas	23
— 3.5. Pericolosità	29
4. Le principali aree di degassamento dei Colli Albani	32
— 4.1. Cava dei Selci	32
○ 4.1.1. Le misure di flusso di CO ₂ e H ₂ S dal suolo	32
○ 4.1.2. Le misure di flusso di CO ₂ in continuo	45
○ 4.1.3. Le misure di concentrazione in aria di CO ₂ e H ₂ S	52
○ 4.1.4. Le concentrazioni di gas indoor	56
— 4.2. Santa Maria delle Mole	58
○ 4.2.1. Le misure di flusso di CO ₂ dal suolo	58
— 4.3. Vigna Fiorita	61
○ 4.3.1. Le misure di flusso di CO ₂ dal suolo e le concentrazioni di gas indoor	61

— 4.4. La Solforata di Pomezia	64
○ 4.4.1. <i>Le misure di flusso di CO₂ e H₂S dal suolo</i>	64
○ 4.4.2. <i>Le misure di flusso viscoso di gas dall'acqua</i>	68
○ 4.4.3. <i>Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S</i>	70
— 4.5. Tor Caldara	73
○ 4.5.1. <i>Le misure di flusso di CO₂ dal suolo</i>	73
— 4.6. Geochimica dei laghi craterici di Albano e di Nemi	74
○ 4.6.1. <i>Le misure del flusso di CO₂ dal suolo</i>	76
○ 4.6.2. <i>I profili verticali multiparametrici</i>	78
○ 4.6.3. <i>I campionamenti di acque e gas disciolti</i>	80
○ 4.6.4. <i>Le misure con sonda multiparametrica e analisi chimiche e isotopiche delle acque del lago di Nemi</i>	84
5. Pericolosità associata a emissioni accidentali di gas da pozzi	85
— 5.1. L'incidente del 1986	85
— 5.2. L'incidente del 2003 di Via di Valle Cupella (Roma)	86
○ 5.2.1. <i>Monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo vicino al pozzo</i>	88
— 5.3. L'incidente di Fiumicino del 2005	93
○ 5.3.1. <i>L'emissione accidentale di gas e l'intervento di messa in sicurezza</i>	94
○ 5.3.1.1. <i><u>Emissione di gas dai pozzetti</u></i>	96
○ 5.3.1.2. <i><u>Flusso di CO₂ dal suolo</u></i>	97
○ 5.3.1.3. <i><u>Concentrazioni in aria di CO₂ all'interno di locali</u></i>	102
— 5.4. Gli incidenti di emissione da gas avvenuti nel 2008	103
6. L'isola di Vulcano	110
— 6.1. Inquadramento geologico-vulcanologico dell'Isola di Vulcano e pericolosità da gas	110
7. Valutazione della pericolosità delle emissioni gassose a Vulcano attraverso misure di flusso diffuso e viscoso di CO ₂ , H ₂ S, SO ₂ e di concentrazione in aria di CO ₂ e H ₂ S	114
— 7.1. Le campagne geochimiche al cratere della Fossa	114
○ 7.1.1. <i>Le campagne di misura del flusso di CO₂ dal suolo</i>	114
○ 7.1.2. <i>Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL</i>	118
○ 7.1.3. <i>Le misure di flusso di SO₂ dal plume craterico</i>	118
— 7.2. Le campagne geochimiche a Vulcano Porto	119
○ 7.2.1. <i>Misure di flusso di CO₂ dal suolo</i>	119

○ 7.2.2. <i>Le misure di concentrazione in aria e indoor</i>	120
○ 7.2.3. <i>Il monitoraggio in continuo del flusso di CO₂ dal suolo</i>	122
— 7.3. <i>Le campagne geochimiche alla spiaggia di Levante</i>	126
○ 7.3.1. <i>Le misure del flusso di CO₂ e H₂S dal suolo su maglia fissa</i>	126
○ 7.3.2. <i>Le misure di flusso viscoso</i>	127
○ 7.3.3. <i>Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL</i>	128
○ <i>Le misure geochimiche a Palizzi</i>	129
8. <i>Conclusioni</i>	131
<i>Bibliografia</i>	139

INTRODUZIONE

Una serie recente di ricerche ha dimostrato l'importanza dello studio del degassamento diffuso di CO₂ sia da aree vulcaniche attive o quiescenti (Allard et al., 1991; Carapezza & Federico, 2000; Granieri et al., 2003, 2006; Carapezza et al., 2008b) sia da aree vulcaniche recenti ma non più attive che spesso ospitano sistemi geotermici di alta entalpia, come quelle dell'Italia Centrale (Chiodini et al., 2004; Gambardella et al., 2004). L'anidride carbonica è, dopo l'acqua, il volatile principale disciolto nei magmi e, a causa della sua bassa solubilità nei liquidi silicatici a pressioni medio-basse (Gerlach & Graeber, 1985; Pan et al., 1991; Papale et al., 2006), viene rilasciato prima e in maggior quantità rispetto agli altri volatili. A causa della sua scarsa reattività, la CO₂ raggiunge facilmente la superficie. Ogni significativo aumento del rilascio di CO₂ in un vulcano attivo può quindi indicare, insieme ad altri dati chimici e isotopici dei gas emessi, che il magma in profondità ha subito depressurizzazione, possibile indizio di una risalita pre-eruttiva. Nei vulcani attivi a condotto aperto, la maggior parte del gas magmatico viene emesso dalla plume permanente dei crateri; nei vulcani quiescenti a condotto chiuso l'emissione principale avviene attraverso fumarole la cui temperatura dipende dalle condizioni idrogeologiche locali. Il rilascio diffuso di CO₂ dal suolo fornisce comunque un contributo importante al degassamento totale del vulcano e deve essere considerato anche ai fini di effettuare un bilancio di massa.

La risalita di gas dalla sorgente profonda (magmatica o geotermica) alla superficie avviene attraverso faglie e fratture, ma non sempre produce manifestazioni riconoscibili, in particolare se vi sono acquiferi freddi superficiali che tamponano il flusso di calore dal basso, determinano la condensazione del vapore e dissolvono i volatili più solubili. Le prospezioni del rilascio diffuso di CO₂ dal suolo sono in questi casi preziose, perché la distribuzione delle anomalie di flusso permette di individuare facilmente le principali strutture degassanti. Queste possono essere monitorate attraverso la ripetizione di campagne di misura su maglie di punti fissi o attraverso stazioni automatiche di misura del flusso di CO₂ dal suolo, e le variazioni del tasso di degassamento nel tempo forniscono utili informazioni sulle dinamiche del sistema vulcanico e rappresentano un complemento importante dei sistemi tradizionali di monitoraggio dei vulcani.

In questa tesi vengono presentati i risultati delle ricerche condotte su due vulcani italiani, orientate principalmente allo studio del degassamento diffuso di CO₂ dal suolo, integrato con misure del flusso di H₂S con tecniche innovative e anche del rilascio convettivo (viscoso) di gas, e completato con analisi chimiche e isotopiche dei gas emessi. Il primo

vulcano studiato è quello dei Colli Albani, a Sud di Roma, noto da tempo per il suo forte degassamento di CO₂, indicato dall'alto contenuto di carbonio inorganico disciolto nelle acque di falda e dalla presenza di molte manifestazioni di gas (Chiodini & Frondini, 2001; Carapezza et al., 2003, 2005). Recenti ricerche geologiche e stratigrafiche hanno ringiovanito l'attività dei Colli Albani (Funciello et al., 2003) che ha dato almeno un'eruzione Olocenica e ha prodotto pericolosi lahar da fuoriuscita d'acqua dal lago craterico Albano anche in epoca Romana (IV Sec. a.C.). Lo studio dell'origine delle sue emissioni gassose acquisiva quindi ulteriore importanza nella ricerca di evidenze geochemiche della presenza in profondità di un sistema magmatico ancora attivamente degassante.

La seconda area vulcanica studiata è quella della Fossa nell'Isola di Vulcano, compresa la sua base contenente l'abitato di Vulcano Porto. Qui gli studi sul degassamento diffuso di CO₂ hanno avuto un duplice scopo: quello di analizzare le variazioni del rilascio diffuso di CO₂ dall'area craterica del vulcano che si registrano durante una delle sue ricorrenti crisi e valutare le loro implicazioni vulcanologiche, e quello di stimare il degassamento di CO₂ fuori dall'area craterica, in particolare nell'abitato principale dell'isola.

Un altro obiettivo importante della tesi era infatti quello di valutare la pericolosità delle emissioni gassose dei due vulcani. A tale scopo, oltre alle misure del flusso di CO₂ dal suolo, sono state eseguite numerose misure delle concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S, sia all'aperto dove è stata sperimentata una nuova tecnica laser molto interessante (TDL), sia all'interno delle abitazioni vicine alle zone principali di emissione di gas.

Oltre alle numerose campagne periodiche di misura del flusso di CO₂ dal suolo, in entrambi i vulcani sono state installate, su due aree a rilascio anomalo di gas, stazioni automatiche di misura del flusso di CO₂ e di parametri ambientali che lo controllano. Questo ha consentito da un lato di ottenere un lungo record di dati continui e dall'altro di analizzare a fondo l'influenza che la variazione dei parametri ambientali ha sul flusso di CO₂ dal suolo, valutazione che è sempre necessaria per poter riconoscere le variazioni effettivamente dovute a cause endogene.

Alcuni dei risultati presentati nella tesi sono già stati pubblicati, per lo più in riviste internazionali, in lavori dei quali lo scrivente è co-autore. Tutte queste ricerche sono state svolte da un gruppo di ricerca misto Università Roma Tre- INGV di Roma, al quale lo scrivente è stato associato fin dal 2003.

CAP. 2. METODOLOGIE GEOCHIMICHE APPLICATE NELLO STUDIO

2.1. Misure di flusso diffuso di CO₂ e H₂S dal suolo

2.1.1. Misure con camera d'accumulo portatile

Vari studi hanno mostrato che su vulcani attivi o quiescenti il gas è rilasciato non solo dai crateri centrali o attraverso fumarole, ma anche diffusivamente dal suolo in alcune particolari zone sui fianchi, o persino alla base, dei vulcani (Badalamenti et al., 1988; Barberi & Carapezza, 1994; Giammanco et al., 1998); anche le aree geotermiche sono caratterizzate da analoghi fenomeni di rilascio diffuso di gas. Il contributo di queste emissioni gassose (principalmente di CO₂) all'*output* totale è nient'affatto trascurabile in termini quantitativi (Allard et al., 1991; Chiodini et al., 1998; Granieri et al., 2006).

Le zone di emissione di gas dal suolo corrispondono a strutture tettoniche o vulcano-tettoniche e gli studi del flusso di anidride carbonica sono molto utili per identificare la presenza di fratture attive sepolte, spesso non facilmente identificabili alla superficie.

Per la misura del flusso diffuso di anidride carbonica e di idrogeno solforato, così come di altri gas (es. metano), dal suolo esistono varie tecniche (Reiners, 1968; Kucera & Kirkham, 1971; Gurrieri & Valenza, 1988; Chiodini et al., 1998; Carapezza & Granieri, 2004). Esse vengono primariamente suddivise in *dirette* od *indirette*: queste ultime consistono nella determinazione della concentrazione di CO₂ a varie profondità nel suolo, e richiedono perciò flussi stazionari per diffusione e conoscenze sulla porosità del suolo (Chiodini et al., 1998).

I metodi diretti si attuano sia tramite procedure attive, nelle quali il gas viene estratto dal suolo mediante una pompa (es. *il metodo della concentrazione dinamica*; Gurrieri & Valenza, 1988), sia tramite procedure passive, le quali consistono nella misura della concentrazione di CO₂ rilasciata dal suolo ed accumulata all'interno di un contenitore. Tra le tecniche passive dirette vi è il *metodo della camera d'accumulo* (Parkinson, 1981; Baubron et al., 1991), il quale misura con rapidità valori di flusso di CO₂ dal suolo in un ampio intervallo da 0,1 ad oltre 10⁴ g/m²giorno (Chiodini et al., 1998).

Il vantaggio che dà questa tecnica è quello di essere un metodo di misura che non richiede correzioni od assunzioni sulle caratteristiche del suolo (Tonani & Miele, 1991).

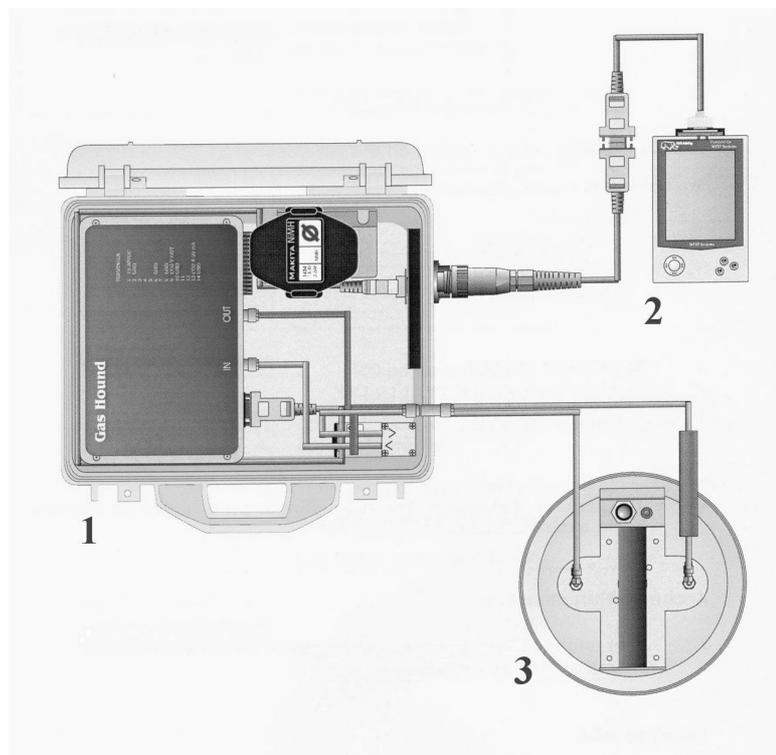


Fig. 2.1: I componenti della strumentazione per la misura del ϕCO_2 (dal Manuale della ditta costruttrice).

La strumentazione consiste in: uno spettrometro all'infrarosso (1 in Fig. 2.1); un computer palmare (2 in Fig. 2.1) fornito del software per la visualizzazione dell'andamento della $[\text{CO}_2]$ nel tempo e la registrazione dei dati; una camera d'accumulo (3 in Fig. 2.1) di dimensioni standard, della quale esistono due tipi con volumi differenti per la misura accurata di alti o bassi flussi con errori da -5 a +2 % (vd. il Manuale del flussometro portatile della Westsystems S.r.l.; *Release 4.00, May 2002*).

La camera d'accumulo viene poggiata al suolo in modo che l'aria atmosferica non possa penetrare all'interno (Fig. 2.2). Il gas che permea dal suolo, e che viene ad accumularsi nel volume interno, è aspirato ogni secondo da una pompa, convogliato allo spettrometro ad infrarossi, e reimpresso nella camera d'accumulo al fine di non abbassare la concentrazione dell'anidride carbonica.

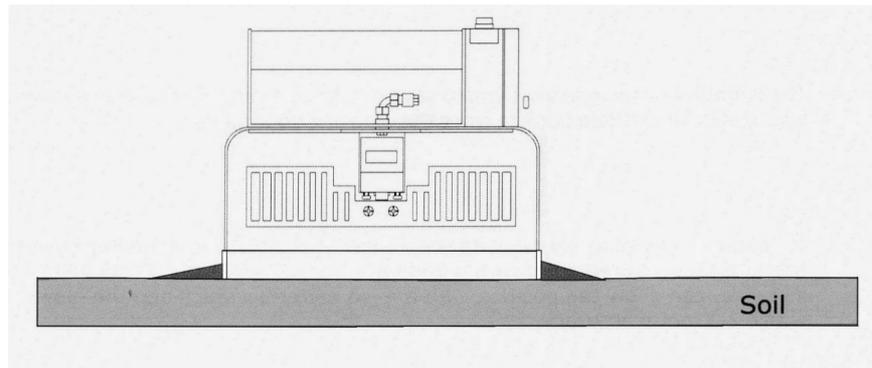


Fig. 2.2: Sezione verticale di una camera d'accumulo tipo (dal Manuale della ditta costruttrice).

Ogni secondo, quindi, lo spettrometro esegue la misura della concentrazione del gas accumulatosi nel volume noto della camera d'accumulo.

Queste misure vengono interfacciate graficamente dal computer palmare, il quale mostra un grafico della concentrazione crescente rispetto al tempo, espressa in ppm/s. Il software fornisce, quindi, una visualizzazione immediata dell'accumulo di anidride carbonica, e permette di calcolare la pendenza della curva $[CO_2]$ vs. tempo che è proporzionale al flusso a meno di una costante funzione dei volumi interni del sistema e del peso molecolare della specie gassosa che si deve misurare.

La misura del flusso di anidride carbonica con la camera d'accumulo non richiede la conoscenza delle caratteristiche del suolo, anzi può contribuire a distinguere tra zone più o meno permeabili per fatturazione o per porosità.

I parametri ambientali, in particolare l'umidità del suolo e la pressione atmosferica, hanno notevole influenza sul flusso di gas. Infatti poiché il contributo del flusso viscoso al ϕ_{tot} è elevato in aree vulcaniche, la pressione atmosferica ha un effetto non trascurabile sui valori di flusso (Clements & Wilkening, 1974; Chiodini et al., 1998). Misure di flusso di CO_2 dagli stessi punti, ripetute sotto differenti condizioni barometriche, hanno mostrato una correlazione negativa tra p_{atm} e ϕ_{CO_2} . Il flusso di gas è sensibile in particolare a rapide variazioni della pressione atmosferica (Chiodini et al., 1998). La rapidità con cui è possibile eseguire ogni singola misura di flusso (di norma 1 o 2 minuti) consente però di effettuare campagne di misura su ampi areali in tempi relativamente brevi, ovviando così alle variazioni ambientali e consentendo di stimare il flusso totale di gas emesso dal suolo. Esistono tecniche geostatistiche per la miglior stima della variabile locale attraverso variogrammi e kriging (es. Clark, 2001; Pannatier, 1996), consentendo quindi di investigare i processi che agiscono sul fenomeno del degassamento dal suolo quali i) la sua distribuzione spaziale e ii) la distribuzione spaziale di faglie e fratture.

2.1.2. Le misure con stazione automatica di monitoraggio

La stazione di monitoraggio del flusso di CO₂ è un adattamento completamente automatico della strumentazione portatile ad infrarossi sopra descritta. La stazione misura il flusso di gas dal suolo assieme alla concentrazione in aria di CO₂ e H₂S e a parametri ambientali rilevanti (temperatura, umidità e pressione dell'atmosfera; temperatura ed umidità del suolo; direzione e velocità del vento) ad intervalli regolari prefissati (in genere di 60 minuti) (Fig. 2.3).

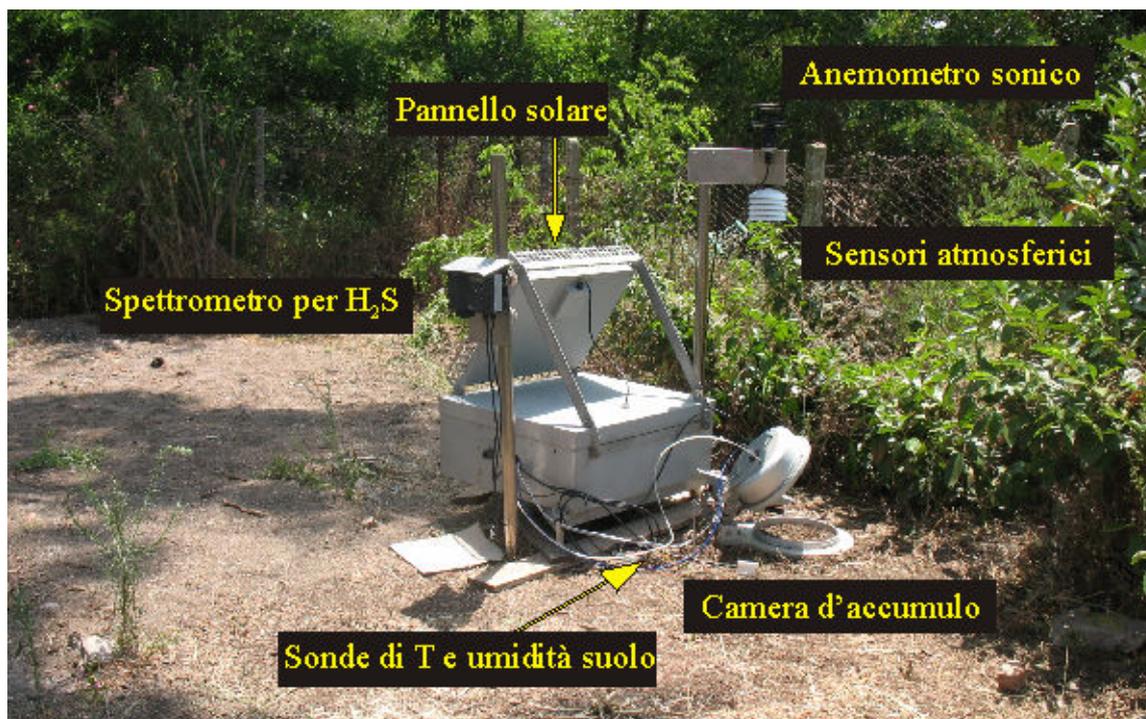


Fig. 2.3. Stazione automatica di misura del flusso di CO₂ dal suolo. All'interno del box sono alloggiati l'hardware per la gestione dei sensori, lo spettrometro per la CO₂ e la batteria ricaricabile col pannello solare. La concentrazione in aria di CO₂ è misurata attraverso la camera d'accumulo.

Attualmente ci sono molte stazioni di questo tipo che operano in aree vulcaniche del mondo per la sorveglianza geochimica dell'attività. Soltanto in Italia sono attive due stazioni al Vesuvio e ai Campi Flegrei (Granieri et al., 2003), quattro stazioni a Stromboli (Carapezza et al., 2008b), una stazione a Vulcano, oltre alla stazione dei Colli Albani.

I suddetti parametri ambientali sono misurati contestualmente al flusso, poiché essi influiscono su di esso, aumentando o riducendo il tasso di emissione di gas (Chiodini et al. 2001; Rogie et al., 2001; Carapezza & Granieri, 2004; Granieri et al. 2003; Badalamenti et al., 2004). In conseguenza di ciò, le misure automatiche richiedono un grosso sforzo di interpretazione e processamento statistico del dato per comprendere in che misura ogni parametro ambientale influenza il flusso al fine di riconoscere quali variazioni registrate

dalla stazione sono relative a dinamiche vulcano-tettoniche e quali variazioni sono dovute solamente a cambiamenti delle condizioni atmosferiche.

2.2. Misure di flusso viscoso di gas dal suolo e dall'acqua

La tecnica precedentemente descritta consente di misurare il flusso diffuso di gas dal suolo. Esiste però un altro meccanismo di trasporto di gas che, essendo correlato a gradienti di pressione dei gas nel suolo, è ben più efficiente: il flusso convettivo viscoso (Carapezza & Granieri, 2004). L'emissione di gas si verifica non in maniera diffusa su ampie superfici, ma in maniera discreta da singoli punti, ben visibili come fumarole o treni di bolle gorgoglianti dall'acqua in laghetti o pozze (*vent*). Il tasso di rilascio è generalmente molto alto e perciò non è possibile stimarlo con accuratezza con la camera d'accumulo.

In questa tesi si è sperimentato un nuovo metodo di misura: il gas che fuoriesce viscosamente dal suolo viene convogliato da una camera d'accumulo e tubi in PVC. La portata del gas viene misurata alla bocca dei tubi mediante un contatore di gas per uso civile oppure mediante un anemometro. (Fig. 2.4). In funzione della portata di ogni singolo *vent*, si è utilizzata una camera d'accumulo più o meno grande (un tratto di tubo in PVC del diametro interno di 16 cm, un secchio del diametro di 32 cm, oppure una camera d'accumulo quadrata di 140 cm di lato e 30 cm di altezza denominata "piattaforma galleggiante" -PG).



Fig. 2.4. Esempi dei vari sistemi di misura di flusso viscoso utilizzati in questa tesi. a) laPG equipaggiata con contatore di gas; b) laPG con anemometro; c) la PG su grande specchio d'acqua alla Solforata di Pomezia; d) il secchio da 30 cm equipaggiato col contatore di gas.

Anche l'uso di un contatore per gas o di un anemometro è conseguenza della portata di gas emesso: l'anemometro ha infatti un *range* di misura da 0,1 a 30 m/s; il contatore ha *range* da 0,06 a 10 m³/h. in questo modo si sono potuti misurare flussi di gas da 0,7 a più di 10.000 m³/giorno. Attraverso il campionamento dei gas e l'analisi chimica dei componenti principali, oppure misurando in campagna le concentrazioni con strumenti portatili (descritti in un paragrafo successivo) si determina la concentrazione delle specie e quindi il contributo al flusso totale misurato, in particolare il contributo di CO₂ e H₂S che sono i gas più abbondanti e pericolosi tra quelli emessi.

2.3. Misure di concentrazione di CO₂ e H₂S in aria

2.3.1. Misure con strumento portatile Dräger

Nel corso di questo triennio di ricerca, sono state eseguite numerose misure per la valutazione della pericolosità da rilascio di gas in aria sia all'aperto che in ambienti chiusi sui Colli Albani e a Vulcano. Sono state condotte campagne di misura delle concentrazioni in aria dei componenti più pericolosi dei gas (CO₂ e H₂S in prevalenza) utilizzando strumenti portatili multigas che generalmente vengono utilizzati in industria per la sicurezza del personale. A seguito di una comparazione degli strumenti esistenti sul mercato, per queste campagne è stato scelto lo spettrometro X-am 7000 della Dräger il quale consente di rilevare contemporaneamente la concentrazione di più gas essendo equipaggiato con sensori ad infrarossi (per CO₂ e CH₄) e con celle elettrochimiche (per H₂S, SO₂, O₂ e CO). Inoltre, il vantaggio dello strumento è quello di avere un fondo scala del 100 vol.% di CO₂, e di 500 ppm di H₂S, cosa che consente di misurare le elevate concentrazioni che spesso si rilevano sia all'aperto che all'interno di abitazioni (Fig. 2.5).



Fig. 2.5. a) Esempio di misura di concentrazione di gas in aria. b) Esempio della pericolosità che si può rilevare: lo strumento sta misurando in aria più di 3 % di CO₂ e più di 500 ppm di H₂S.

Lo strumento è infine dotato di datalogger che consente l'acquisizione in continuo ad intervalli prestabiliti di tempo.

Sono state effettuate campagne di misura di due tipi: i) su ampi settori sia all'aperto che al chiuso nei vani di insediamenti urbani in aree con un potenziale pericolo da gas; ii) in continuo, per intervalli di tempo più o meno lunghi, su punti individuati per la loro particolare pericolosità sia all'aperto che in ambienti chiusi abitati.

2.3.2. Misure con TDL

Il sistema del TDL (Tunable Diode Laser) è un'altra tecnologia, utilizzata finora in campo industriale, che è stata applicata con successo nel corso di questa ricerca per misurare la concentrazione del gas in aria. I laser TDL a temperatura ambiente emettono una sorgente luminosa nel campo del vicino infrarosso (NIR). Ogni gas, di interesse industriale (e di interesse vulcanologico, in questo caso), ha una propria caratteristica di assorbimento (lo spettro di assorbimento) che ha uno svariato numero di frequenze di assorbimento. Un TDL può venire "sintonizzato" per selezionare una singola frequenza che non si sovrappone con le linee di assorbimento degli altri gas, perciò questa tecnica di misura è completamente priva di problemi di interferenza. La natura monocromatica della sorgente laser permette inoltre di avere una risposta di tipo lineare su un'ampia gamma di concentrazione.

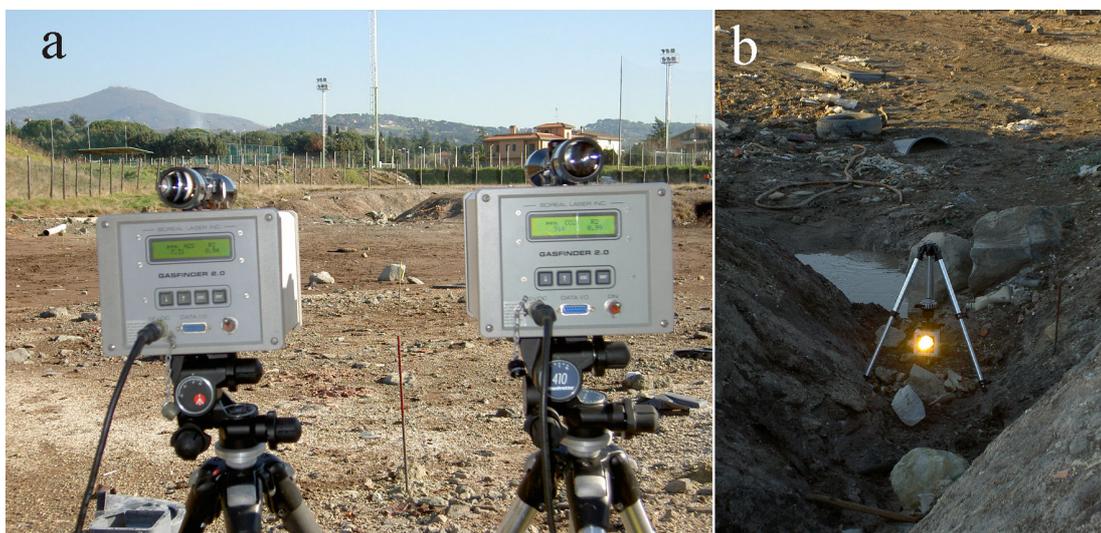


Fig. 2.6. Immagini del sistema TDL per la misura delle concentrazioni di CO_2 e H_2S in aria. a) due strumenti TDL dotati di trasmettitore e ricevitore laser; b) il retroriflettore del raggio laser.

La tecnica TDL (Fig. 2.6) è stata applicata ai Colli Albani e a Vulcano in collaborazione con ricercatori dell'Università di Düsseldorf per lo studio delle variazioni delle concentrazioni di CO_2 e H_2S in aria. Ai Colli Albani sono stati indagati in due settori, Cava

dei Selci e Solforata di Pomezia, caratterizzati da elevato tasso di rilascio e ingente accumulo di gas al suolo, con conseguente generazione di condizioni di elevata pericolosità per persone e animali.

2.4. Misure del flusso di SO₂ dai vulcani con tecnica miniDOAS

Le misure del flusso di SO₂ emesso dal plume craterico o dai campi fumarolici dei vulcani sono uno strumento importante per comprendere e definire l'attività vulcanica, con ricadute sia sul monitoraggio che sulla definizione degli effetti ambientali (in particolare sulla salute) dei gas emessi. Per parecchi decenni il metodo più utilizzato è stato il COSPEC: uno spettrometro posto a terra o su mezzi aerei che misura l'assorbimento di ultravioletto emesso dal sole da parte della SO₂ presente in un plume o in un campo fumarolico; operando trasversalmente alla direzione di trasporto del gas e conoscendone la velocità media, è possibile stimarne il flusso totale (Stoiber et al., 1983).

In alternativa al COSPEC, sono stati recentemente utilizzati sistemi, denominati *differential optical absorption spectroscopy* (DOAS), che presentano vantaggi quali la possibilità di misurare altri gas atmosferici in traccia oltre a SO₂ (Edner et al., 1994; Weibring et al., 1998). La tecnica del miniDOAS (Fig. 2.7) aggiunge la facilità e l'economia di esercizio poiché si utilizzano strumenti a basso costo e si possono eseguire misure sia da piattaforme automatizzate, sia semplicemente camminando attraverso i plume (Galle et al., 2002; McGonigle et al., 2002).

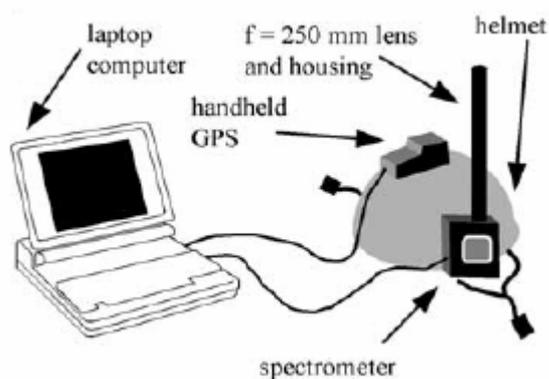


Fig. 2.7. Configurazione schematica del sistema miniDOAS portatile (da McGonigle et al., 2002)

In questo lavoro di dottorato è stato usato a Vulcano uno strumento USB2000, della Ocean Optics, con risoluzione di circa 0,6 nm nell'intervallo di spettro da 245 a 380 nm. In contemporanea vengono acquisiti i dati relativi alla posizione ed alla velocità di spostamento con un GPS portatile. Gli strumenti sono collegati ad un computer portatile per la gestione dei dati in continuo (Fig. 2.7). I dati relativi a direzione e velocità del vento vengono acquisiti da

una stazione meteorologica della DAVIS Instruments installata allo scopo in prossimità della zona di misura.

2.5. Misure dei parametri chimico-fisici delle acque

Le acque, marine, lacustri, di pozzo, etc., possono essere monitorate nei loro parametri chimico-fisici di temperatura, pH, ossigeno disciolto ed Eh lungo profili verticali mediante sonde multiparametriche. Per questa tesi di Dottorato si è utilizzata una sonda OCEAN SEVEN 316Plus costruita dalla ditta italiana Idronaut S.r.l. (Fig. 2.8) scelta per le sue elevate prestazioni sia in termini di affidabilità dei sensori che dei componenti tecnici.



Fig. 2.8. Sonda multiparametrica Idronaut Ocean Seven 316Plus.

Lo strumento è equipaggiato con sensori per la misura di pressione (profondità), temperatura, pH, O₂ disciolto, Eh, conducibilità, salinità. Le precisioni nominali dei sensori sono le seguenti: P= ± 5 mbar (= $\pm 0,05$ m di profondità); T= $\pm 0,02$ °C; O₂= $\pm 6,3$ $\mu\text{mol/l}$; pH= $\pm 0,05$ unità di pH; Eh= ± 20 mS/cm. Un microprocessore interno alla sonda riceve i segnali analogici dei sensori ogni 29 ms, li converte in segnali digitali e li registra su un datalogger.

Le misurazioni possono svolgersi ad intervalli regolari (scelti in funzione del tempo od anche della profondità) oppure in continuo. Con questa tecnica è possibile, quindi, i) eseguire in breve tempo più profili verticali in vari siti di uno specchio d'acqua, un lago craterico ad es., così da ricostruirne tridimensionalmente le caratteristiche chimico-fisiche; ii) lasciare la sonda in registrazione continua in un punto per individuare eventuali variazioni nel tempo dei parametri suddetti dovute a dinamiche endogene, ad es. risalita di fluidi idrotermali o vulcanici in associazione a crisi sismiche o vulcaniche.

2.6. Analisi chimiche e isotopiche di acque e gas

Contemporaneamente alle prospezioni di flusso di gas dal suolo, alle misure di concentrazione dei gas in aria ed ai profili multiparametrici in acqua, sono stati prelevati campioni di gas dal suolo, di acque del lago e dei gas disciolti. Le acque sono state campionate a varie profondità per le analisi chimiche dei componenti principali, di alcuni elementi in traccia e dei gas in esse disciolti. Per il campionamento delle acque profonde si è utilizzato un tubo di polietilene di 4 mm di diametro attaccato alla sonda multiparametrica così da tenerlo vicino ai sensori immersi. L'acqua è stata lentamente aspirata in superficie con una pompa manuale per vuoto, per evitare la diminuzione di pressione con la risalita del fluido e l'essoluzione dei gas disciolti. I campioni sono stati raccolti dopo aver lavato più volte la linea per evitare contaminazioni con acque più superficiali. I campioni per i componenti maggiori, minori ed in traccia sono stati raccolti sia tal quali che filtrati-acidificati (filtro da 0,45 µm; HCl 1:1) in flaconi di polietilene. L'alcalinità totale è stata misurata in situ con titolazione. L'H₂S disciolto è stato misurato in situ con metodo colorimetrico al blu di metilene. I campioni per la concentrazione dei gas disciolti sono stati invece raccolti in bottiglie con vuoto equipaggiate con valvola a tre vie agganciata alla terminazione in superficie del tubo di polietilene. In questo modo si consente all'acqua sollevata dalla pompa manuale di riempire le bottiglie per circa quattro quinti senza contaminazione o depressurizzazione. I campioni sono stati successivamente analizzati nei laboratori dell'IGG-CNR di Pisa per i componenti maggiori, minori e in traccia (Li, Na, K, Mg, Ca, Fe, Mn, Cl, SO₄, NO₃, B, SiO₂), e per le pressioni parziali di CO₂, CH₄, N₂, O₂ e Ar contenuti nello spazio di testa, e nei laboratori dell'INGV di Palermo per gli isotopi.

I campioni di gas dal suolo sono stati invece prelevati o con un fioretto infisso a circa 50 cm di profondità nel terreno secco, o con un imbuto parzialmente sommerso in punti d'acqua attraversati da treni di bolle di gas gorgogliante, e raccolti in campionatori di

vetro. Nei laboratori dell'INGV di Palermo sono state svolte le analisi chimiche (CO_2 , CH_4 , N_2 , etc.) e isotopiche ($\delta^{13}\text{C}$ e $^3\text{He}/^4\text{He}$).

3.1. Inquadramento geologico-strutturale

L'Italia centrale è caratterizzata dalla presenza di una serie di distretti vulcanici Plio-quaternari, sviluppatasi lungo la piattaforma continentale, dalla Toscana alla Campania, al margine nord-orientale del bacino tirrenico (Fig. 3.1). Questi complessi vulcanici presentano una grande varietà di materiali emessi, attività eruttiva, morfologie e strutture, in relazione alle modalità di risalita dei magmi nella crosta continentale appenninica, complessa per la struttura e le litologie che la costituiscono (Trigila et al., 1991).



Fig. 3.1: Schema geologico-strutturale del margine tirrenico dell'Italia centrale (da Acocella & Funicello, 2002).

Lungo il margine tirrenico del Lazio, il vulcanismo si può suddividere in due gruppi principali (Fig. 3.1) per via sia di chimismi differenti, che di una migrazione spaziale e

temporale delle attività (Serri et al., 1991): del Plio-Pleistocene, infatti, è il gruppo più occidentale dei Cimini, dei Ceriti e di Tolfa, a carattere felsico (De Rita et al., 1994) con affinità petrochimica con la Provincia Magmatica Toscana; l'altro gruppo (Vulsini, Vico, Sabatini, Albani, Ernici) è attivo dal Pleistocene superiore con carattere alcalino-potassico ed eruzioni prevalentemente esplosive (De Rita et al., 1995a), e appartiene alla Provincia Comagmatica Romana insieme con i vulcani attivi napoletani (Washington, 1906).

Per la loro posizione geografica, strategica alla nascita ed allo sviluppo della civiltà di Roma, i Colli Albani sono da sempre considerati il Vulcano Laziale (Sabatini, 1900).

L'area dei Colli Albani, e quella della Provincia Comagmatica Romana in generale, sono caratterizzate dalla sovrapposizione di differenti stili tettonici che seguono la strutturazione del tratto centrale della catena appenninica (Parotto & Praturlon, 1975) dove le coperture sedimentarie Meso-cenozoiche furono sovrapposte lungo direttrici tettoniche ad andamento NW-SE nell'intervallo Tortoniano-Messiniano p.p. (Fig. 3.1).

Dal Messiniano superiore al Pliocene inferiore, associata a questo raccorciamento crostale, è dovuta a un riequilibrio gravitativo, si sviluppa una fase pene-contemporanea distensiva che riutilizza parte delle discontinuità tettoniche preesistenti (Salvini, 1991; Faccenna et al., 1994b). Ne consegue che il margine tirrenico laziale è caratterizzato da una serie di alti e bassi strutturali, sia affioranti che sepolti, che producono anche vistose anomalie gravimetriche (Fig. 3.2. Toro, 1978; Di Filippo & Toro, 1995), limitati principalmente da faglie bordiere a direzione appenninica e vergenza sud-occidentale, colmati da sedimenti clastici (Mariani & Prato, 1988; Faccenna et al., 1994a).

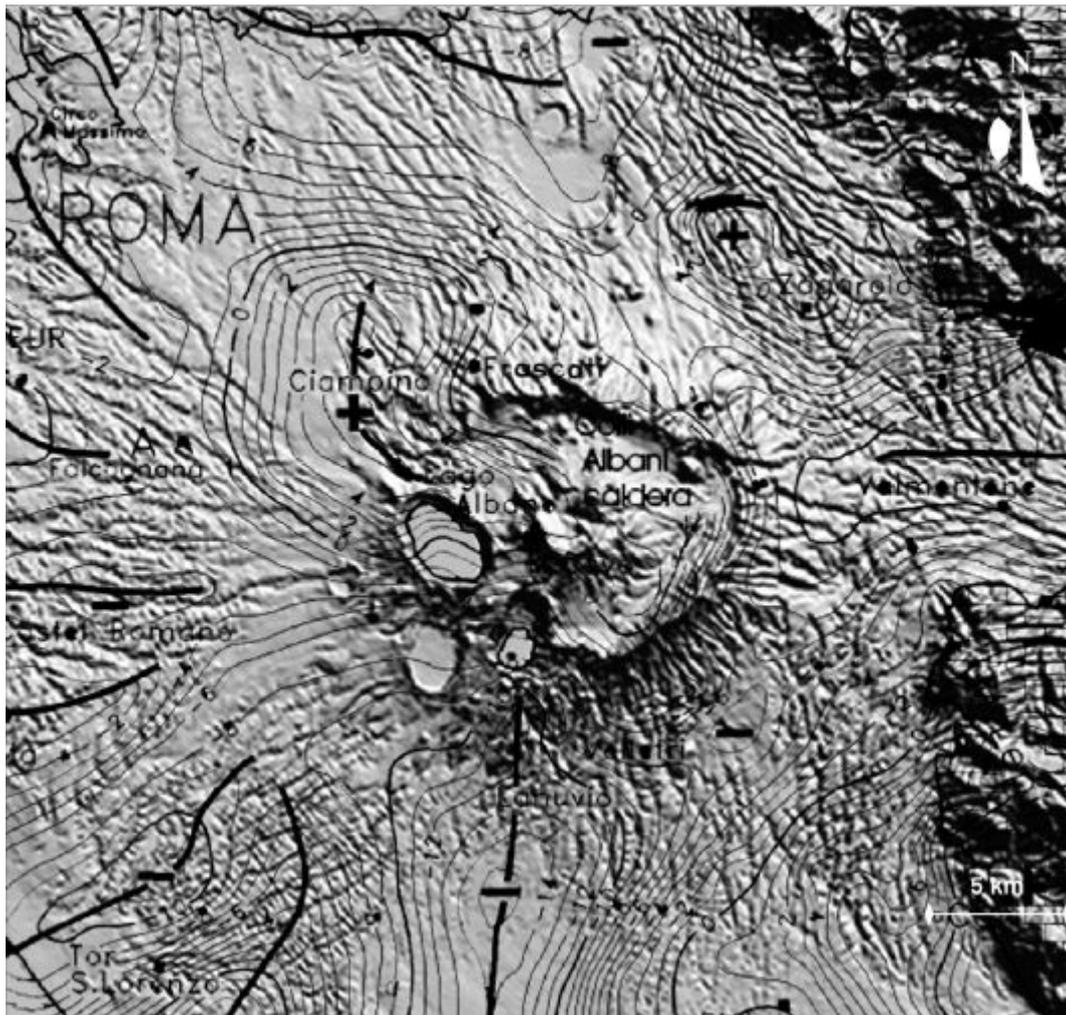


Fig. 3.2: Colli Albani. Mappa delle anomalie residue di Bouguer con intervallo di 1 mgal (da Di Filippo & Toro, 1995) sovrapposta al DEM del vulcano (da Giordano et al., 2006) che mostra la relazione tra strutture profonde e i lineamenti morfologici principali. Da notare che la caldera dei Colli Albani ed i crateri di Albano si sviluppano in corrispondenza della terminazione sudorientale dell'alto gravimetrico di Ciampino, dovuto alla presenza del tetto della successione carbonatica Meso-cenozoica a basse profondità (< 1 km).

La continuità di queste strutture si interrompe in corrispondenza di linee tettoniche che bordano bacini subsidenti trasversali a tutto il margine tirrenico (Funiciello et al., 1976). Queste strutture sono attive contemporaneamente e rappresenterebbero la risposta ad un processo di trasferimento che accompagna la formazione dei bacini NW-SE (vd. ad es. Bartole et al., 1991).

La fase tettonica successiva si presenta più complessa della precedente: sul terreno si rinvencono sistemi anche coniugati di faglie inverse, faglie trascorrenti N-S, NW-SE ed E-W (Parotto & Praturlon, 1975; Castellarin et al., 1978; Salvini, 1991).

I lineamenti tettonici più evidenti nell'area romana sono la linea "Olevano-Antrodoco" che accavalla termini della Successione Sabina a quelli della Piattaforma carbonatica laziale-

abruzzese con vergenze orientali (Castellarin et al., 1978; Salvini, 1991), e faglie trascorrenti destre che portano alla rotazione di blocchi (Mattei et al., 1991) ed al sollevamento od alla subsidenza (es. Acque Albule: Faccenna et al., 1994c) di settori crostali.

Questi elementi trascorrenti sono rimasti attivi durante il Pleistocene superiore sino al limite con l'Olocene (Funiciello et al., 1992; Faccenna et al., 1994c; De Rita et al., 1995a) e secondo diversi autori sono tuttora da considerarsi sistemi capaci di riattivazione con generazione di terremoti che possono risentirsi anche nell'area romana (Gasparini et al., 1991; Pantosti & Velonà, 1991; Funiciello et al., 1992).

I lineamenti suddetti presentano caratteri comuni in quanto risultano tutti segmentati *en-échelon*; rappresentano tutti vie preferenziali di risalita di fluidi profondi, con risorgenze termali, manifestazioni gassose, deposizione locale di travertini e sviluppo di *sink-holes*. Essi generano zone di estensione crostale e decompressione all'intersezione con le altre due direttrici regionali NW-SE e NE-SW, facilitando la risalita dei magmi verso la superficie (Faccenna et al., 1994c).

Altri autori riconoscono come ancora attive sia la direttrice regionale meridiana che quella appenninica (Gasparini et al., 1991; Marra, 2001), sulla base principalmente dei meccanismi focali dei terremoti.

Altri autori ancora ricostruiscono, sulla base sia di dati sismici (Amato et al., 1993; Amato & Chiarabba, 1995b) sia dell'analisi dei *breakout* in pozzi (Amato et al., 1995; Montone et al., 1995), l'attuale campo di stress regionale delle aree vulcaniche laziali, ed indicano come unicamente attiva una generale estensione NE-SW.

3.2. Storia eruttiva

La storia eruttiva dei Colli Albani è generalmente suddivisa in tre fasi principali di attività (De Rita et al., 1988) tutte caratterizzate da prodotti appartenenti ad una serie magmatica alta in potassio e con un contenuto in silice inferiore al 50% (Fornaseri et al., 1963; Trigila et al., 1995):

- la fase del Tuscolano-Artemisio che portò alla messa in posto della parte più voluminosa dei depositi vulcanici (circa 283 km³ su un totale di 290 km³) attraverso diverse eruzioni ignimbriche, in un intervallo compreso tra meno di 600.000 e 350.000 anni (De Rita et al., 2002).

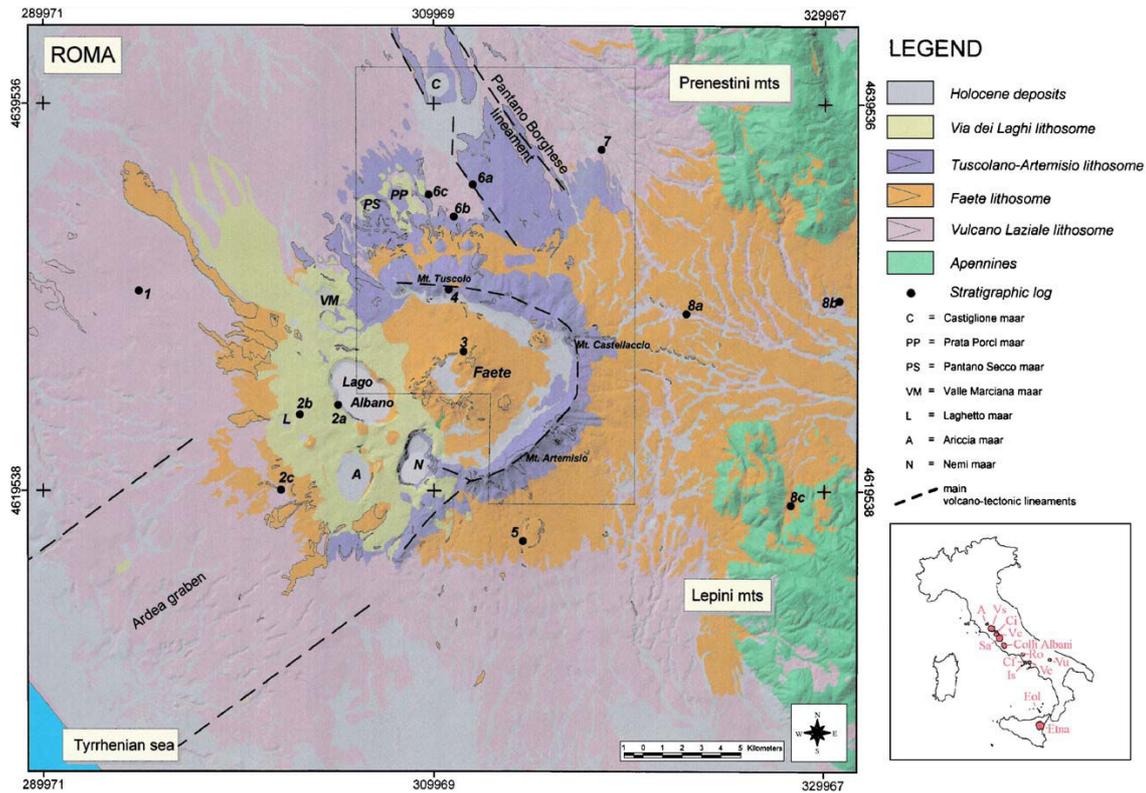


Fig. 3.3. Mappa geologica schematica dei Colli Albani (da Giordano et al., 2006).

- la fase delle Faete (o dei Campi di Annibale) la cui attività si concentrò all'interno della caldera collassata al termine della fase precedente (De Rita et al., 1995a) in un intervallo temporale tra 0,35 e 0,27 Ma.

- la fase idromagmatica finale, protrattasi fino a circa 5.800 anni fa (Funciello et al., 2002).

Quest'ultima fase di attività si sviluppa attraverso varie esplosioni freatomagmatiche da diversi crateri, presenti principalmente nel settore occidentale e subordinatamente in quello settentrionale (De Rita et al., 1995a). Tutti i crateri sono dei *maar* e dei *tuff ring* costruiti da *surge* piroclastici, sia secchi che bagnati, e da *lahar* (De Rita et al., 1988, 1995a; Funciello et al., 2002). I centri principali sono Nemi, dalla morfologia ricollegabile alla coalescenza di due crateri allineati circa N-S, e Albano (Fig. 3.4) in cui si riconoscono almeno cinque crateri coalescenti allineati lungo la discontinuità regionale NW-SE (De Rita et al., 1995a; Anzidei et al., 2008).

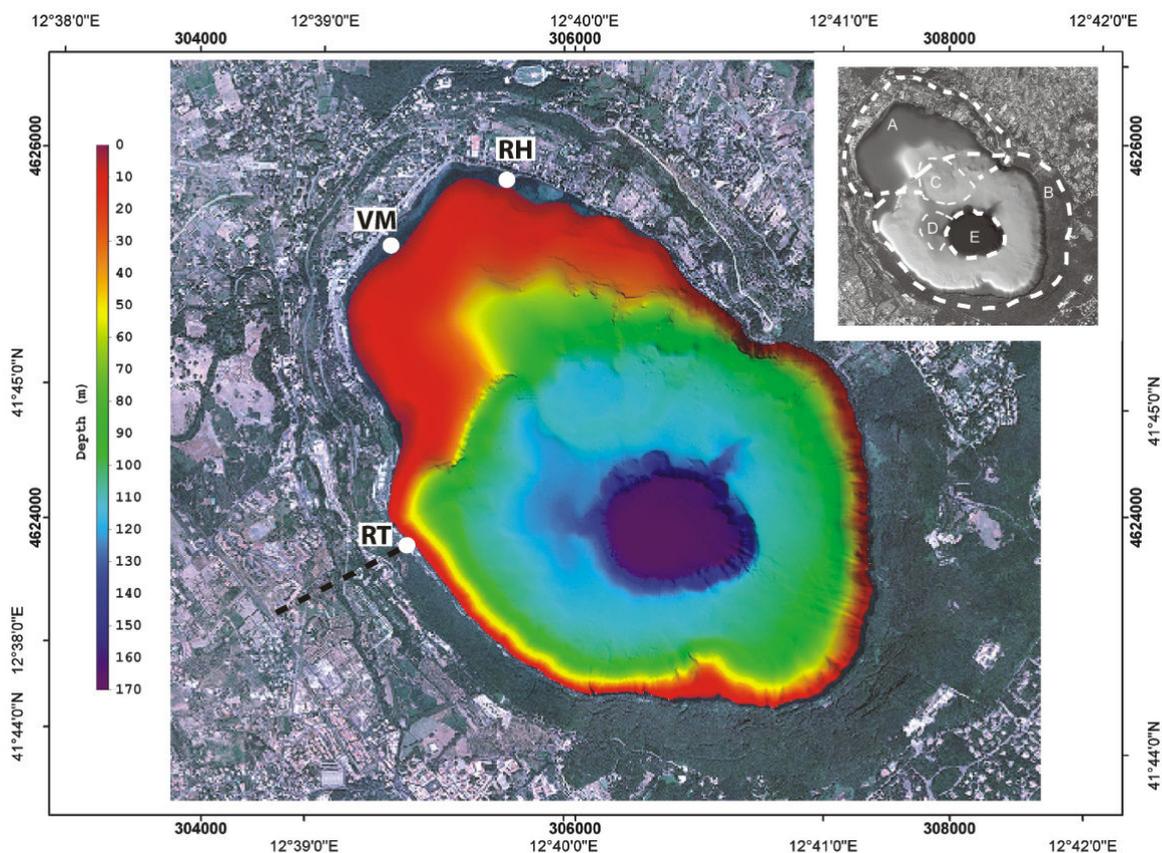


Fig. 3.4. Mappa digitale del fondo del Lago Albano (da Anzidei et al., 2008). RH: porto romano del II Sec. a.C.; VM: Villaggio delle Macine, sito archeologico del Bronzo Medio; RT: tunnel di drenaggio del 394 a.C. Nel riquadro si evidenziano i margini dei crateri.

Il Lago Albano è inoltre il più recente dei crateri di questa ultima fase, (infatti ha un fondale piuttosto imbutiforme; Fig. 3.4). I depositi alla base della sequenza di Albano sono datati 69 ± 1 ka. L'età dei depositi più recenti è dibattuta. Il set più recente di determinazioni Ar/Ar si concentra attorno a 36 ± 1 ka (Freda et al., 2006); Funicello et al. (2002) hanno rinvenuto una successione di depositi prodotta da ripetute esondazioni del lago verso Nord (Formazione del Tavolato) il cui deposito più giovane è datato tra 23 ± 7 ka (datazione U/Th di deposito carbonatico fluviale; Soligo et al., 2002) e $5,8 \pm 0,1$ ka (datazione al ^{14}C di paleosuolo; Funicello et al., 2002).

3.3. Idrogeologia e geochimica delle acque

Il sistema idrogeologico dei Colli Albani copre un'area di circa 1500 km^3 (Boni et al., 1979) dalla costa tirrenica tra Ostia ed Anzio, passando a Nord per i limiti idrografici dei fiumi Tevere ed Aniene, costeggiando ad oriente i rilievi dell'Appennino centrale fino alla Pianura Pontina (Fig. 3.5).

La topografia di quest'area ha un culmine nello strato-vulcano del Maschio delle Faete, e decresce parabolicamente verso la periferia. Quasi il 60% dell'area, infatti, ha un'elevazione compresa tra 100 e 200 m s.l.m. (Boni et al., 1995).

Il sistema idrografico è circa radiale e numerose aste fluviali scendono lungo i versanti extracalderici. Esistono, inoltre, alcune depressioni, conseguenza di esplosioni freatomagmatiche del ciclo finale dei Colli Albani, divenute bacini lacustri (Boni et al., 1995).

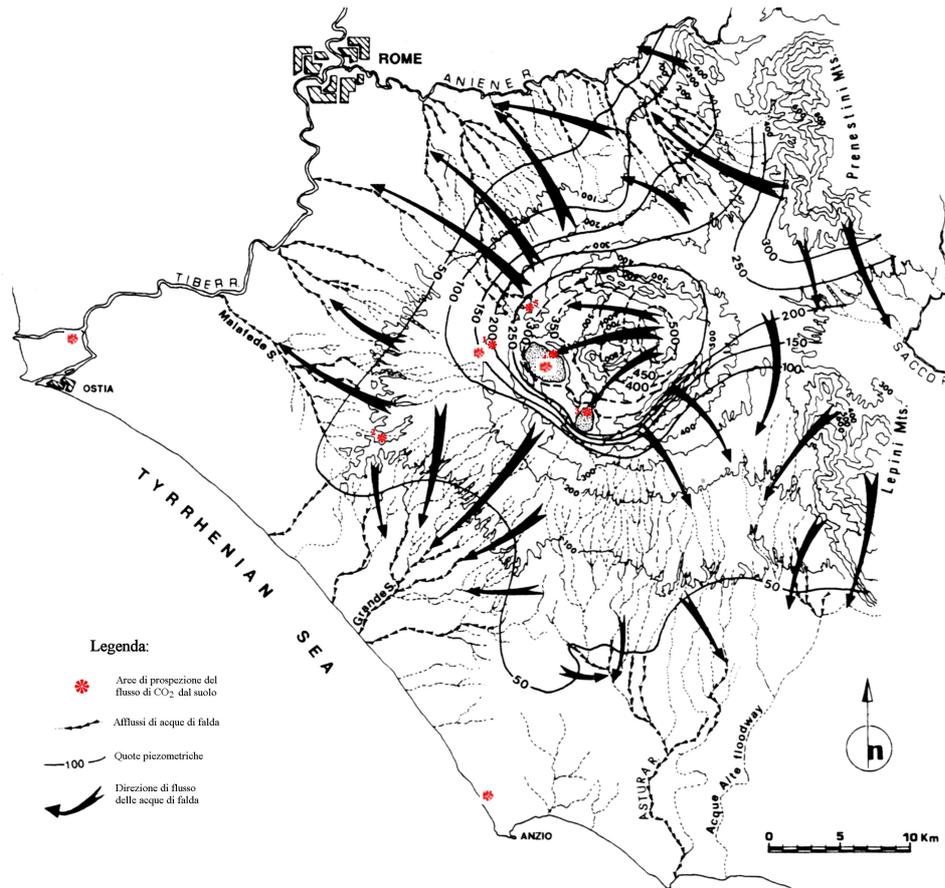


Fig. 3.5: Schema idrogeologico ed idrologico del complesso vulcanico dei Colli Albani (mod. da Boni et al., 1995) con la localizzazione delle aree in cui si sono svolte le prospezioni geochimiche di questa ricerca.

Lo studio delle caratteristiche litostratigrafiche del sottosuolo del complesso vulcanico consente la distinzione di tre complessi idrogeologici (Boni et al., 1979):

il complesso basale calcareo-siliceo-marnoso è costituito da facies liassiche di transizione della Serie Sabina fortemente tettonizzate;

il complesso argilloso-marnoso è costituito da depositi trasgressivi Plio-pleistocenici a bassa permeabilità che fungono da *aquiclude* alla falda di base;

il complesso vulcanico dei Colli Albani consiste in una grande varietà verticale e laterale di litotipi dalle caratteristiche di permeabilità molto complesse, la quale cosa lo rende un

acquifero multistrato con due differenti modalità di circolazione sotterranea (una intracalderica centripeta; ed una extracalderica centrifuga).

Dall'analisi del bilancio idrologico si è ricavato, inoltre, che la struttura albana è praticamente un sistema isolato idraulicamente dall'*aquiclude* argilloso-marnoso, e ricaricato dalle precipitazioni che si verificano sull'area (Boni et al., 1995).

L'area intracalderica è bordata dalla cinta del Tuscolano-Artemisio e costituita per buona parte da depositi idromagmatici ed epiclastici alluviali con scarsa capacità di infiltrazione ed immagazzinamento. Da questo acquifero sospeso sgorgano diverse sorgenti, soprattutto lungo il bordo occidentale (Boni et al., 1979).

L'unità idrogeologica extracalderica ha un flusso sotterraneo centrifugo attraverso un acquifero multi-strato che rifornisce le aste fluviali del sistema di drenaggio superficiale (Boni et al., 1979).

La complessità della circolazione nel sottosuolo è elevata e si rispecchia nella variabilità delle composizioni chimiche delle acque di sorgenti, che di pozzi e pozze superficiali. La classificazione chimica effettuata da Boni et al. (1979, 1980, 1995) ha portato a riconoscere i seguenti tipi:

a): acque bicarbonate alcalino-terrose, acque alcalino-terrose, acque bicarbonato-alcaline (generalmente di salinità < 1,2 g/l): cioè acque bicarbonate circolanti in acquiferi carsici superficiali, ed acque legate ad una circolazione superficiale e rapida negli acquiferi vulcanici con debole lisciviazione di sodio e potassio;

b): acque bicarbonate alcalino-terrose e solfate ($1,2 < \text{salinità} < 2,5$ g/l): acque da circolazione profonda in acquiferi carsici freddi (arricchite in solfato calcico per lisciviazione delle evaporiti triassiche) e termali (arricchite in cloruro sodico);

c): acque cloruro-alcaline: acque derivanti dal miscelamento di acque meteoriche superficiali ed acque marine fossili intrappolate nei sedimenti della Pianura Pontina;

d): acque solfato-acide: acque dal pH basso (generalmente tra 2,2 e 4,1) di pozze associate ad emissioni gassose (Cava dei Selci, Solforata, Lavinio, Grotta Dauni). Queste acque localmente alterano le rocce incassanti e portano in soluzione alcali e terre alcaline (spesso ferro o alluminio).

Un importante elemento idrologico ed idrogeologico dei Colli Albani è rappresentato dal Lago Albano (con un volume di circa $447,5 \times 10^6$ m³; Anzidei et al., 2008) e dal Lago di Nemi. Le acque dei laghi sono sottosature rispetto ai componenti principali e secondari, tipicamente derivanti da interazione dell'acqua con le vulcaniti albane. Le concentrazioni

di anioni e cationi sono comunque simili a quelle delle acque di falda circolanti nell'edificio (Cioni et al., 2003; Carapezza et al., 2008a).

Quindi, in base ai dati geochimici non c'è evidenza di scambio tra acquiferi profondi carsici ed acquiferi superficiali in rocce vulcaniche, se non in poche aree. La composizione chimica è prevalentemente dovuta a processi superficiali di lisciviazione da parte di acque arricchite da fasi gassose di origine profonda (Boni et al., 1980).

3.4. Geochimica dei gas

La risalita di gas alla superficie è osservabile in molte zone dell'edificio vulcanico in corrispondenza di sistemi di faglie o fratture. La composizione dei gas emessi da vari siti è sostanzialmente simile (Tab. 3.1): il componente principale è la CO₂, seguita da N₂ tranne che a Lavinio e Cava dei Selci dove il secondo componente è l'H₂S (Giggenbach et al., 1988; Chiodini & Frondini, 2001; Carapezza et al., 2003, 2005; Barberi et al., 2007; Carapezza & Tarchini, 2007). Il contenuto in metano è sempre abbastanza basso a suggerire l'assenza di una importante componente organica sedimentaria nei gas. La bassissima percentuale e la sovente assenza di H₂ nei gas indica tempi prolungati di residenza dei volatili in ambienti superficiali freddi (<150 °C) ed ossidanti (Giggenbach et al., 1988); questa ipotesi è confortata anche dalla composizione degli idrocarburi gassosi che non presenta quantità rilevabili di etilene, propilene e benzene come ci si aspetterebbe in associazioni vulcanico-magmatiche (Nehring & Truesdell, 1978; Giggenbach et al., 1988).

La composizione isotopica del carbonio della CO₂ ($\delta^{13}\text{C CO}_2$ da -3,25 a 1,9 ‰ vs. PBD; Carapezza & Tarchini, 2007) ricade nell'intervallo delle manifestazioni naturali a gas delle aree vulcaniche e geotermiche dell'Italia centrale (Lazio e Toscana) (Minissale et al., 1997). I valori superiori a 1,30 ‰ vs. PBD sono più positivi di quelli dei gas fumarolici dei vulcani attivi dell'Italia meridionale (Capasso et al., 1997; Tedesco, 1997; Giammanco et al., 1998; Parello et al., 2000; Federico et al., 2002) suggerendo un possibile coinvolgimento di carbonati marini ($\delta^{13}\text{C} =$ da -1 a +2 ‰; Craig, 1963) nella generazione della CO₂ dei Colli Albani (Carapezza & Tarchini, 2007).

Importante per la definizione dell'origine dei gas è la composizione isotopica dell'elio ($^3\text{He}/^4\text{He} =$ 0,9-1,9 R/Ra; Carapezza & Tarchini, 2007). Alcuni studi sulla composizione isotopica dei gas fumarolici delle aree vulcaniche e geotermiche italiane hanno mostrato un trend a decrescere nel rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ ed un simultaneo aumento del $\delta^{13}\text{C CO}_2$ da Sud verso Nord (Hooker et al., 1985; Tedesco et al., 1990; Minissale et al., 1997; Tedesco,

1997; Parello et al., 2000; Federico et al., 2002). Ciò è stato attribuito ad un maggior contributo di crosta continentale nella genesi dei magmi. Anche lo studio geochimico dei componenti maggiori ed in traccia dei prodotti eruttivi ha fornito analoghe evidenze di un contributo crescente della contaminazione crostale spostandosi verso Nord, dovuto o a risalita di fluidi derivanti da uno slab in subduzione o a processi di mixing tra crosta subdotta e un mantello parzialmente impoverito (Ellam et al., 1989; Peccerillo & Panza, 1999; Gasperini et al., 2002).

Uno studio sistematico del rapporto $^3\text{He}/^4\text{He}$ delle inclusioni fluide in olivine e clinopirosseni di lave e piroclastiti della Provincia Comagmatica Romana (Martelli et al., 2004) ha confermato questa tendenza a decrescere verso Nord nei valori di R/Ra dell'elio delle vulcaniti, e ha mostrato che i valori più alti di R/Ra misurati nei gas emessi da ogni complesso vulcanico sono simili a quelli misurati nelle inclusioni fluide dei fenocristalli delle rocce vulcaniche associate. In due campioni prelevati ai Colli Albani sono stati misurati rapporti $^3\text{He}/^4\text{He}$ pari a 1,17 e 1,73 Ra (Martelli et al., 2004). Questi sono valori simili o leggermente inferiori (1,90 R/Ra nei gas del pozzo di Valle Cupella) a quelli dei gas attualmente emessi (Carapezza & Tarchini, 2007) dai Colli Albani. Questo è sorprendente in quanto i rapporti R/Ra dovrebbero decrescere con la risalita alla superficie per il possibile mescolamento con fluidi più superficiali e più ricchi in elio radiogenico crostale o atmosferico. Ovviamente non si può escludere che nuove analisi dell'elio delle inclusioni fluide nelle vulcaniti più recenti dei Colli Albani possano dare valori di R/Ra più alti di quelli misurati da Martelli et al. (2004). Comunque i dati isotopici attualmente disponibili indicano chiaramente che i gas emessi dal complesso dei Colli Albani sono compatibili con un'origine prevalentemente magmatica o mantellica, con parte della CO_2 prodotta da decarbonatazione termometamorfica (Carapezza & Tarchini, 2007).

Tutti questi dati portano a formulare il modello idrogeologico-strutturale di Fig. 3.6.

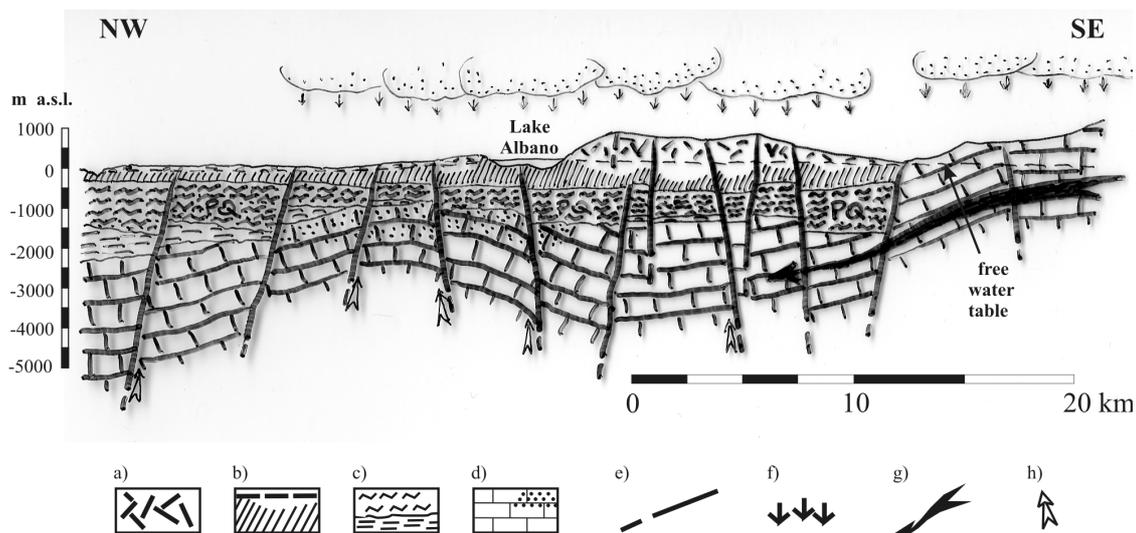


Fig. 3.6. Modello idrogeologico-strutturale dei Colli Albani con i principali circuiti delle acque di falda ed idrotermali (Carapezza & Tarchini, 2007; modificato da Boni et al., 1995). a) Vulcaniti; b) Acquiferi sospesi superficiali, localmente confinati e pressurizzati in vulcanite o sabbie Quaternarie; c) Aquiclude: flysch e marne Plio-Quaternarie (PQ); d) Principale acquifero regionale nei carbonati (i punti indicano la presenza di cappe gassose al tetto degli alti strutturali); e) Faglie; f) Ricarica meteorica verticale; g) Circuito in carbonati carsici o fratturati; h) Circuito idrotermale e zone di risalita dei gas.

I gas magmatici risalgono dal profondo lungo le faglie distensive che bordano gli alti strutturali. La CO_2 , componente dominante, è prevalentemente di origine magmatica o mantellica e parzialmente prodotta dalla decarbonatazione dei sedimenti del basamento carbonatico (come suggerito dai valori di $\delta^{13}C_{CO_2}$ -Carapezza & Tarchini, 2007- e dall'abbondanza di ejecta carbonatici nei prodotti piroclastici -Funciello & Parotto, 1978). Il tetto degli horst carbonatici sepolti è il principale sito di accumulo dei gas (come suggerito dalla presenza di *gas caps* frequentemente incontrati nell'esplorazione geotermica nelle aree vulcaniche del Lazio; Chiodini et al., 1995; Sabatelli & Mannari, 1995). In una successiva risalita verso la superficie lungo faglie, il gas si discioglie e si accumula in ogni acquifero confinato che incontra, sia nella sequenza sedimentaria (es. pozzo 203 a 200 m di profondità; ENEL, 1990. Pozzo CA1, INGV; Mariucci et al., 2008), sia nelle vulcaniti a piccole profondità (es. pozzo di Valle Cupella a 50 m; Carapezza & Tarchini, 2007), fin quasi alla superficie come a Cava dei Selci o alla Solforata di Pomezia, rivelando in ogni caso l'esistenza di una grossa struttura profonda degassante e creando localmente un forte pericolo da gas.

Nella Tab. 3.1 sono riportate le analisi chimiche e isotopiche di campioni selezionati delle emissioni gassose dei Colli Albani (compresi i gas emessi dai pozzi di Via di Valle Cupella, S. Maria delle Mole, Fiumicino) e delle analoghe emissioni dei Monti Sabatini.

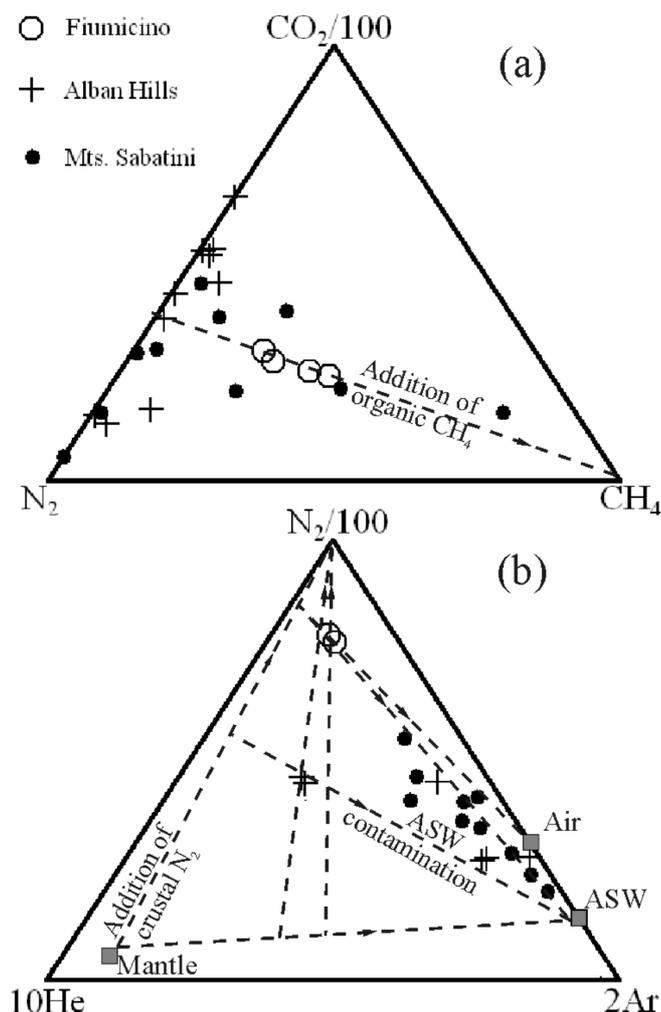


Fig. 3.6. Diagrammi triangolari di a) CO₂-N₂-CH₄, b) N₂-He-Ar dei gas emessi dal pozzo di Fiumicino, dai Colli Albani e dai M. Sabatini (da Barberi et al., 2007).

Nel diagramma ternario dei componenti principali (CO₂-N₂-CH₄; Fig. 3.7a) il trend dominante dei gas dell'Italia Centrale (Albani e Sabatini) è allineato vicino al lato CO₂-N₂. Se ne discosta il gas emesso dai pozzi di Fiumicino che appare arricchito in CH₄, così come qualche campione dei Sabatini. Il metano è particolarmente arricchito nel gas dei campi geotermici toscani (Larderello e Monte Amiata) e la sua origine è stata attribuita da Minissale et al. (1997) alla conversione termogenica della CO₂ all'interno dei serbatoi geotermici con temperature di 250-300 °C. Questa non può essere l'origine del metano di molte delle manifestazioni di gas dell'Italia Centrale, dove la T degli acquiferi carbonatici sepolti è intorno a 100-150 °C o più bassa. La composizione del gas di Fiumicino riflette

probabilmente l'aggiunta di metano di origine organica e di bassa temperatura al gas che risale dal profondo. Vi sono in effetti emissioni di CH_4 nel delta interno del Tevere. La linea tratteggiata nella Fig. 3.7a mostra che il gas di Fiumicino potrebbe ottenersi aggiungendo CH_4 a un gas profondo avente un rapporto CO_2/N_2 di 62, vicino a quello del gas della Solforata.

Nel diagramma triangolare N_2 -He-Ar di Fig. 3.7b il gas di Fiumicino è l'unico che ricade vicino al vertice N_2 , in una posizione considerata da Giggenbach (1991) rappresentativa di gas di vulcani andesitici di zone in subduzione attiva. Una tale origine è inverosimile per i gas "freddi" delle manifestazioni dell'Italia Centrale, il cui eccesso di N_2 (azoto non atmosferico) ha una probabile origine crostale dalle rocce metasedimentarie associate agli acquiferi profondi (Minissale et al., 1997). È comunque interessante osservare in Fig. 3.7b che la maggior parte dei gas dei Colli Albani e dei Monti Sabatini cadono su una possibile linea di mixing tra il gas di Fiumicino e la posizione dell'acqua satura in aria (ASW). Il gas di Fiumicino potrebbe derivare da aggiunta di N_2 crostale a un gas mantellico o comunque profondo.

Tab. 3.1. Analisi chimiche e isotopiche dei gas dei Colli Albani e dei Monti Sabatini

no.	Sito	T °C	CO ₂ vol. %	H ₂ S vol. %	CH ₄ vol. %	N ₂ vol. %	H ₂ ppm	He ppm	CO ppm	Ar vol. %	O ₂ vol. %	δ ¹³ C-CO ₂ ‰vs.PBD	³ He/ ⁴ He R/Ra	⁴ He/ ²⁰ Ne
<i>Colli Albani</i>														
1 ^e	Fiumicino pozzo	15.8	98.36	0.001*	0.75	1.56	nd	1.74	nd	na	0.017	-1.55	0.314	43.87
2 ^e	S. M. delle Mole pozzo		94.49	0.0004*	0.25	5.92	71	43	550	0.015	0.00103	-0.53	0.89	194.40
3 ^a	Acqua Solfa		93.9	1.30	0.56	4.22	12	14		0.048	0.0004	-1.2		
4 ^a	Cava dei Seli		93.7	0.35	0.48	5.25	<1	3	na	0.066	0.547	0.9		
4 ^e	CdS	na	98.54	0.8	0.042	0.5	nd	1.9	nd	na	0.05	0.75	1.34	42.51
4	CdS 06/02/2007	na	98.58	0.93	0.045	0.39	nd	42.3	0.52	0.062	nd	0.78	1.44	69.3
4	CdS 30/06/2008											1.18	1.45	3.2
4	CdS Via Maciocco											1.12	1.41	2.6
4	CdS Via Maciocco											1.03	1.51	2.1
5 ^a	Lavinio		94.2	4.65	0.149	0.98	<1	2	na	0.005	<0.001	-0.5		
6 ^a	Solfiorata di Pomezia	24	97.6	1.07	0.015	1.28	<1	9	na	0.003	<0.001	-3.5		
6 ^e	SdP	24.2	99.2	n.a.	0.0011	0.80	nd	5.3	nd	na	<0.001	1.23	0.95	84.60
6	SdP 08/02/2007	na	92.7	1.2	0.01	6.08	nd	48.5	0.48	0.014	nd	1.05	0.91	856.7
7 ^a	Trigoria		98.1	1.25	0.003	0.52	<1	2	na	0.006	0.112	-0.3		
8 ^d	Valle Cupella pozzo	na	98.25	0.5	0.044	0.87	7	1.6	nd	na	na	1.3	1.9	34.75
<i>M. Sabatini</i>														
9 ^b	Baccano	22	93.52	<0.0005	0.083	4.89	4	7	na	0.074	0.93	0.51	1.23	14.7
10 ^b	B.go Pantano	40	96.91	0.29	0.2892	1.327	28	2	na	0.0154	0.0185	-2.15	0.34	0.95
11 ^b	Caldara Manziana	15	98.04	0.42	0.0294	2.32	13	4	0.07	0.0152	0.204	-2.4	0.24	0.85
12 ^b	Isola Farnese	29	82.97	<0.0005	0.0159	14.289	5	17	na	0.2774	0.8242	-1.93	2.02	6.23
13 ^b	Mt. Bischero	22	96.96	<0.0005	1.0767	2.6844	293	7	0.05	0.0204	0.1276	-2.71	na	na
14 ^b	Parco della Mola	25	96.84	0.017	1.8668	1.7599	<1	7	0.1	0.0094	0.0947	-0.69	na	na
15 ^b	P.re Annibaldi	10	97.60	0.125	0.0898	1.0918	<1	2	0.04	0.0035	0.006	-1.88	0.19	20
16 ^b	P. gto Capeccchio	26	98.03	0.193	0.5602	0.9747	<1	2	na	0.0083	0.0018	-0.02	0.52	1.46
17 ^b	Puzzole Zancona	10	95.1	0.066	4.321	0.749	<1	2	9	0.0034	0.0025	-4.64	0.456	34.5
18 ^b	Solfiara Manziana	11	96.48	0.98	0.1268	2.0973	1	2	0.05	0.0138	0.2284	-4.14	na	na
<i>Lago Albano</i>														
			cc/l STP		cc/l STP	cc/l STP					cc/l STP			
	27/07/2005 (-155 m)		34.0		4.8	20.8					0.2	4.3	0.84	0.27
	17/01/2006 (-155 m)		37.2		8.5	17.8					0.03	3.95	1.34	0.83
	19/09/2006 (-155 m)		19.11		2.91	15.74					0.03	3.62	0.79	0.40
	08/11/2007 (-155 m)												0.62	0.83
	03/03/2008 (-150 m)		19.23		5.52	18.14					0.11	4.54	1.05	0.46

na= non analizzato; nd= non risolvibile; *misura diretta in campagna con Dräger X-am 7000.

Dati da: ^aGriggenbach et al. (1988); ^bMinissale et al. (1997); ^cCarapezza et al. (2003); ^dCarapezza & Turchini (2007); ^eBarberi et al., 2008.

3.5. Pericolosità

I fenomeni vulcanici che rappresentano un pericolo attuale nell'area dei Colli Albani sono le emissioni di gas, CO₂ e H₂S, ma anche Rn, che si verificano in varie zone del settore occidentale (Giggenbach et al., 1988; Chiodini & Frondini, 2001; Carapezza et al., 2003, 2005, 2007). In prospettiva vi è una riattivazione del cratere del Lago Albano con pericolose eruzioni idromagmatiche e alluvionamenti con generazione di lahar.

Per quanto riguarda il primo fattore di pericolosità, le manifestazioni a gas sono correlabili, per grandi linee, ai sistemi di fratturazione (tettonica e vulcano-tettonica) che le veicolano, alle variazioni di pressione idrostatica che possono causare il rilascio dei gas in soluzione negli acquiferi (Giordano et al., 2000), ed alla permeabilità dei terreni superficiali che i gas attraversano. Ne conseguono, perciò, due tipi di pericoli da gas: uno legato ad un meccanismo di rilascio improvviso di CO₂ da acque limniche sature, che potrebbe innescare nel Lago di Albano (Martini et al., 1994; Funiciello et al., 2002; Cioni et al., 2003; Carapezza et al., 2008a) un fenomeno simile a quello del Lago Nyos in Camerun (Rice, 2000); ed uno legato al rilascio convettivo e/o diffusivo nell'atmosfera ed all'accumulo in depressioni (es. Cava dei Selci: Carapezza et al., 2003) di quantità pericolose, talora letali, di gas vulcanici più pesanti dell'aria (CO₂ e H₂S). Questo rilascio è facilitato da interventi di rimozione della coltre di terreni superficiali impermeabile ai gas (cave, scavi per fondazioni, ecc.) e da perforazioni di pozzi per acqua o geognostici che attraversano questa copertura (Barberi et al., 2007; Carapezza & Tarchini, 2007). Nelle Tabb. 3.2 e 3.3 si riportano gli effetti per inalazione di CO₂ e H₂S, rispettivamente, per vari intervalli di concentrazione crescente in aria.

Lo scopo principale del seguente studio, attraverso misure del flusso diffuso e viscoso del gas emesso, della sua concentrazione nelle acque dei Laghi Albano e Nemi e nell'aria sia all'aperto che indoor, è proprio quello di contribuire alla valutazione della pericolosità attuale dei Colli Albani, compreso il rischio di blow-out da pozzi. Pur essendo la nostra attenzione focalizzata sui gas con pericolo immediato per la sicurezza di persone e animali, non si può non menzionare la pericolosità a lungo termine per la salute umana dovuta alle emissioni di gas radon dalle stesse zone. La CO₂ è infatti il principale "carrier" del Rn e i dati disponibili indicano che, in effetti, dove il flusso di CO₂ dal suolo è elevato, elevate sono anche le concentrazioni in aria del R che talvolta superano le soglie di pericolosità.

Anche la pericolosità associata a possibili future eruzioni del Lago Albano non può essere trascurata per una serie di fattori geologici rilevanti che hanno recentemente portato a

considerare i Colli Albani non un vulcano estinto, ma suscettibile di produrre nuove eruzioni:

i) la stessa presenza di forti emissioni di gas con caratteri chimici e isotopici che ne segnalano una probabile derivazione magmatica è un indizio della probabile presenza di un serbatoio magmatico in profondità;

ii) l'attività sismica è frequente e caratterizzata da sciami i cui ipocentri si concentrano per lo più a pochi chilometri sotto il Lago Albano (Amato & Chiarabba, 1995a); quest'area è interessata anche da movimenti verticali recenti (Amato & Chiarabba, 1995b; Salvi et al., 2004);

iii) la geocronologia degli ultimi prodotti freatomagmatici, confrontata con i tempi di riposo tipici del vulcano (De Rita et al., 1995b), mostra come tuttora non si sia superato l'intervallo critico intercorso dall'ultima eruzione; ed inoltre, lavori recenti (Funicello et al., 2002) hanno portato alla identificazione di depositi (*surges* piroclastici, *lahars*) olocenici datati a circa 5000 a B.P., molto più recenti di quelli finora conosciuti.

A tutto ciò si aggiunga una nutrita letteratura romana antica (Tito Livio, Plinio il Vecchio, Giulio Ossequente, Orosio, Dionigi d'Alicarnasso) che riporta la descrizione di una serie di fenomeni naturali, avvenuti in epoca storica, che appaiono tipici di fenomeni eruttivi ed esondativi nel Lago Albano, ed il quadro che si delinea è quello di un vulcano nient'affatto estinto, la cui pericolosità deve essere valutata con particolare attenzione, data anche la consistente urbanizzazione sviluppatasi sui fianchi e sulle zone perimetrali dell'edificio (Roma e i Castelli Romani).

Tab. 3.2. Effetti sulla salute per inalazione di anidride carbonica*	
Limiti di esposizione (% in aria)	Effetti sulla salute
2 - 3	Unnoticed at rest, but on exertion there may be marked shortness of breath
3	Breathing becomes noticeably deeper and more frequent at rest
3 - 5	Breathing rhythm accelerates. Repeated exposure provokes headaches
5	Breathing becomes extremely laboured, headaches, sweating and bounding pulse
7.5	Rapid breathing, increased heart rate, headaches, sweating, dizziness, shortness of breath, muscular weakness, loss of mental abilities, drowsiness, and ringing in the ears
8 - 15	Headache, vertigo, vomiting, loss of consciousness and possibly death if the patient is not immediately given oxygen
10	Respiratory distress develops rapidly with loss of consciousness in 10-15 minutes
15	Lethal concentration, exposure to levels above this are intolerable
25 +	Convulsions occur and rapid loss of consciousness ensues after a few breaths. Death will occur if level is maintained.
* da www.ivhnh.org/gas/guidelines.htm	

Tab. 3.3. Effetti sulla salute per inalazione di idrogeno solforato*

Exposure limits (ppm)	Health Effects
0.008-0.2	Olfactory threshold -"rotten eggs" smell detectable
20	Sense of smell to gas lost Concentrations tolerated for some hours without harm
20-50	Eye irritation
50	Prolonged exposure may cause pharyngitis and bronchitis
60	Prolonged exposure may cause conjunctivitis and eye pain
150+	Irritation of upper respiratory tract Sense of smell lost
250	Pulmonary oedema with risk of death
500	Very dangerous, evacuation should occur well below this level
1000	Loss of consciousness occurs
1000-2000	Acute intoxication: symptoms include rapid breathing, distress, nausea and vomiting. May be rapidly followed by loss of consciousness, coma and cessation of breathing.
2000+	Immediate loss of consciousness and high probability of death

*da www.ivhhn.org/gas/guidelines.htm

4. LE PRINCIPALI AREE DI DEGASSAMENTO DEI COLLI ALBANI

Nella mappa di Fig. 4.1 sono indicate le principali zone di emissione di gas dei Colli Albani che sono state oggetto di indagine (stelle gialle), nonché l'ubicazione dei pozzi nei quali sono avvenuti incidenti per emissione incontrollata dei gas (cerchi rossi) (Cap. 5).

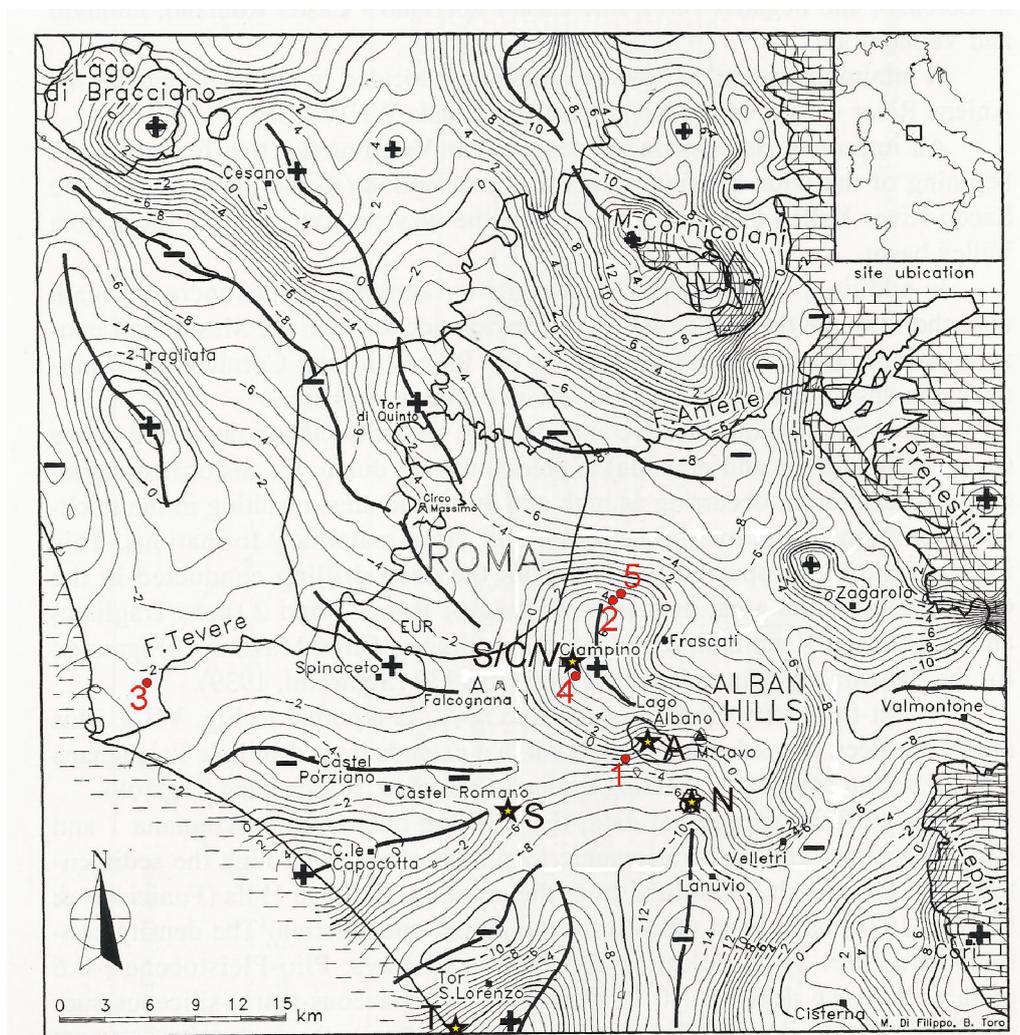


Fig. 4.1. Colli Albani. Ubicazione delle principali aree di emissione di gas indagate (stelle gialle) e dei pozzi dai quali sono avvenute emissioni accidentali di gas (cerchi rossi). S/C/V: S. Maria delle Mole, Cava dei Selci e Vigna Fiorita sono troppo vicine a questa scala; A: Lago Albano; N: Lago di Nemi; S: Solforata di Pomezia; T: Tor Caldara. 1: Pozzo ENEL 203; 2: Valle Cupella; 3. Fiumicino; 4: Via Maciocco; 5: Via Vervio.

4.1. Cava dei Selci

4.1.1. Le misure di flusso di CO_2 e H_2S dal suolo.

Cava dei Selci è una zona densa di abitazioni sul fianco nord-occidentale dei Colli Albani, soggetta a continue emissioni di gas dal suolo (Fig. 4.1) o da pozzi, ovunque sia stata

rimossa o attraversata la copertura impermeabile costituita dai depositi vulcanici o epivulcanici provenienti dal cratere del Lago Albano (Quattrocchi et al., 1998; Carapezza et al., 2000, 2003, 2005, 2007; Chiodini & Frondini, 2001).

L'aumento del rilascio dei gas dal suolo in correlazione con eventi sismici (Quattrocchi & Venanzi, 1989; Funiciello et al., 2002) e il verificarsi di alcuni incidenti, letali per un uomo e decine di animali, hanno richiesto lo studio sistematico della pericolosità da gas dell'area attraverso il controllo costante di una serie di parametri geochimici quali: caratterizzazione geochimica e isotopica dei gas emessi; controllo della concentrazione delle specie volatili più pericolose (CO_2 , H_2S) nell'atmosfera in vicinanza o all'interno di abitazioni; misure del flusso di CO_2 su un'area vasta o ripetute su una griglia prefissata (Carapezza et al., 2000, 2003, 2005, 2007).

A Cava dei Selci è presente una vecchia cava per la coltivazione del "Peperino albano", abbandonata dagli anni '70. L'escavazione rimosse i depositi superficiali a bassa permeabilità fino ad incontrare una falda acquifera superficiale; la cava fu parzialmente riempita da materiale permeabile sciolto proveniente da vicini scavi, che i fluidi acidi argillificarono nel corso degli anni, creando così una depressione che ospita stagionalmente una pozza d'acqua stagnante.



Fig. 4.2. Veduta panoramica da SE della zona di maggior degassamento nella ex cava in prossimità dell'abitato di Cava dei Selci.

Una prima campagna di misura di flusso di CO_2 , effettuata su un'area ampia, circa 12.000 m^2 , nel febbraio-marzo del 2000, diede come risultato un flusso di 61 ton/giorno per sola diffusione (Fig. 4.3), e di circa 37 ton/giorno di flusso convettivo (Carapezza et al., 2000).

Il settore da cui si verificano le emissioni più consistenti ha una forma leggermente allungata in direzione NW-SE, che corrisponde probabilmente alla direzione della faglia attraverso la quale i gas risalgono in superficie (Carapezza et al., 2000). Questa è anche la direzione di allungamento del sottostante *horst* carbonatico di Ciampino (Di Filippo & Toro, 1995).

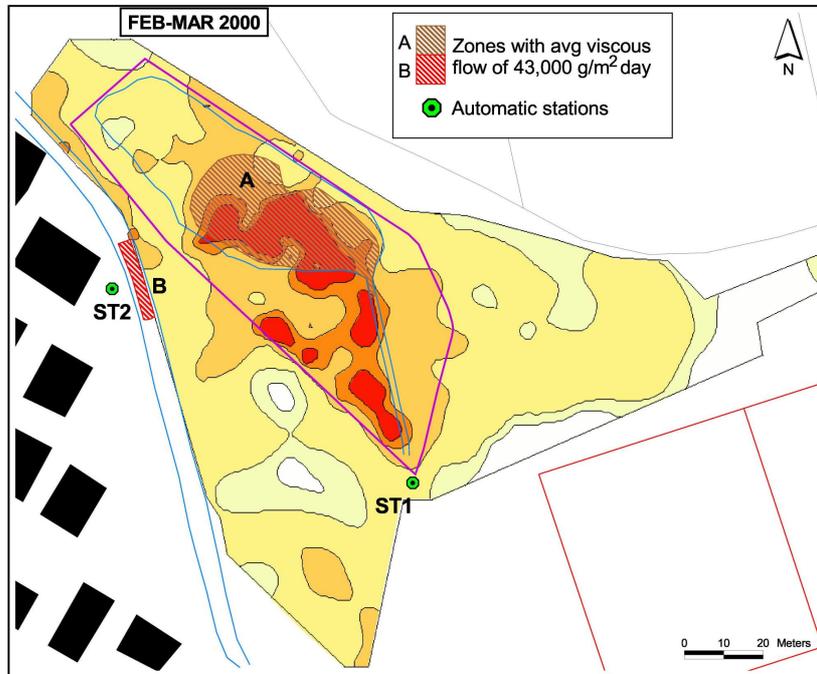


Fig. 4.3: Mappa di flusso di CO₂ della campagna di febbraio-marzo 2000 (da Carapezza et al., 2003). In tratteggio i settori di emissione convettiva: A- pozza stagnante; B- canale di drenaggio.

Successivamente venne definita una maglia di 114 punti fissi su una superficie di 6350 m² nella zona a maggior tasso di emissione, e trentasei campagne di misura vi sono state effettuate da maggio 2000 a giugno 2008 al fine di valutare le variazioni del ϕ_{CO_2} col tempo (Tab. 4.1 e Figg. 4.4 a 4.14). La forma delle linee di flusso è pressoché la stessa per ogni set di dati a dimostrazione che le emissioni sono conseguenza di un fattore strutturale, mentre variazioni apprezzabili si hanno per quanto riguarda il flusso totale: i valori che si ottengono in inverno sono infatti costantemente superiori a quelli dell'estate (Tab. 4.1 e Fig. 4.4) senza alcuna evidenza di cambiamenti nel tasso di emissione profonda dei gas o di variazioni di permeabilità dovuti, ad es., a piccoli terremoti locali (Carapezza et al., 2003). Queste oscillazioni possono essere spiegate con le variazioni nel regime idraulico della falda che si verificano in questo settore. L'aumento del gradiente idraulico nella falda idrica, prodotto dall'eccesso di sfruttamento nel periodo estivo nelle zone alla base del vulcano, determina nella zona un afflusso di nuova acqua, meno ricca in CO₂ rispetto a quella sovrassatura che vi stazionava prima, nella quale il gas che risale dal profondo si

dissolve, con conseguente diminuzione della quantità rilasciata in atmosfera (Carapezza et al., 2005).

Tab. 4.1. Risultati delle misure di flusso di CO₂ dal suolo sulla maglia fissa di Cava dei Selci

Riferimento bibliografico	Data	Minimo g/m ² giorno	Punto di misura	Media g/m ² giorno	Massimo g/m ² giorno	Punto di misura	Flusso tot Ton/giorno
1	Maggio 2000	25,3	A12	3852	121842	C13	25
1	Giugno 2000	58,6	C19	1525	12000	C12	10
1	Agosto 2000	30,7	E2	1148	9433	C12	8
1	Ottobre 2000	17,0	G14	2539	24829	F18	18
1	Dicembre 2000	14,4	E2	3198	39340	C12	21
1	Giugno 2001	41,3	D16	1939	33344	C12	13
2	Ottobre 2001	62,3	E2	1562	7983	C13	8,9
2	Marzo 2002	41,0	D16	1816	17822	C14	8,2
2	Giugno 2002	44,2	B15	1404	21546	C12	6,8
2	Ottobre 2002	55,0	C19	1930	24144	C13	8,3
2	Marzo 2003	18,6	G14	1395	23747	C11	7,3
2	Luglio 2003	73,8	G15	2179	32649	G8	3,8
2	Ottobre 2003	2,5	G14	911	13539	B10	4,1
2	Dicembre 2003	22,7	E2	877	25517	C12	3,3
2	Febbraio 2004	12,0	E10	1428	76455	C12	4,3
2	Marzo 2004	5,7	A13	1963	41157	C12	6,8
2	Maggio 2004	18,2	H11	1432	24391	E7	5,8
2	Luglio 2004	26,3	F16	973	20871	C9	3,7
2	Agosto 2004	22,7	F16	1158	15372	B10	4,3
2	Novembre 2004	15,4	A18	3568	106708	G8	9,5
3	Febbraio 2005	14,4	D13	3500	47320	C16	12,7
3	Giugno 2005	28,1	E2	1111	11840	C12	4,7
3	Agosto 2005	5,7	E14	2849	39829	G10	8,6
3	Ottobre 2005	34,0	A9	4735	57895	B10	10,7
3	Gennaio 2006	5,6	B5	4430	46654	B12	13,8
3	Aprile 2006	14,6	G14	2489	20545	C13	13,1
3	Luglio 2006	43,7	C19	2581	39459	C12	11,5
3	Ottobre 2006	12,0	D3	2373	22288	C11	11,4
4	Febbraio 2007	15,1	G14	2575	50914	B12	10,4
4	Aprile 2007	40,7	G14	3195	42743	B10	12,2
4	Luglio 2007	40,7	G13	3985	56152	C13	19,5
4	Settembre 2007	31,4	G13	2971	51841	F8	14,2
4	Dicembre 2007	94,6	A18	3480	31689	C13	13,5
4	Marzo 2008	31,5	B11	2132	16343	E16	9,3
4	Aprile 2008	31,9	A9	2237	36937	C12	10,2
4	Giugno 2008	30,9	A14	2472	43878	C12	10,9

1) Carapezza et al. 2003; 2) Carapezza et al., 2005; 3) Carapezza et al., 2007; 4) Questa tesi.

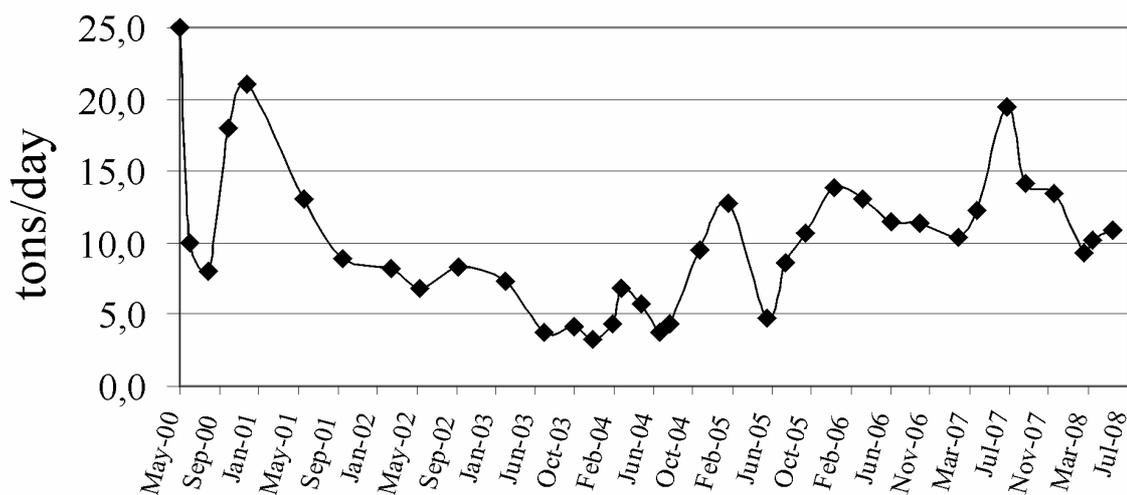


Fig. 4.4. Variazione temporale del flusso totale diffuso di CO₂ dal suolo misurato nelle trentasei campagne effettuate da maggio 2000 a giugno 2008 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

In Fig. 4.5 sono mostrate le prime sei campagne eseguite sulla maglia fissa da maggio 2000 a giugno 2001 (Carapezza et al., 2003). I flussi totali variano da 8 ton/giorno per la campagna di agosto 2000 ad un massimo di 25 ton/giorno misurate nel giugno dello stesso anno (vd. anche Tab. 4.1 e Fig. 4.4). I massimi registrati in queste campagne sono anche i massimi assoluti dell'intero set di dati ad indicare che in quel periodo era in atto un fenomeno di degassamento diffuso molto intenso presumibilmente legato ad una prolungata attività sismica avvenuta ai Colli Albani e nei vicini rilievi appenninici. Molti autori infatti hanno riportato aumenti di temperatura, flusso di CO₂ e altre variazioni geochimiche in concomitanza con attività sismica (es. Quattrocchi & Calcara, 1998; Chiodini & Frondini, 2001; Funicello et al., 2002; Carapezza et al., 2003, 2005, 2007).

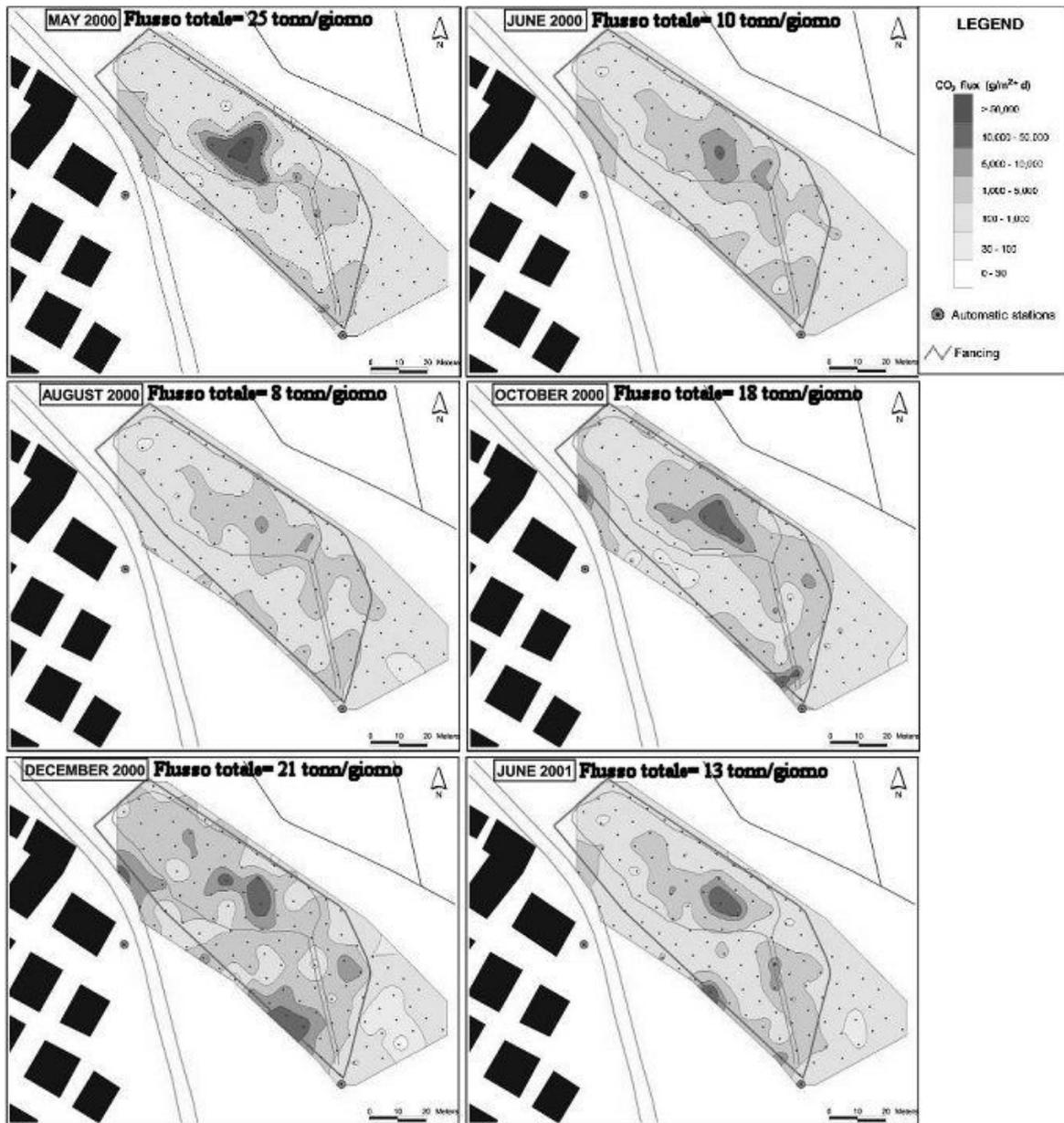


Fig. 4.5. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle campagne da maggio 2000 a giugno 2001 sulla maglia fissa di Cava dei Selci (da Carapezza et al., 2003).

Dalla seconda metà di ottobre 2001 si osserva invece un forte trend a decrescere dei flussi di CO₂ totali misurati (Tab. 4.1, Figg. 4.4, 4.6, 4.7 e 4.8). Questa condizione di bassa emissione di gas dal suolo si è protratta fino a tutto il 2004, e infatti in questo periodo si sono registrati i minimi assoluti nei flussi totali con valori da 3,3 a 4,3 ton/giorno per le campagne da luglio 2003 a febbraio 2004 (Carapezza et al., 2005, 2007). Solo da novembre 2004 si osserva una nuova risalita nei valori di flusso totale (Tab. 4.1, Figg. 4.4 e 4.8).

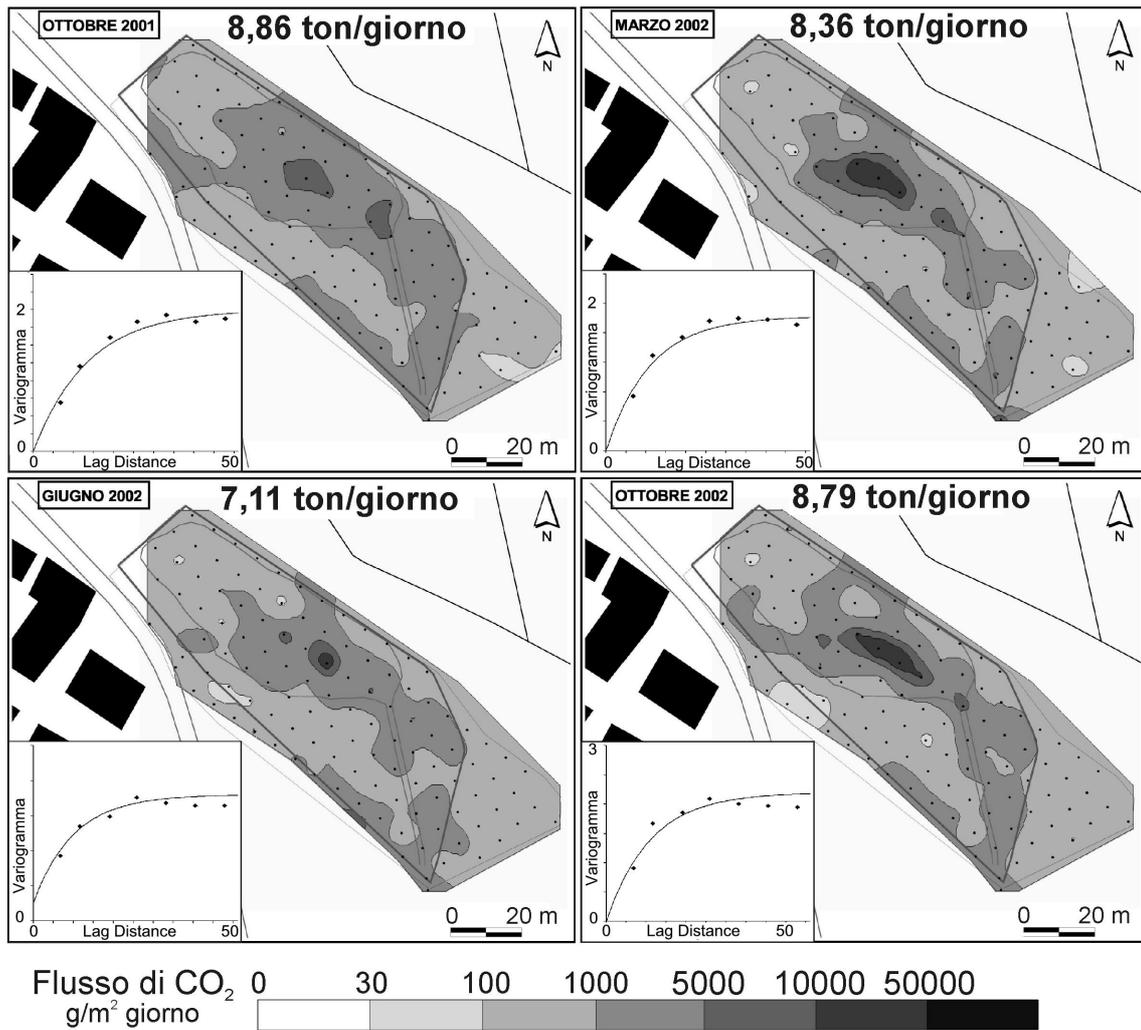


Fig. 4.6. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle prospezioni da Ottobre 2001 a Ottobre 2002 sulla maglia fissa di Cava dei Selci (da Carapezza et al., 2005)

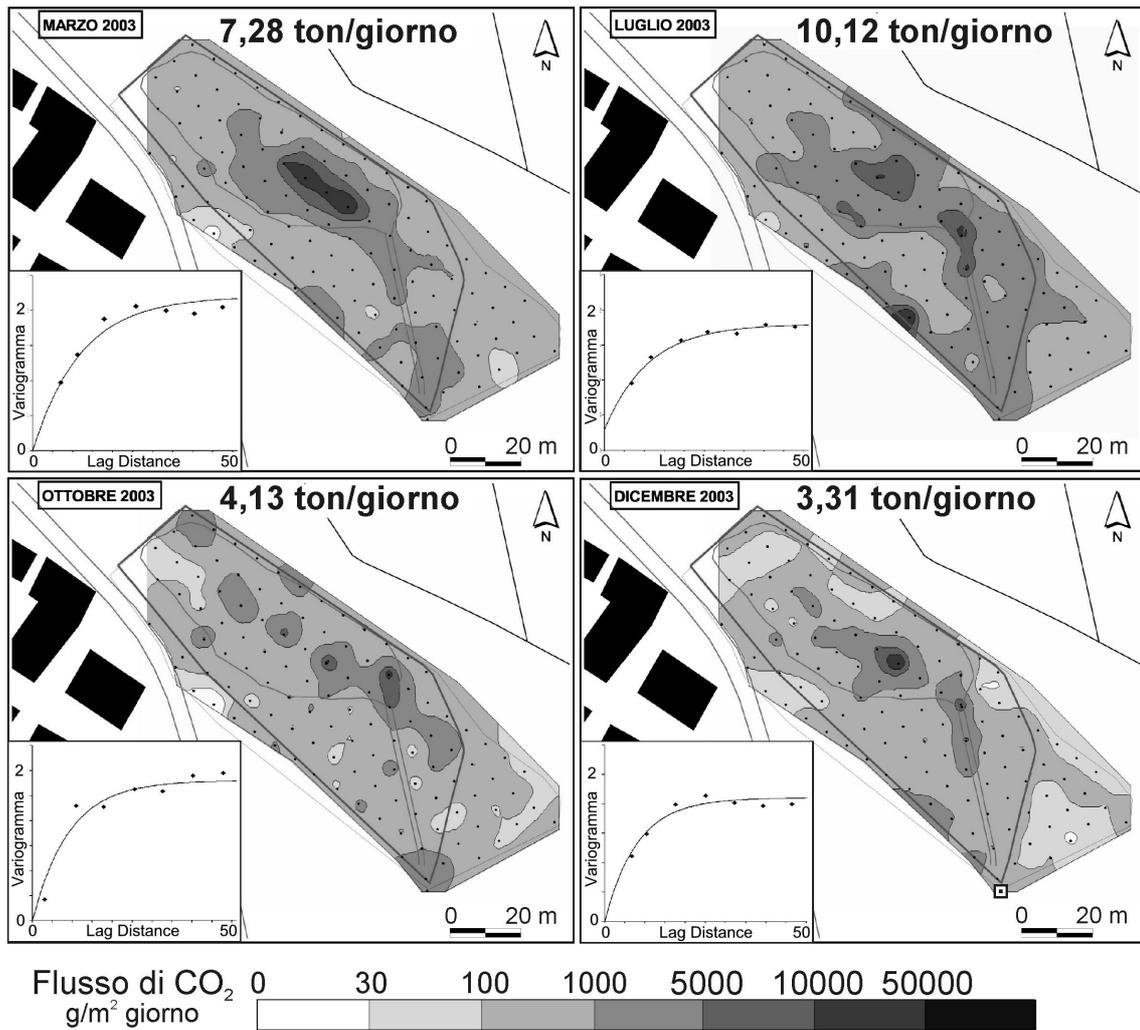


Fig. 4.7. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle campagne da marzo a dicembre 2003 sulla maglia fissa di Cava dei Selci (da Carapezza et al., 2005)

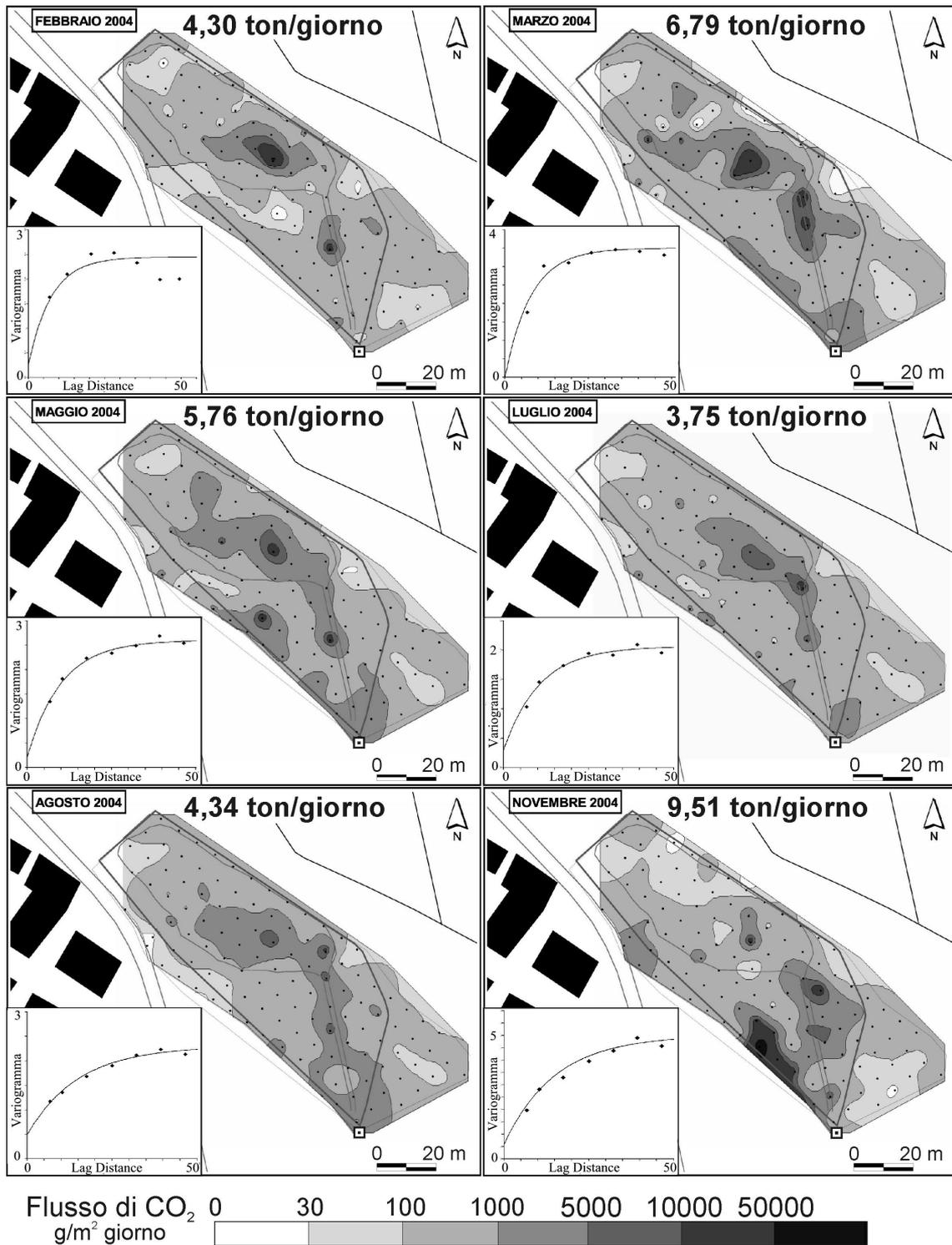


Fig. 4.8. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle campagne da febbraio a novembre 2004 sulla maglia fissa di Cava dei Selci (da Carapezza et al., 2005)

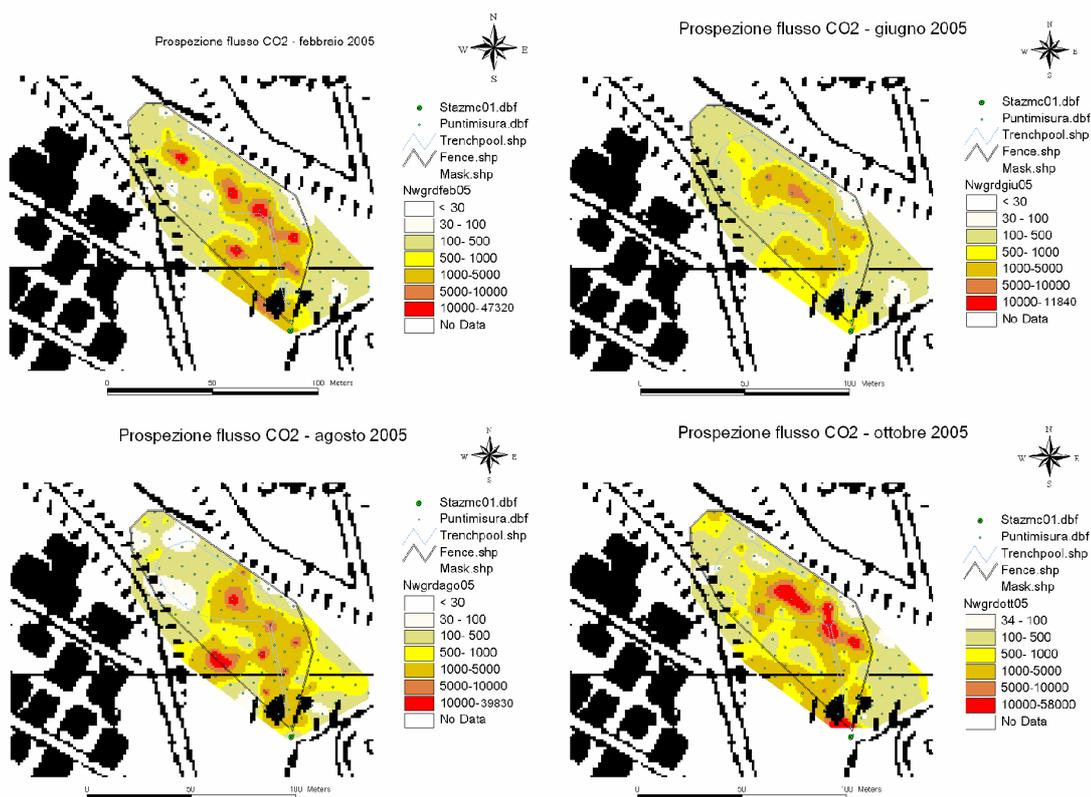


Fig. 4.9. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle campagne da febbraio a ottobre 2005 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

Una nuova campagna su un ampio settore (circa 223.500 m²) è stata condotta tra luglio e agosto 2005 per un totale di 436 punti di misura (Fig. 4.10). Il flusso totale, ottenuto sommando i contributi di tutti i settori ove il flusso eccedeva la soglia di background vegetale naturale stimata in 35 g/m²giorno in base a diagrammi di probabilità lognormale (come proposto da Sinclair, 1974), è stato calcolato in 25 ton/giorno da una superficie a flusso anomalo di circa 89.500 m² (un terzo circa dell'area totale investigata) (Carapezza et al., 2007). Nello specifico, in Fig. 4.10 si identificano tre zone anomale con allineamenti preferenziali NW-SE come il sottostante alto carbonatico (Di Filippo & Toro, 1995). La prima è quella meridionale più vicina alla manifestazione naturale, e sfortunatamente la più vicina alle case: è un'area a flusso anomalo di circa 52.000 m² con un contributo al flusso totale di 18,6 ton/giorno di CO₂. La seconda anomalia si rinviene a nord della suddetta manifestazione ed è centrata su un vecchio pozzo per acqua abbandonato che attualmente emette solo gas: per essa si è stimata un'emissione di 2,1 ton/giorno di CO₂ da 3700 m² circa. La terza area anomala si trova nel settore nordoccidentale, e contiene l'emanazione di gas più debole, con un flusso totale di 1,7 ton/giorno da 25.500 m² (Carapezza et al., 2007).

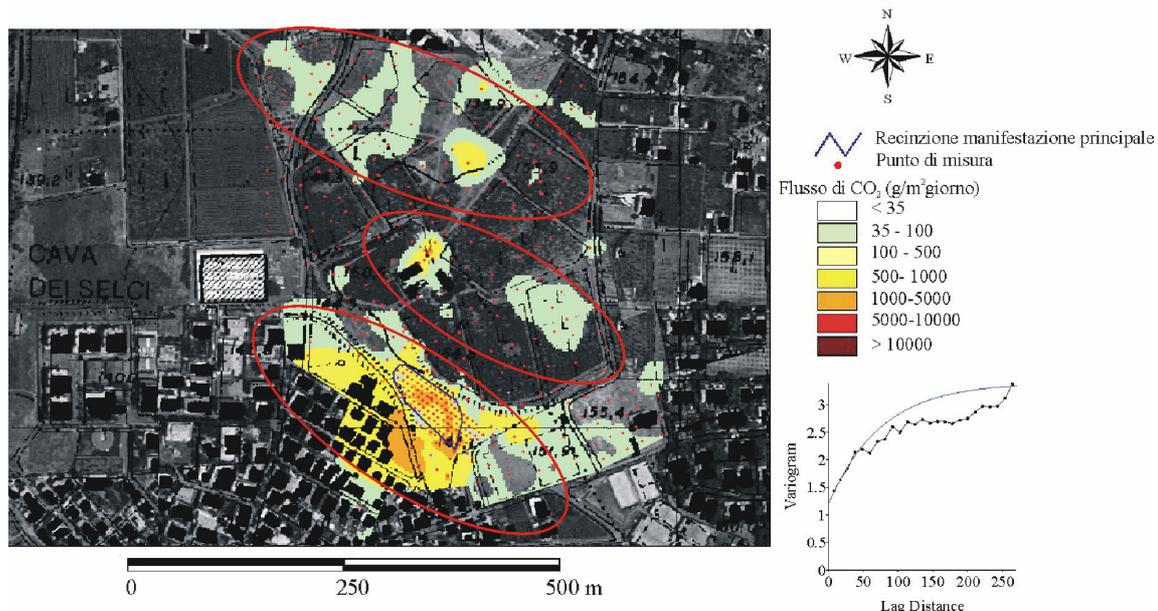


Fig. 4.10. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo della campagna su vasta area di luglio-agosto 2005 (da Carapezza et al., 2007). Le ellissi in rosso individuano i settori anomali discussi nel testo.

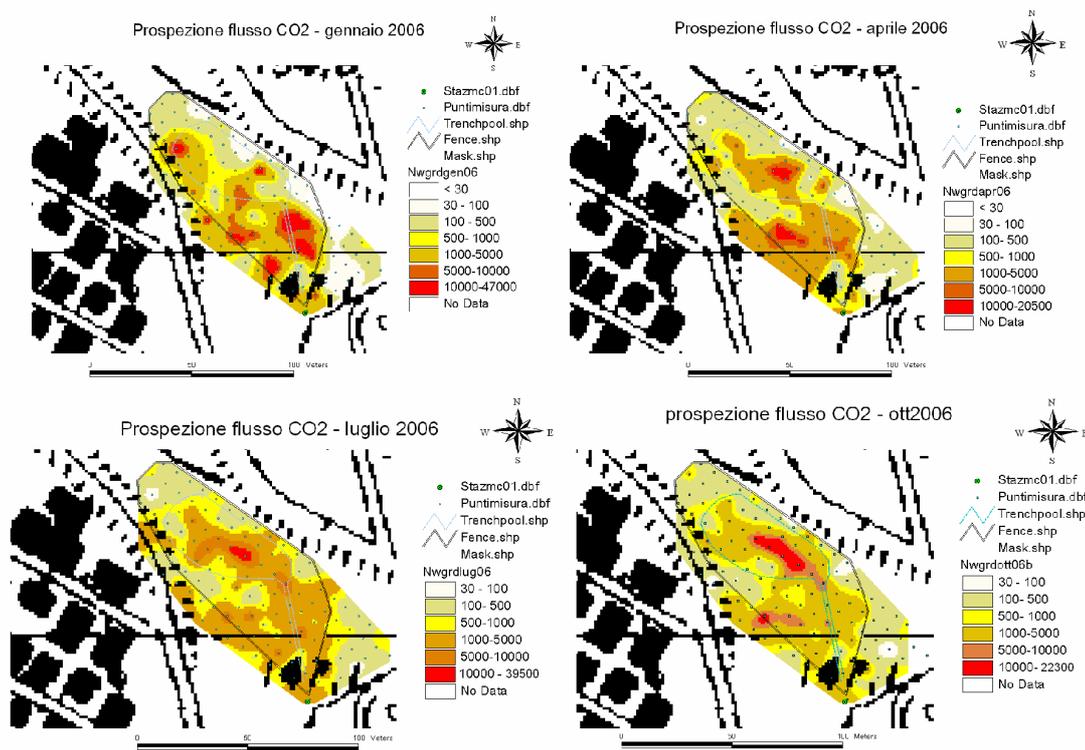


Fig. 4.11. Mappe di flusso di CO₂ dal suolo delle campagne da gennaio a ottobre 2006 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

Nel biennio 2005-06 sono rimaste invariate le condizioni di forte degassamento dalla maglia fissa cominciate a fine 2004. I flussi totali sono rapidamente cresciuti, andandosi a

registrare valori da un minimo di 4,7 ton/giorno ad un massimo di 13,8 ton/giorno per le campagne di giugno 2005 e gennaio 2006 rispettivamente (Tab. 4.1, Figg. 4.4, 4.9 e 4.11). Anche in questo periodo, come in quello iniziale, si osservano oscillazioni stagionali con valori più alti registrati in inverno e valori più bassi registrati in estate a conferma dell'ipotesi che le variazioni stagionali dovute allo sfruttamento della falda hanno influenza sul tasso di emissione di gas dal suolo.

Nel febbraio 2007 è stata condotta a Cava dei Selci una campagna geochimica multidisciplinare in collaborazione con ricercatori dell'ITER (Istituto Tecnologico y de Energias Renovables) di Tenerife (Spagna) e della Fachhochschule dell'Università di Düsseldorf (Germania), con lo scopo di definire in maniera più completa il pericolo da gas presente nella zona. In questa occasione, oltre alla ripetizione della campagna di flusso di CO₂ dal suolo sulla maglia fissa, sono state eseguite misure del flusso di H₂S dal suolo e misure della concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL (Par. 2.2.2). In Fig. 4.12 si mostrano le mappe di flusso dal suolo di CO₂ e H₂S ottenute dall'elaborazione delle misure eseguite sulla medesima maglia fissa di Cava dei Selci. E' da notare che, mentre per la CO₂ si individua una soglia di background fino a 30 g/m²giorno dovuto a normale attività di respirazione del suolo vegetato, per l'H₂S si è considerato anomalo l'intero set di misure non nulle, poiché non esistono nel settore altri processi a parte quelli endogeni che possano produrre idrogeno solforato.

Il flusso totale stimato per i due gas ammonta a 10,4 ton/giorno di CO₂ e 84 kg/giorno di H₂S. Quest'ultima è una quantità significativa di gas emesso, se comparata al tasso di emissione di H₂S da altri apparati vulcanici (Teide: 5 – 10 kg/giorno; Cerro Negro: 4,2 – 18 kg/giorno; Poàs: 2,8 kg/giorno; Solforata di Pozzuoli: 240 kg/giorno. N. Perez e G. Chiodini, com. pers.).

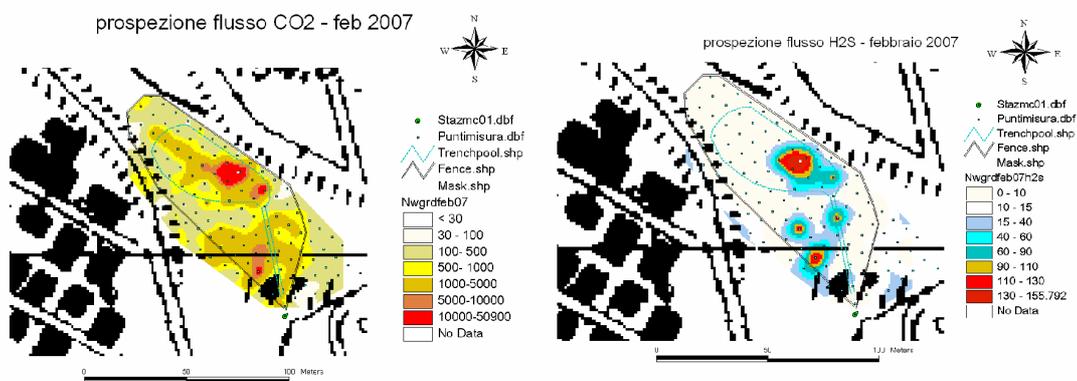


Fig. 4.12. Mappe del flusso di CO₂ (sinistra) e H₂S (destra) dal suolo della campagna di febbraio 2007 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

Per quanto riguarda il flusso di CO₂ si continua ad osservare un forte rilascio di gas dal suolo a Cava dei Selci.

Tali valori elevati nel tasso di emissione della CO₂ si sono mantenuti anche nel biennio successivo (2007-08) nel corso del quale si è misurato un massimo relativo di 19,5 ton/giorno nella campagna di luglio 2007 e si sono registrati valori minimi comunque alti, es. 9,3 ton/giorno nella campagna di marzo 2008 (Tab. 4.1, Figg. 4.4, 4.13 e 4.14). È questa l'unica volta in nove anni di osservazioni, che il massimo stagionale di flusso di CO₂ dalla maglia fissa di Cava dei Selci si registra in estate anziché in inverno (Fig. 4.4).

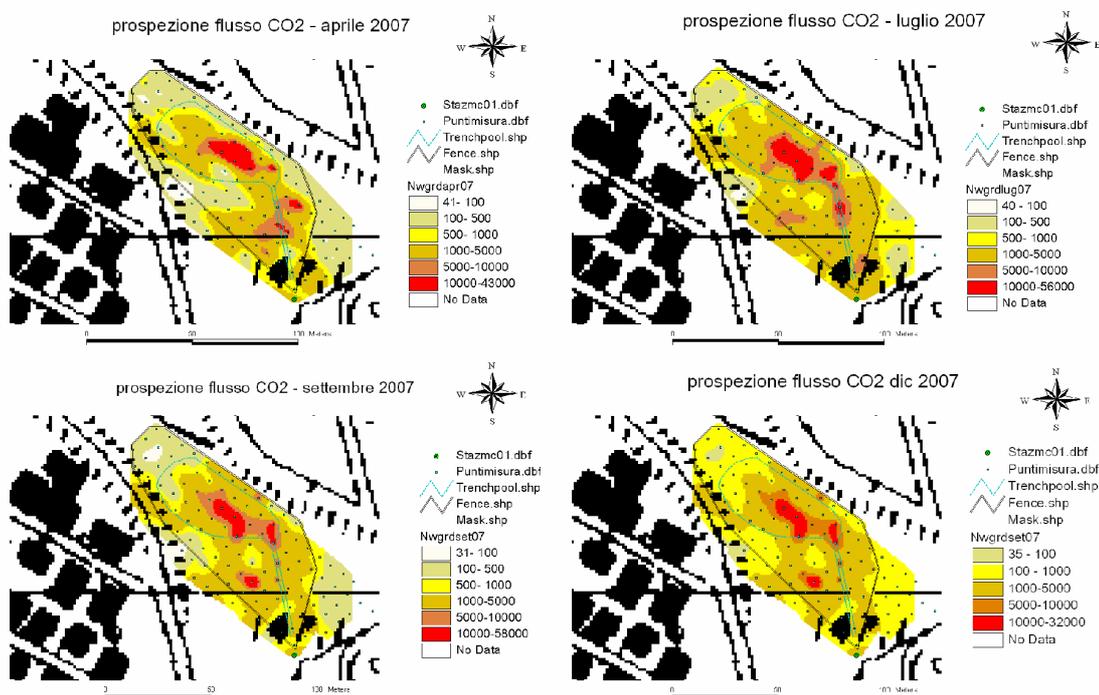


Fig. 4.13. Mappe del flusso diffuso di CO₂ dal suolo delle campagne da aprile a dicembre 2007 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

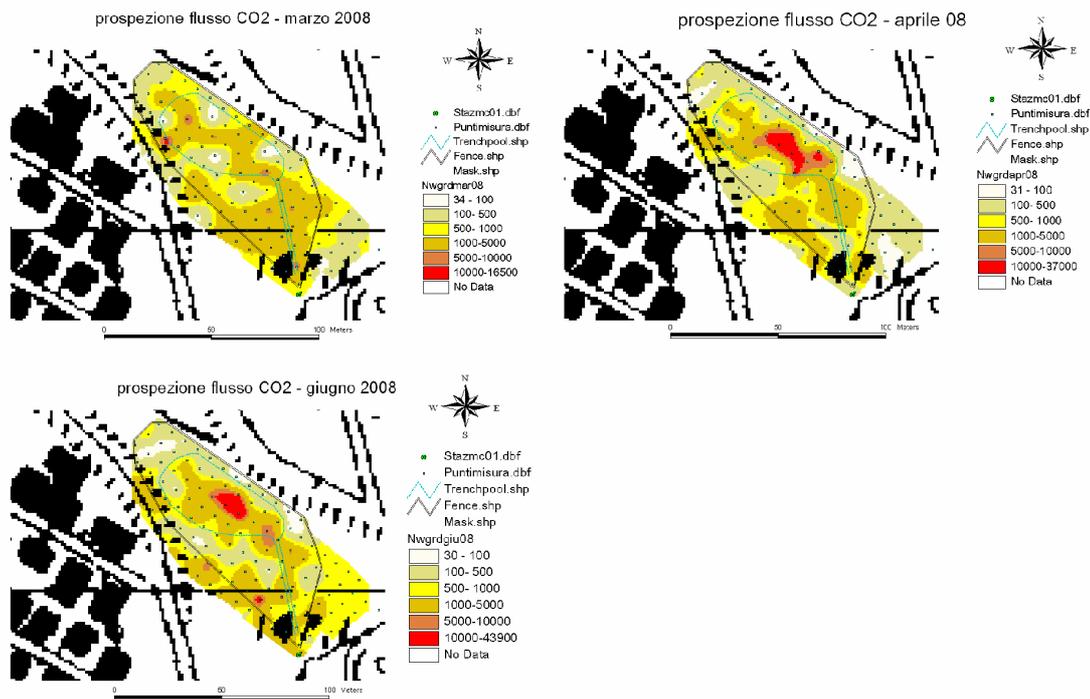


Fig. 4.13. Mappe del flusso diffuso di CO₂ dal suolo delle campagne da marzo a settembre 2008 sulla maglia fissa di Cava dei Selci.

In conclusione, è possibile che i flussi alti siano conseguenza di attività sismica che innalza la permeabilità verticale facilitando la risalita di fluidi profondi. Le cronache storiche riportano infatti frequenti associazioni tra recrudescenze delle manifestazioni gassose e aumenti di temperatura in pozzi e sorgenti dei Colli Albani, con la sismicità.

È da osservare, infine, che la forte diminuzione del flusso di CO₂ dalla maglia fissa di Cava dei Selci si registra a partire dal giugno 2001 (Fig. 4.4) quando la pozza d'acqua della zona è definitivamente scomparsa. L'abbassamento crescente della falda acquifera può avere creato un forte gradiente idraulico con continuo afflusso di nuova acqua sottosatura in CO₂, ma è anche possibile che quando la falda affiorava in superficie (pozza), l'acqua mantenesse aperte le principali fratture consentendo una più facile risalita del gas, mentre quando la falda si è abbassata queste fratture si sono almeno in parte sigillate.

4.1.2. Le misure di flusso di CO₂ in continuo

Nel dicembre 2003, per controllare in continuo il flusso di CO₂ e la qualità dell'aria, una stazione automatica è stata installata a Cava dei Selci, poco lontano dall'estremo sudorientale dell'area indagata (ST1 in Fig. 4.3). La stazione ha operato con continuità, ad eccezione di alcune interruzioni dovute a malfunzionamento della batteria o a interventi di

manutenzione ordinaria di sensori e hardware. In giugno e luglio 2008, la stazione è stata temporaneamente spostata in due altri siti dei Colli Albani al fine di monitorare le operazioni di messa in sicurezza di alcune perforazioni, eseguite per scopi idrici o geognostici, che avevano causato forti eruzioni di gas. Di questi incidenti si riparlerà nel capitolo 5. Per questo motivo, il set di dati analizzati in questa tesi arriva fino a giugno 2008.

La stazione misura ogni ora la concentrazione in aria di CO₂ e H₂S rispettivamente a 50 e 150 cm dal suolo, il flusso di CO₂ dal suolo e alcuni parametri ambientali che possono influenzarlo (umidità e temperatura del suolo e dell'aria, pressione atmosferica, velocità e direzione del vento). I suddetti parametri sono misurati contemporaneamente al flusso poiché essi possono avere effetto sul tasso di rilascio del gas in atmosfera (Chiodini et al. 2001; Rogie et al., 2001; Granieri et al. 2003; Badalamenti et al., 2004; Carapezza & Granieri, 2004).

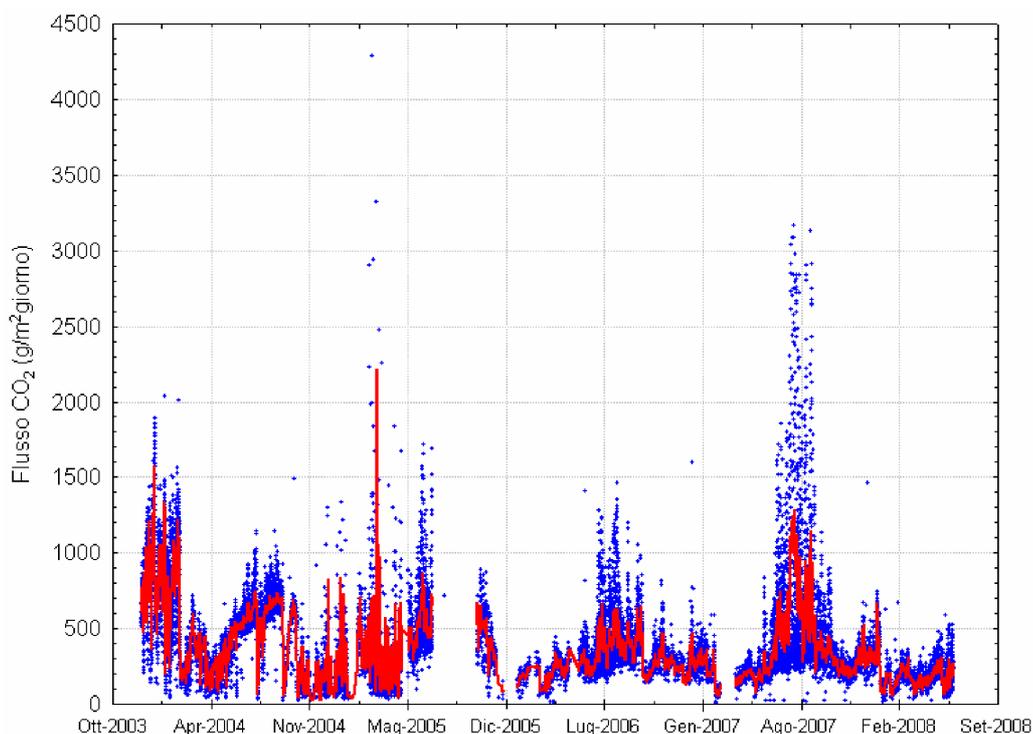


Fig. 4.15. Variazioni del flusso di CO₂ dal suolo (pallini blu) e relativa media mobile giornaliera (linea rossa) registrate dalla stazione automatica di monitoraggio di Cava dei Selci da dicembre 2003 a giugno 2008.

In Fig. 4.15 sono riportate le misure del flusso di CO₂ dal suolo e le medie mobili giornaliere registrate nell'arco di tempo da dicembre 2003 a giugno 2008. Si possono individuare delle importanti variazioni verificatesi in questo intervallo di tempo. I flussi variano di due ordini di grandezza, da poche decine a migliaia di g/m²giorno (Tab. 4.2, Fig.

4.15) con oscillazioni stagionali e fluttuazioni importanti, con scarsa coincidenza temporale con quelle evidenziate dalle campagne di flusso dal suolo (Fig. 4.16). In Tab. 4.2 sono anche riportate le statistiche descrittive principali dei parametri ambientali. Si possono notare le importanti variazioni climatiche che si verificano nel settore di Cava dei Selci. Anche le condizioni fisiche del suolo subiscono notevoli variazioni, e infatti si sono registrate variazioni di temperatura da 2 a quasi 29 °C e di contenuto in acqua del suolo dal 17,5 al 100%.

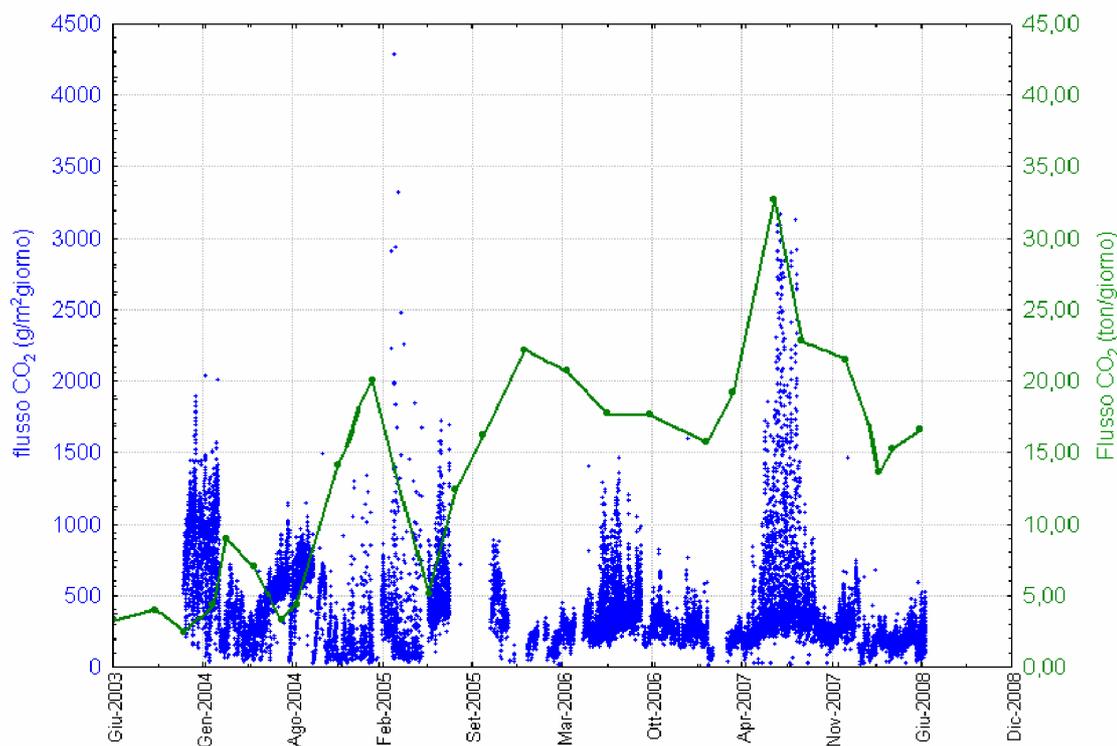


Fig. 4.16. Confronto delle variazioni temporali dei flussi misurati dalla stazione automatica (indicatori blu; asse delle ordinate di sinistra) con i flussi totali delle campagne areali di misura di flusso dal suolo (linea e indicatori verdi; asse delle ordinate di destra).

Tab. 4.2. Statistiche descrittive del flusso di CO₂ e dei parametri ambientali registrati dalla stazione

Variabile	Unità mis.	N. validi	Media	Mediana	Minimo	Massimo	Varianza	Dev.Std.	Err.Std.
Flusso CO ₂	g/m ² giorno	30003	366,6	283,5	10,1	4286,4	76957,2	277,4	1,6
T aria	°C	34282	14,5	13,8	-6,3	43,4	68,7	8,3	0,0
Umid. aria	%	34318	74,8	79,7	2,0	98,7	439,5	21,0	0,1
P aria	hPa	29832	997,5	997,6	948,4	1020,8	50,4	7,1	0,0
T suolo	°C	25200	16,1	16,5	1,9	28,6	41,1	6,4	0,0
Umid. suolo	%	31551	50,0	54,8	17,5	100,0	265,3	16,3	0,1
Direz. vento	°N	34428	154,7	149,1	0,0	358,7	9080,5	95,3	0,5
Vel. vento	m/s	34428	0,9	0,6	0,0	9,7	1,1	1,1	0,0

Poiché, come precedentemente detto, le variazioni delle condizioni atmosferiche e del suolo hanno effetto sul tasso di rilascio di gas, non è immediato correlare i picchi di

rilascio di CO₂ a processi endogeni. È necessario quindi procedere ad una elaborazione statistica dei dati al fine di distinguere quali anomalie sono legate alle variazioni delle condizioni atmosferiche o del suolo, e quali sono invece dovute a fenomeni endogeni che si verificano nel settore. Per questo scopo si è proceduto ad una Regressione Multipla sui Componenti Principali con metodo *stepwise* in avanti (PCR). Questa procedura è divisa in due passi:

- i) l'analisi dei componenti principali (PCA) sul set di dati relativo alle sole variabili ambientali da cui si ricavano nuove variabili predittrici indipendenti, ortogonali, non correlate (**X**);
- ii) la regressione multipla della variabile flusso di CO₂ (**Y**) in base all'osservazione dei predittori continui **X** (i componenti principali) ottenuti dalla PCA. Il metodo *stepwise* prevede l'immissione dei predittori nella regressione cominciando dal componente principale più altamente correlato, per passare via via a quelli sempre meno correlati, fino a che un predittore non ha più un contributo significativo nell'equazione di regressione (il modello) che si sta cercando.

L'obiettivo di questo approccio è duplice: *in primis* si ottiene una riduzione del set di dati di partenza in modo però che si mantenga l'informazione (cioè la varianza) al più alto livello possibile; e in seconda battuta si individua un'equazione di regressione $Y=f(X)$ su vettori **X** ortogonali, non correlati. In questo modo ci si assicura che il contributo alla varianza della variabile "flusso di CO₂" dovuta alle sole variazioni ambientali non presenti una ridondanza dovuta alla ripetizione di informazione derivante dalla correlazione che i parametri ambientali hanno tra loro (Vandeginste et al., 1998). Tutta questa procedura è stata eseguita utilizzando il software STATISTICA 7.1 della StatSoft Italia S.r.l.

Tab. 4.3. Matrice di correlazioni tra flusso di CO₂ e variabili ambientali registrate dalla stazione automatica

	Flusso CO ₂ g/m ² giorno	T aria °C	Umid aria %	P aria hPa	T suolo °C	Umid suolo %	Dir vento °N	Vel vento m/s
Flusso CO ₂	1,00	0,34	-0,28	0,09	0,22	-0,31	0,11	0,04
T aria	0,34	1,00	-0,76	-0,03	0,82	-0,62	0,31	0,29
Umid aria	-0,28	-0,76	1,00	0,03	-0,46	0,50	-0,34	-0,43
P aria	0,09	-0,03	0,03	1,00	0,00	-0,09	-0,06	-0,27
T suolo	0,22	0,82	-0,46	0,00	1,00	-0,71	0,09	0,00
Umid suolo	-0,31	-0,62	0,50	-0,09	-0,71	1,00	-0,07	-0,03
Direz vento	0,11	0,31	-0,34	-0,06	0,09	-0,07	1,00	0,25
Vel vento	0,04	0,29	-0,43	-0,27	0,00	-0,03	0,25	1,00

Le correlazioni evidenziate in grassetto rosso sono significative al livello $p < 0,05$

In Tab. 4.3 sono evidenziate le correlazioni intercorrenti sia tra flusso di CO₂ e parametri ambientali che tra i soli parametri ambientali. Si possono osservare forti correlazioni tra i

parametri ambientali: in maniera rimarchevole c'è un'altissima correlazione negativa tra temperatura e umidità di aria e di suolo. E si può osservare come il flusso sia mediamente correlato ai suddetti parametri, in positivo o in negativo. La prima osservazione è certamente banale, ma se si operasse una regressione del flusso direttamente sui dati ambientali, otterremmo un'equazione di regressione in cui sommeremmo più volte la percentuale di varianza spiegata da ognuno di essi. Si rende perciò necessario ridurre le variabili di partenza da introdurre nel modello, e creare nuove variabili che siano ortogonali, e quindi non correlate, tra loro. L'analisi dei Componenti Principali ci aiuta in questo obiettivo. Essa individua infatti i sette autovettori indipendenti del set di dati ambientali, ne calcola gli autovalori e i pesi/l'effetto che ogni variabile ha sui singoli autovettori (Tab. 4.4).

Tab. 4.4. a) Autovalori dello spazio 7-D delle variabili ambientali e relativa percentuale di varianza spiegata. b) Pesi fattoriali delle variabili ambientali.

a) Autovalori (MCO1 3dic03-10giu08.sta) Estrazione: Compon. principali					b) Pesi Fattoriali (Non ruot.) (MCO1 3dic03-10giu08.sta) Estrazione: Compon. principali (Pesi marcati in rosso sono >_500000)							
Valore	Autovalore	% Totale varianza	Cumulo Autovalori	Cumulo %	Variabile	Fattore 1	Fattore 2	Fattore 3	Fattore 4	Fattore 5	Fattore 6	Fattore 7
1	3,084948	44,07069	3,084948	44,0707	MCO1 Air T. °C	0,945166	0,015567	0,029251	0,014670	-0,234061	-0,113626	-0,194093
2	1,441635	20,59478	4,526583	64,6655	MCO1 Air RH %	-0,833485	0,186725	0,164990	0,210517	0,190235	-0,392850	-0,087325
3	0,992086	14,17265	5,518669	78,8381	MCO1 Bar Pr. HPa	-0,055815	0,561646	-0,728381	-0,361669	-0,022609	-0,139714	0,007930
4	0,704917	10,07025	6,223586	88,9084	MCO1 Soil T. °C	0,830574	0,338028	0,233396	0,166223	-0,091257	-0,284094	0,157296
5	0,365071	5,21530	6,588657	94,1237	MCO1 Soil W. %	-0,773075	-0,389801	-0,059611	-0,011626	-0,477311	-0,131549	0,039885
6	0,339028	4,84325	6,927685	98,9669	MCO1 W. Dir. °N	0,302814	-0,502998	-0,611260	0,519646	0,090666	-0,056338	0,015234
7	0,072315	1,03307	7,000000	100,0000	MCO1 W. Speed m/s	0,338556	-0,755721	0,042467	-0,481439	0,170916	-0,226004	0,019733
					Var. Sp.	3,084948	1,441635	0,992086	0,704917	0,365071	0,339028	0,072315
					Pcp.Tot.	0,440707	0,205948	0,141727	0,100702	0,052153	0,048433	0,010331

In Tab. 4.4 si può osservare come i primi tre fattori contengano il maggior contributo alla varianza delle variazioni ambientali (temperatura e umidità di aria e suolo nel Fattore1; velocità del vento nel Fattore2; pressione atmosferica e direzione del vento nel Fattore3). Si è così ottenuta la riduzione del numero di variabili a tre soltanto, l'indipendenza dei nuovi vettori e la maggiore possibile varianza esplicabile (~79%).

Si procede quindi col secondo passaggio della PCR: la Regressione Multipla *stepwise* in avanti. In questo modo si studierà la relazione tra il flusso di CO₂ (il criterio) e le variabili indipendenti ottenute (i predittori). Bisogna sottolineare che in questa analisi, la procedura di calcolo può portare ad individuare come migliori predittori quei fattori che non erano stati individuati dall'analisi dei Componenti Principali come più importanti (cioè in ordine il Fattore1, il 2, e via così). Questo perché l'ordine di importanza dei fattori nella PCA è relativo alla varianza "interna" al solo set di dati ambientali, mentre la Regressione *stepwise* individua qual è il migliore predittore (quale il secondo, e così via) della variabile flusso di CO₂.

Tab. 4.5. Riepilogo della Regressione stepwise sulla variabile dipendente flusso di CO₂ dal suolo.

Riepilogo Regressione Variabile Dipendente:flusso CO2						
R= ,41499730 R²= ,17222276 R² Aggiustato= ,17204369						
F(4,18490)=961,73 p<0,0000 Err.Standard di stima: 272,77						
N=18495	Beta	Err.Std. di Beta	B	Err.Std. di B	t(18490)	p-level
Intercetta			409,4837	2,028191	201,8960	0,000000
FATTOR1	0,326547	0,006698	97,3471	1,996598	48,7565	0,000000
FATTOR7	-0,217788	0,006692	-65,7551	2,020374	-32,5460	0,000000
FATTOR3	-0,092078	0,006699	-29,9077	2,175927	-13,7448	0,000000
FATTOR2	0,084289	0,006695	25,4804	2,023950	12,5895	0,000000

In Tab. 4.5 è mostrato il riepilogo della procedura di regressione dei fattori sul flusso. Come si sottolineava in precedenza, dei sette fattori di partenza l'analisi ha trovato significativi i primi tre ed il settimo, e inoltre ha trovato più correlato col flusso il primo, quindi il settimo, il terzo e il secondo. Nella colonna "B" sono indicati i coefficienti dell'equazione di regressione; vale a dire che il flusso di CO₂ è:

$$Y = 409,5 + 97,3 * \text{Fattor1} - 65,7 * \text{Fattor7} - 29,9 * \text{Fattor3} + 25,5 * \text{Fattor2}$$

In Tab. 4.5 è anche evidenziato il valore R² o coefficiente di determinazione, cioè la percentuale di variabilità del flusso di CO₂ che si spiega con le sole variazioni delle condizioni ambientali. Nello specifico il modello, in rosso in Fig. 4.17, riesce a spiegare il 17,2 % della variabilità dei dati di flusso registrati dalla stazione (in blu in Fig. 4.17).

In questo modo si dovrebbe aver distinto il contributo al flusso di CO₂ dovuto alle sole variabili ambientali da quello legato a fenomeni endogeni. In un primo tentativo di analisi, i valori residui del flusso di CO₂ sono stati confrontati con le magnitudo dei terremoti avvenuti nell'area dei Colli Albani nel periodo di funzionamento della stazione automatica: in Fig. 4.18 si visualizza l'andamento nel tempo dei residui standardizzati ricavati dalla sottrazione del contributo "ambientale" al flusso totale. Due linee arancioni e due linee rosse evidenziano i residui standardizzati che eccedono ± 1 o $\pm 2\sigma$. Si possono distinguere sei gruppi di dati non giustificabili con le sole variazioni ambientali (anomalie positive di flusso), registrati nei periodi gennaio-febbraio 2004, dicembre-gennaio 2005, marzo-aprile 2005, giugno 2005, luglio 2006 e luglio-settembre 2007. innanzitutto si conferma che, anche considerando i valori residui standardizzati di flusso, non si osservano corrispondenze temporali tra queste anomalie e i picchi positivi delle prospezioni di flusso di CO₂ sulla maglia fissa (confrontare Figg. 4.4 e 4.18).

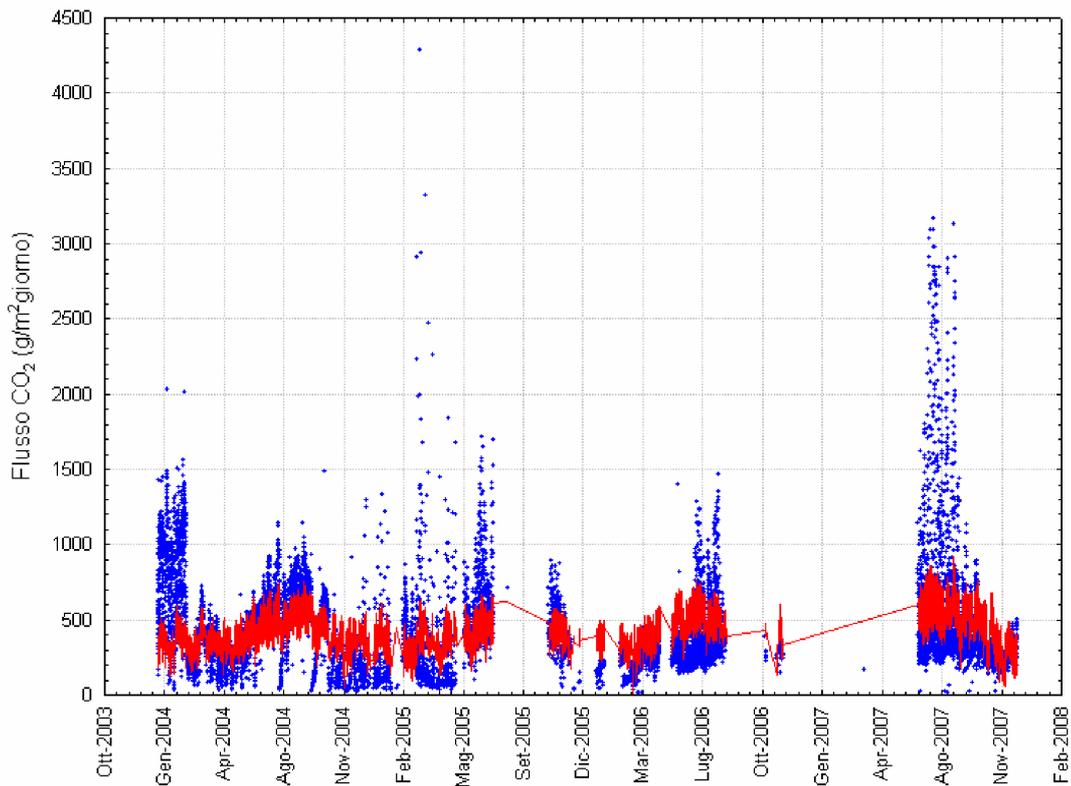


Fig. 4.17. Confronto tra i dati di flusso registrati dalla stazione di monitoraggio (in blu) e il modello della regressione multipla (in rosso).

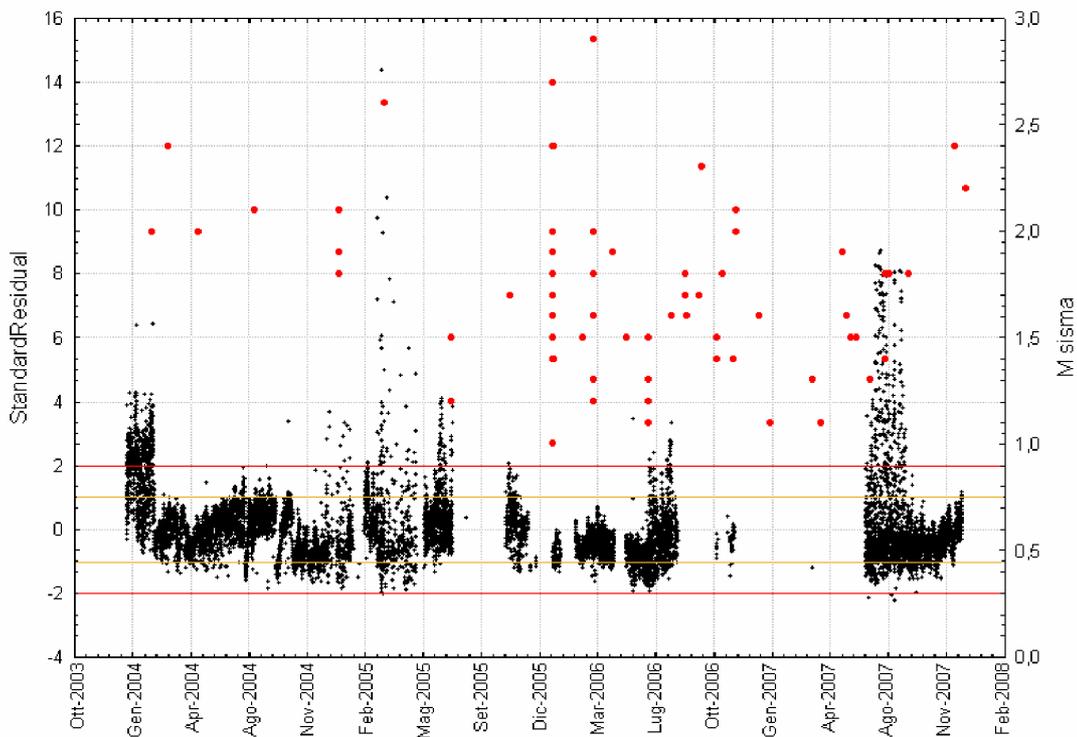


Fig. 4.18. Variazioni nel tempo dei residui standardizzati del modello di regressione multipla (indicatori neri; asse delle ordinate di sinistra) a confronto con le magnitudo dei sismi registrati ai Colli Albani (indicatori rossi; asse y di destra) nell'intervallo di funzionamento della stazione. Le linee arancioni circoscrivono i residui compresi tra $\pm 1\sigma$; quelle rosse circoscrivono i valori $\pm 2\sigma$.

Dall'esame di Fig. 4.18 non emerge alcuna correlazione tra attività sismica e anomalie nel tasso di rilascio di CO₂ dal suolo. Questo può essere dovuto a vari motivi:

- i) si è scelto un set di dati incompleto per modellizzare il flusso di CO₂; ad es. poteva essere necessario avere a disposizione i dati relativi alle oscillazioni del livello della falda sottostante, dato che, come si è evinto dalle campagne discontinue di misura di flusso (paragrafo precedente) un basso livello di falda comporta un richiamo di acqua sottosatura in gas da porzioni più elevate dell'edificio che discioglie i gas che risalgono dal profondo e ne riduce il rilascio in atmosfera;
- ii) per eseguire la regressione multipla sul flusso di CO₂ si è assunto che esso avesse una relazione lineare con i predittori. È possibile che ciò non sia vero e che, operando una regressione non lineare, si ottengano meno gruppi di residui standard anomali e più evidentemente correlabili con la sismicità;
- iii) il parametro "magnitudo" non è adatto ad un confronto perché non è presa in considerazione in maniera appropriata la distanza ipocentrale dal sito della stazione e quindi un maggiore o minore effetto dei sismi sui flussi registrati;
- iv) il parametro "magnitudo" non è adatto al confronto perché i dati a disposizione sono relativi a valori superiori a M=1, mentre la conoscenza della microsismicità potrebbe essere più significativa.

Comunque sia, il processamento statistico dei dati delle stazioni di monitoraggio in continuo del flusso di CO₂ dal suolo è ancora un *work in progress*, almeno per quanto riguarda il riconoscimento dei fenomeni endogeni che lo influenzano.

4.1.3. Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S

Nell'ambito di questo dottorato si è sperimentata l'applicabilità di due sistemi di misura delle concentrazioni in aria generalmente usati in ambiti diversi da quello vulcanologico con finalità di controlli ambientali. Lo strumento multigas X-am 7000 della Dräger Co. e l'analizzatore di gas TDL della Boreal Laser Inc., sono infatti utilizzati principalmente in ambito industriale per monitoraggio di processo o della qualità dell'aria ambiente per motivi di sicurezza. A Cava dei Selci si sono condotte tre campagne, una con X-am7000 e due con TDL. Nella prima campagna, dell'ottobre 2005, sono state misurate le concentrazioni in aria su 92 dei punti predefiniti della maglia fissa di misura del flusso di CO₂ dal suolo. Le concentrazioni sono state misurate a 15 cm dal suolo e ripetute anche a 50 e 100 cm di altezza ogniqualvolta si rilevava un valore non nullo alla quota inferiore.

In Fig. 4.19 si mostrano le mappe di concentrazione relative alle tre quote e i principali risultati della campagna.

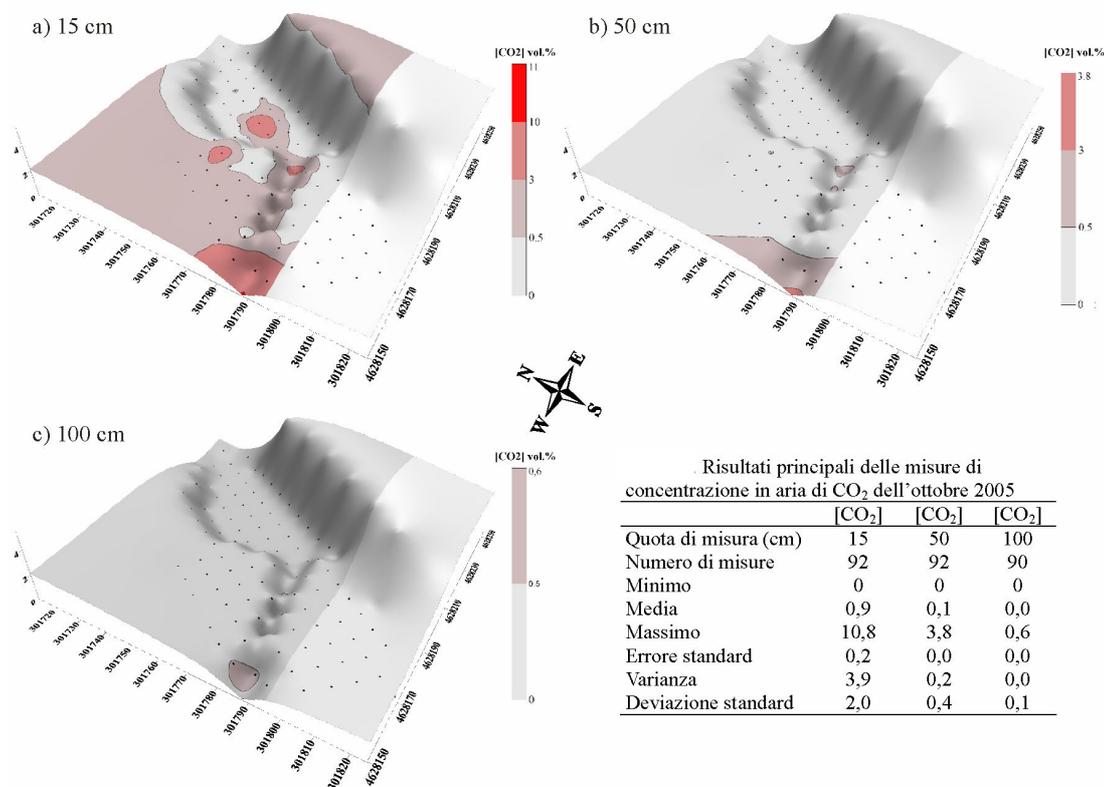


Fig. 4.19. Mappe delle concentrazioni di CO₂ in aria misurate nella campagna di ottobre 2005 (esagerazione verticale= 5X). a) Misure a 15 cm dal suolo; b) Misure a 50 cm dal suolo; c) Misure a 100 cm dal suolo. Nell'angolo si riportano i risultati principali ottenuti.

Rammentando che le soglie di pericolosità per la salute umana sono poste a 0,5% e 3% (rispettivamente Time Weighted Average e Short Term Exposure Limit in ambiente di lavoro) e che il 10% rappresenta la soglia letale, si individuano quattro settori principali con elevata pericolosità da gas in funzione soprattutto della morfologia. In particolare si registrano concentrazioni pericolose nel settore a SW della cava dove sfortunatamente si verifica frequentemente il passaggio di persone ed animali nonostante l'area sia recintata. A febbraio e maggio 2007 sono state condotte nuove campagne di misura con TDL delle concentrazioni di CO₂ e H₂S in aria a 20 cm dal suolo nelle aree dove erano state individuate concentrazioni al suolo più elevate con Dräger. Contemporaneamente alle misure di concentrazione in aria sono state misurate direzione, velocità e turbolenza del vento con anemometro sonico. Nelle tabelle 4.5 e 4.6 si riportano i risultati principali delle misure di concentrazione rispettivamente di CO₂ e H₂S.

Tab. 4.6. Risultati principali dei profili di concentrazione di CO₂ misurata in aria con TDL a Cava dei Selci a febbraio 2007.

data	sito	lunghezza m	altezza cm	durata minuti	minimo ppm	media ppm	massimo ppm
05/02/2007	pozza	64,6	20	90	464	779	1709
05/02/2007	recinzione	43	20	34	457	627	1392
05/02/2007	canale	43,4	20	43	1142	2632	6230

Tab. 4.7. Risultati principali dei profili di concentrazione di H₂S misurata in aria con TDL a Cava dei Selci a febbraio 2007.

data	sito	lunghezza m	altezza cm	durata minuti	minimo ppm	media ppm	massimo ppm
05/02/2007	pozza	64,6	20	90	0,43	5,56	7,96
05/02/2007	recinzione	43	20	34	0,41	2,83	11
05/02/2007	canale	43,4	20	43	9,03	30,81	122

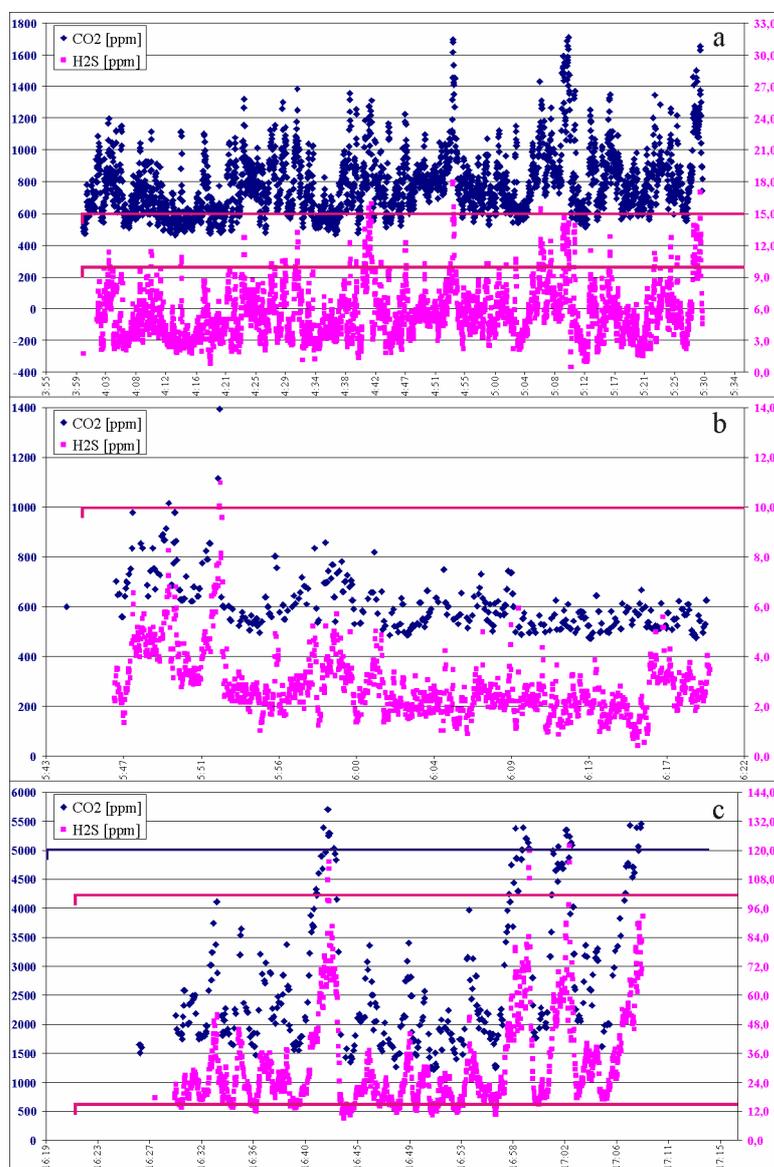


Fig. 4.20. Variazioni temporali delle concentrazioni medie di CO₂ (indicatori blu) e H₂S (indicatori fuxia) misurate lungo i tre profili TDL a febbraio 2007 a Cava dei Selci. a) Profilo nella pozza; segue

sono riportate le soglie TWA e STEL (linee rosa a 10 e 15 ppm rispettivamente) per l'H₂S. b) Profilo lungo la recinzione occidentale; è riportata la soglia TWA (linea rosa) per l'H₂S. c) Profilo nel canale; sono riportate la soglia STEL (15 ppm) e quella immediatamente pericolosa a 100 ppm per l'H₂S (linee rosa) e la soglia TWA a 5000 ppm (linea blu) per la CO₂.

In Fig. 4.20 sono mostrate le concentrazioni medie (si rammenta che il TDL misura l'assorbimento di energia, e quindi la concentrazione media lungo il percorso ottico del laser) in ppm misurate nei tre settori di Cava dei Selci: pozza, recinzione e canale. Si nota che la CO₂ non raggiunge mai concentrazioni medie pericolose se non nel profilo nel canale superando per alcuni minuti le 5000 ppm, rimanendo quindi ben al di sotto della soglia letale. Le concentrazioni medie per l'H₂S sono invece spesso a valori di attenzione, superando in ogni settore le soglie STEL e TWA e addirittura la soglia immediatamente pericolosa (massimo= 122 ppm) nel profilo lungo il canale. È altamente probabile che, essendo questi dei valori medi, in alcune porzioni dei percorsi misurati vi fossero concentrazioni ben più elevate e quindi pericolose.

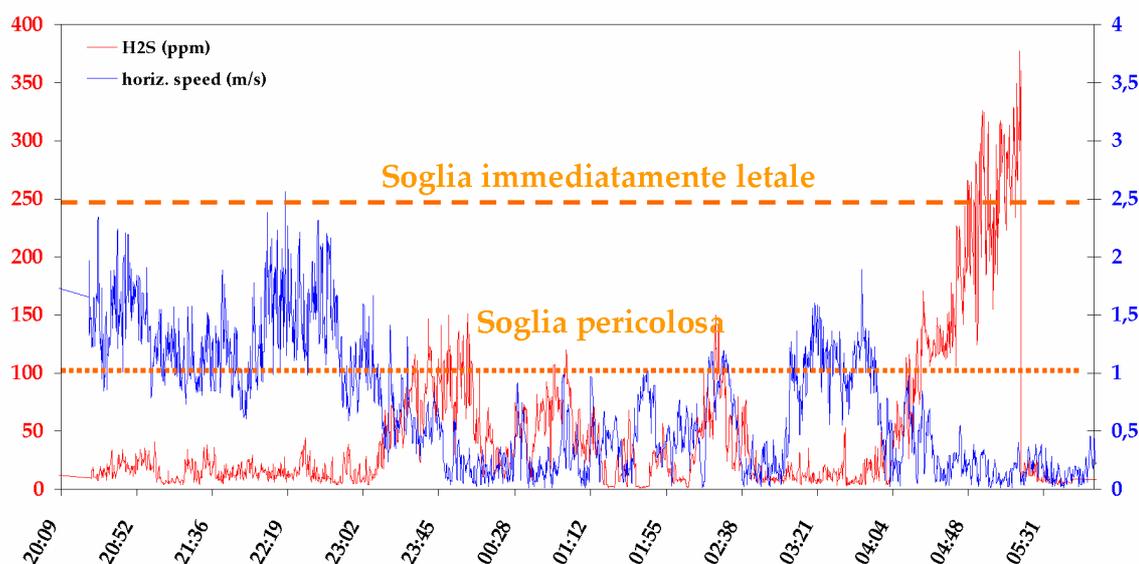


Fig. 4.21. Variazioni temporali della concentrazione media di H₂S misurata con TDL (linea rossa; asse dei valori di sinistra) e della velocità orizzontale del vento misurata con anemometro sonico (linea blu; asse di destra) del profilo notturno eseguito nella pozza di Cava dei Selci tra il 16 ed il 17 maggio 2007.

Tab. 4.8. Concentrazioni di H₂S, e loro persistere, registrate nel profilo TDL di Fig. 4.21, divise in base alle soglie di pericolosità, e principali effetti sulla salute.

ppm	0-10	10-15	15-100	100-250	>250
minuti	280	290	450	70	35
effetti	TWA	STEL	Irritazioni Bronchiti Congiuntiviti	Edema polmonare Rischio morte	Rischio morte

Una seconda campagna di misura con TDL è stata ripetuta nel maggio 2007 al fine di comprendere più chiaramente la pericolosità dell'intenso degassamento che si verifica a Cava dei Selci, tenuto conto della notevole vicinanza di abitazioni e della frequentazione del sito da parte di persone e animali. È stato ripetuto il profilo all'interno della pozza a 20 cm dal suolo per un intervallo di tempo appositamente scelto a cavallo delle ore notturne dalle 20:00 del 16 alle 06:00 del 17 maggio, quando la velocità del vento decresce. È stata misurata la sola concentrazione di H₂S poiché si è visto che è questa la specie chimica le cui concentrazioni possono raggiungere valori pericolosi. Le concentrazioni medie misurate sono mostrate in Fig. 4.21. Si nota un forte aumento di [H₂S] quando il vento cessa, soprattutto nelle prime ore del giorno. Si è registrato infatti un aumento progressivo da poche decine di ppm, nelle ultime ore del giorno 16, ad alcune centinaia di ppm di H₂S (massimo di 398 ppm alle 5:20 del 17 maggio). La registrazione finisce purtroppo poco dopo per un effetto dovuto all'alta umidità dell'aria che ha causato un anomalo assorbimento del fascio laser emesso dal TDL (è questo uno dei limiti della metodologia). Per questo motivo le concentrazioni crollano bruscamente nonostante non si sia verificato un aumento significativo della velocità del vento.

La Tab. 4.8 mostra la durata dell'esposizione per ciascun intervallo di concentrazione di H₂S, stabilito in base all'effetto crescente sulla salute umana. Si può vedere come nelle prime ore del mattino si siano verificate condizioni altamente pericolose se non addirittura mortali per almeno un'ora. Questi dati spiegano la frequente mortalità di piccoli animali, la moria di mucche e pecore che si abbeveravano alla pozza, verificatasi a più riprese tra il 1999 e il 2001, ed anche l'incidente mortale ad un uomo avvenuto nel dicembre 2000. Ancora una volta preme sottolineare che il TDL può soltanto misurare una concentrazione media nel percorso del laser, e quindi non può né quantificare né localizzare i valori superiori alla media, immediatamente letali, che sicuramente esistono in alcune parti del percorso di misura.

4.1.4. Le concentrazioni di gas indoor

L'elevata pericolosità da gas evidenziata dalle misure di concentrazione all'aria aperta con strumenti portatili multigas o fissi TDL all'interno della depressione di Cava dei Selci e la presenza di numerose abitazioni che si trovano sottovento rispetto alla manifestazione, specie nelle prime ore del mattino, ha portato a pianificare ed eseguire una campagna di misura delle concentrazioni di CO₂ e H₂S all'interno delle abitazioni poste al piano terra e negli scantinati.

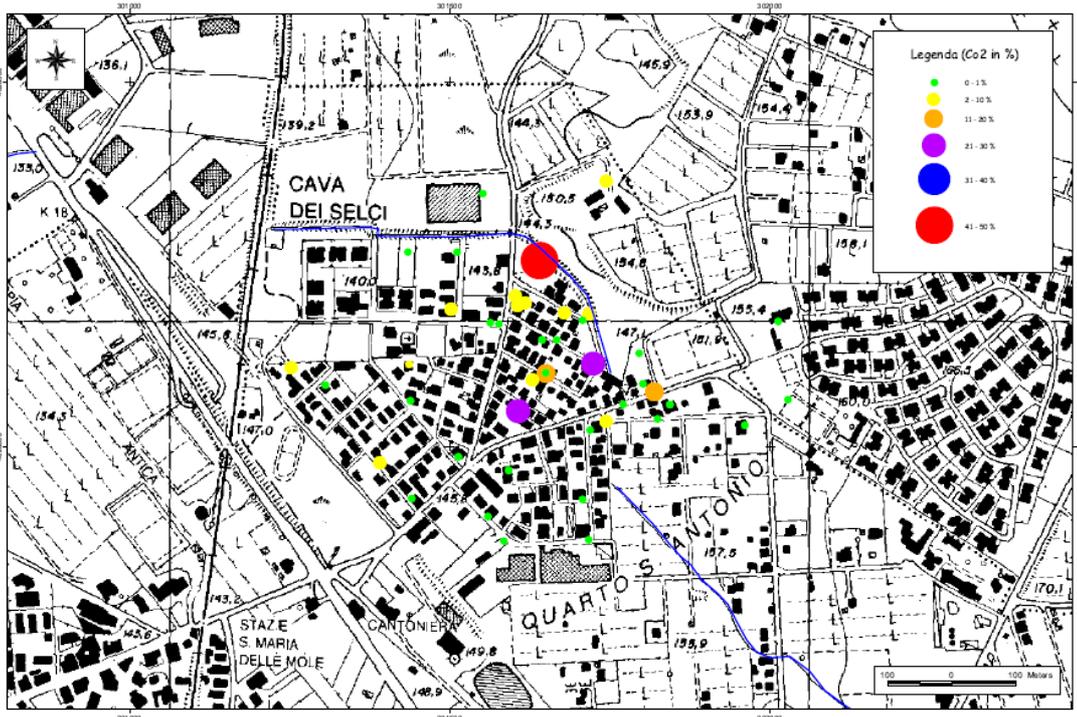


Fig. 4.22. Risultati delle misure di concentrazioni di CO₂ (in vol.%) indoor e all'aperto eseguite a Cava dei Selci nel giugno 2007.

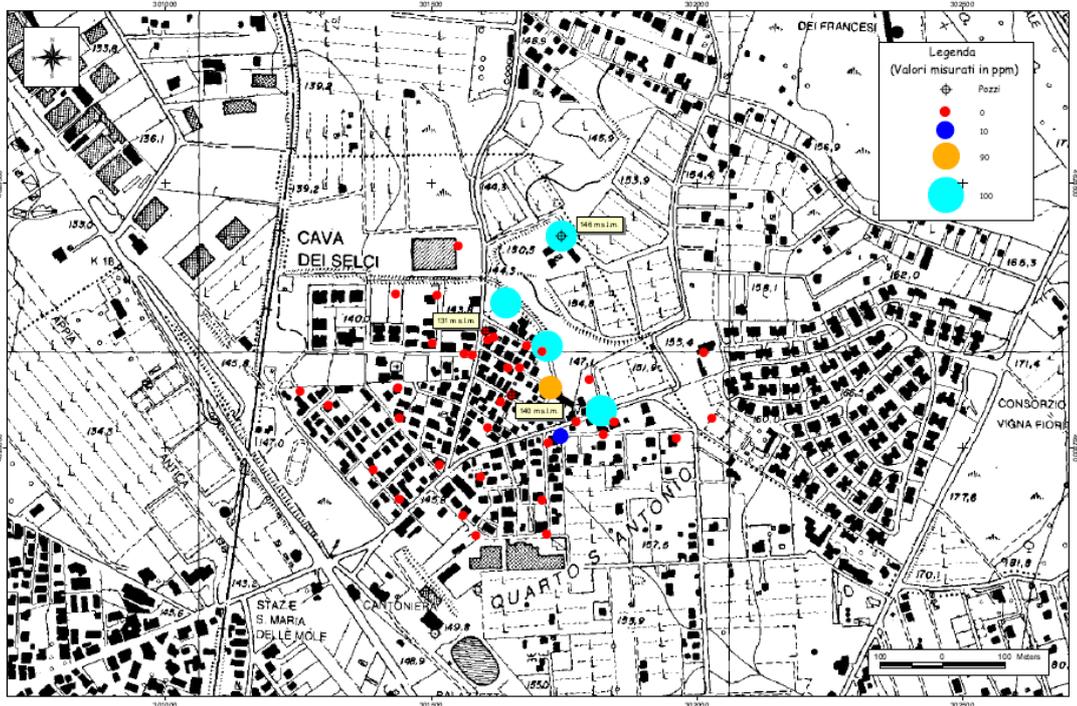


Fig. 4.23. Risultati delle misure di concentrazioni di H₂S (in ppm) indoor e all'aperto eseguite a Cava dei Selci nel giugno 2007.

Sono state eseguite 70 misure di concentrazione di CO₂, H₂S e O₂ in aria (44 in ambienti chiusi e 26 all'aperto) in 33 distinte unità abitative. In Figg. 4.22, 4.23 e 4.24 sono riportati i risultati relativi alle misure di CO₂ e H₂S.

Per quanto riguarda la CO₂, circa il 76% delle misure erano inferiori al 2 vol.%, il 17% erano a valori compresi tra il 2 e il 10 vol.%, il 3% circa tra 10 e 20 vol.%, il 3% circa tra 20 e 30 vol.%, ed una misura era del 41 vol.% (Figg. 4.22).

Le misure di H₂S erano pari a 0 ppm per il 91%, una misura era di 27 ppm, una di 90 ppm, e quattro di 100 ppm (Figg. 4.23).

In Fig. 4.24 si possono apprezzare le frequenze delle concentrazioni di CO₂ e H₂S definite in base alle soglie TWA, STEL e di immediato pericolo distinte tra misure eseguite all'interno e misure eseguite nei giardini delle abitazioni prossime alla manifestazione naturale a gas di Cava dei Selci.

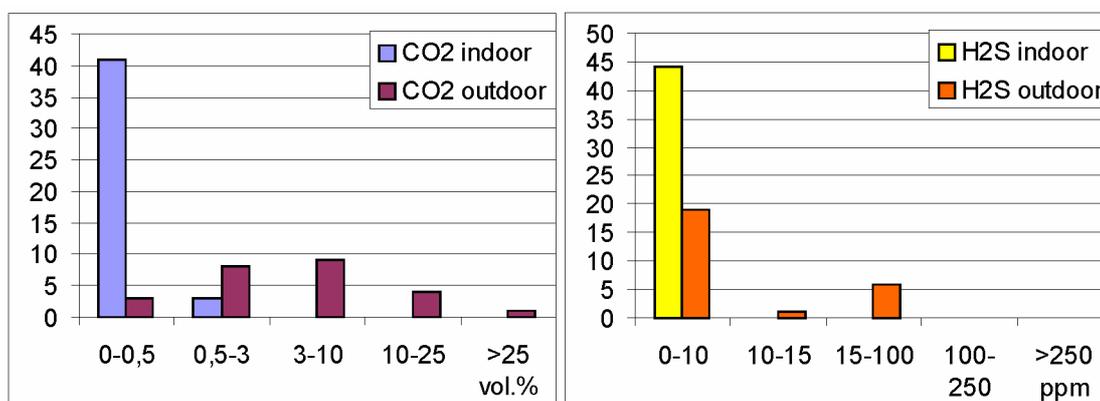


Fig. 4.24. Numero di misure divise in base alle soglie TWA, STEL e di immediato pericolo di concentrazione di CO₂ e H₂S, misurate nelle abitazioni e negli scantinati prossimi alla manifestazione naturale di Cava dei Selci.

4.2. Santa Maria delle Mole

4.2.1. Le misure di flusso di CO₂ dal suolo

Un'altra area di emissione anomala di gas è stata identificata da Beaubien et al. (2003) e Carapezza et al. (2005) a S. Maria delle Mole, a cavallo della via Appia Antica, a soli 800 m in linea d'aria a SW di Cava dei Selci. Nel 2000 Beaubien et al. hanno realizzato una campagna di misura delle concentrazioni di CO₂ e Rn nel suolo con 274 punti di misura su 4 km² a cavallo dei Comuni di Ciampino e Marino (Fig. 4.25), e Carapezza et al. (2005) una prima prospezione del flusso di CO₂ dal suolo con 185 punti di misura su una superficie di 132.000 m² (Fig. 4.26).

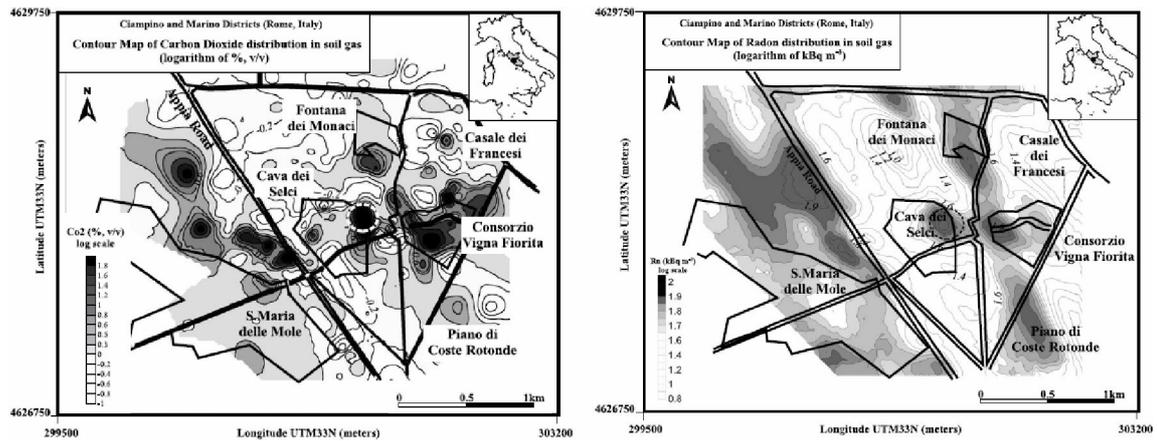


Fig. 4.25. Mappe di concentrazione di CO₂ e Radon nel suolo (da Beaubien et al., 2003).

Dai dati di Beaubien et al. (2003) emerge una pericolosità sia da CO₂ che da Radon nella zona di S. Maria delle Mole.

Il flusso medio di CO₂ dal suolo misurato da Carapezza et al. (2005) è di 588 g/m²giorno, con picchi fino ad oltre 49.000 g/m²giorno (Fig. 4.26). Il 57% dei punti di misura ha dato valori di flusso di CO₂ inferiori a 30 g/m²giorno, che è il valore tipico di terreni vegetati o agricoli in questa zona. La mappa di flusso (Fig. 4.26) mette in evidenza la presenza di zone di forte emissione, disposte in direzione NW-SE, che è la direzione del sottostante alto strutturale carbonatico. Le anomalie di flusso segnalano la presenza in questa zona di una faglia, non visibile in superficie, dalla quale risalgono i gas profondi (come evidenziano in Fig. 4.25 anche Beaubien et al., 2003). Il flusso totale di CO₂ è stimato a 18 ton/giorno da una superficie di 13 ettari; da notare che il flusso totale della sola zona più emissiva di 5,4 ettari (aree in toni di grigio scuro) è di 16,8 ton/giorno.

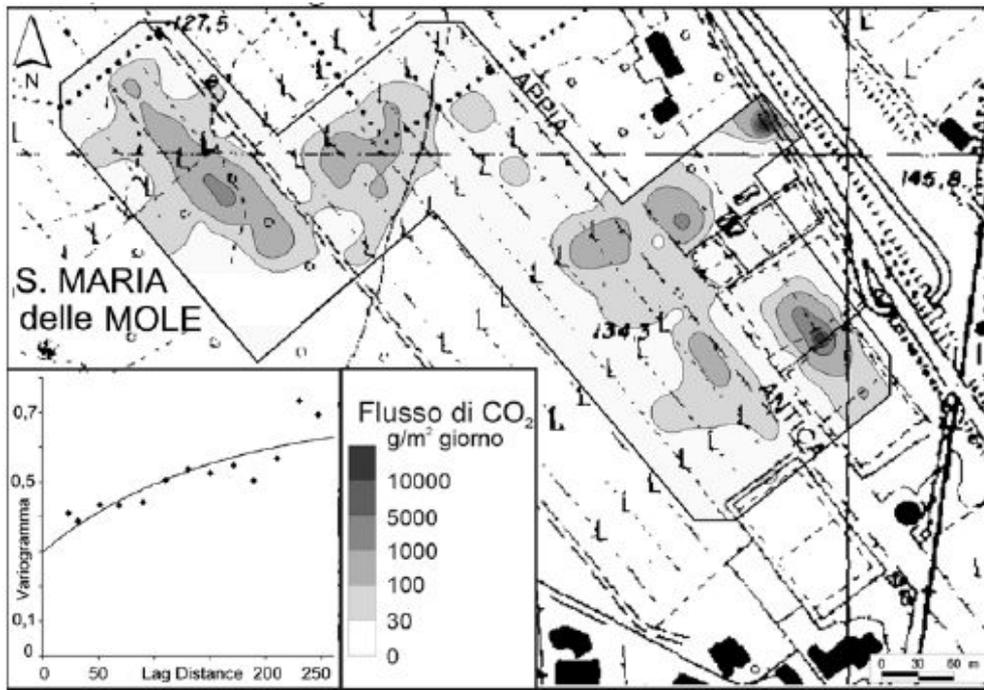


Fig. 4.26. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo a Santa Maria delle Mole della campagna del 2000 (da Carapezza et al., 2005).

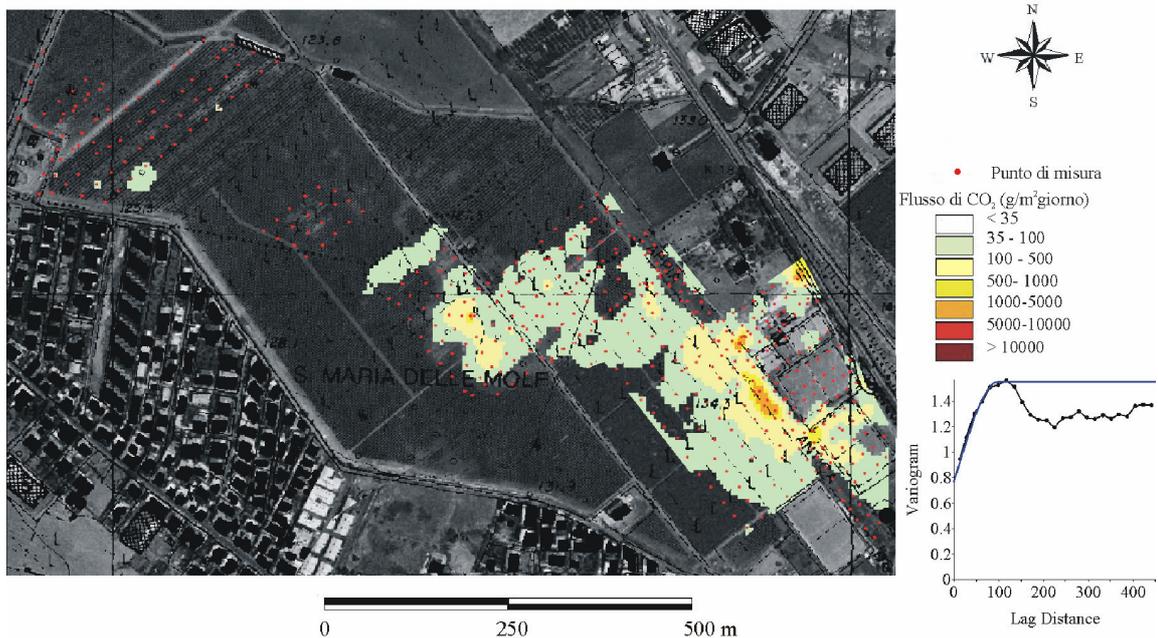


Fig. 4.27. Mappa di flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna del 2006.

Nel 2006 è stata investigata una zona più ampia (22,7 ettari) con 474 misure su una griglia regolare (Fig. 4.27) (Carapezza et al., 2007). Sono stati misurati valori di flusso fino a 8700 g/m²giorno, con una media di 139 g/m²giorno (inferiore alla media di 588 g/m²giorno calcolata per la campagna del 2000). Il flusso totale diffuso dal suolo è stato calcolato in

12,4 ton/giorno da una superficie anomala di 9 ettari. Il flusso calcolato sulla stessa superficie di 5,4 ettari di alta anomalia individuata nel 2000, assomma invece a sole 8,3 ton/giorno (un valore di circa la metà rispetto alla precedente campagna).

Entrambe le mappe di flusso diffuso di CO₂ dal suolo mostrano la stessa geometria nell'anomalia di gas, con un allineamento preferenziale NW-SE coincidente con la direzione delle faglie bordiere del sottostante alto carbonatico sepolto. La presenza di alcuni pozzi per acqua, due dei quali hanno anche dato eruzione di gas, indica che questa zona è interessata da un vistoso degassamento profondo che porta l'acquifero superficiale a condizioni di sovrassaturazione di CO₂. La forte diminuzione del flusso di CO₂ riscontrata tra il 2000 e il 2006, corrisponde a quanto osservato alla vicina Cava dei Selci e riflette un fenomeno endogeno che ha interessato una vasta area dei Colli Albani,

4.3. Vigna Fiorita

4.3.1. Le misure di flusso diffuso dal suolo e di concentrazione indoor di CO₂

Vigna Fiorita è un grande consorzio residenziale situato appena ad Est dell'area a maggior degassamento di Cava dei Selci. E' presente un pericolo da gas dovuto alla rimozione dello strato superficiale impermeabile ai gas operata dai proprietari per la costruzione delle fondazioni o di vani semi-interrati (Carapezza et al., 2000). Allo scopo di definire con precisione questa pericolosità, è stata condotta nel 2006-2007 una campagna congiunta di misura del flusso diffuso dal suolo e di concentrazione di CO₂ all'interno delle case nell'ambito del Progetto V5 "Ricerche sul degassamento diffuso in Italia" di INGV-Dipartimento della Protezione Civile. Sono state eseguite 249 misure di flusso nei giardini del consorzio, registrando valori da un minimo di 1 ad un massimo di 2900 g/m²giorno, con media di 36 g/m²giorno. La mappa del flusso diffuso è mostrata in Fig. 4.28. Vengono evidenziate varie aree a flusso anomalo, superiore al background naturale biologico la cui soglia è posta a 35 g/m²giorno secondo il metodo di Sinclair (1974), distribuite quasi ovunque ad eccezione della porzione meridionale del consorzio.

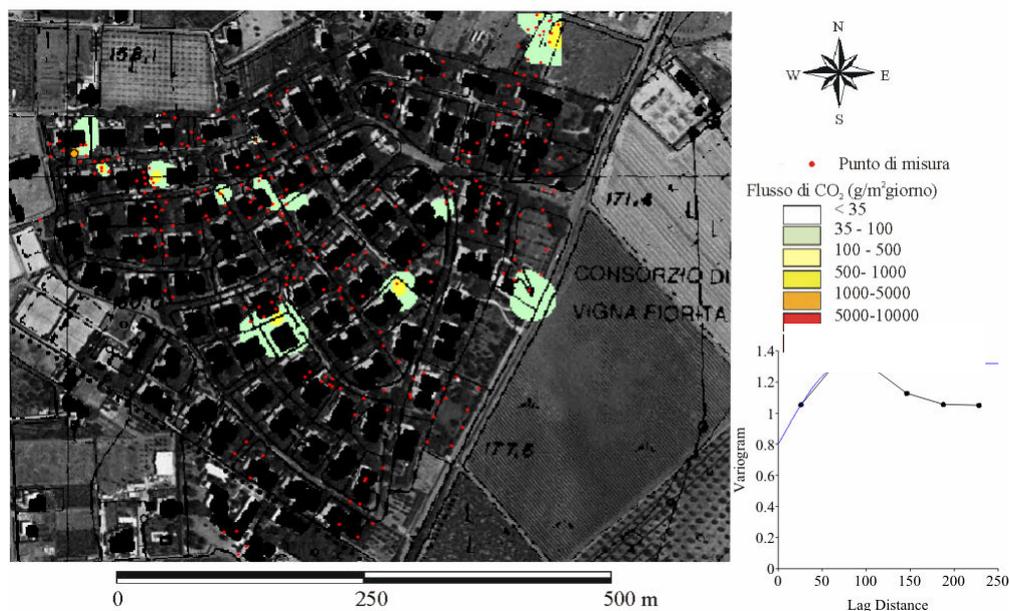


Fig. 4.28. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna 2006-07 a Vigna Fiorita.

L'area anomala è estesa per circa 11.400 m² ed è stato possibile calcolare un flusso totale di 0,9 ton/giorno.

Contestualmente alle misure di flusso, sono state misurate le concentrazioni di CO₂ nei vani e nelle intercapedini delle abitazioni in collaborazione con ricercatori dell'INGV di Roma e dell'Università di Roma Tre. In totale sono state eseguite 475 misure di concentrazione (395 in vani abitativi e 80 in intercapedini o tombini di servizio) in 72 case e per le vie interne del consorzio, e si sono registrati valori da 0 a 22 vol.% di CO₂ in abitazioni, fino al 28 vol.% in intercapedini delle case, fino al 96 vol.% in tombini o pozzi (Fig. 4.29).

Concentrazioni letali (>10 vol.%) sono state trovate in 7 case (1% del campione), in alcune altre (3,5% del campione) le concentrazioni erano pericolose (3-10 vol.%), e un 20 % delle misure ha superato il TWA (0,5 vol.%). Un terzo delle misure in intercapedini eccedeva la soglia del TWA; più dell'11% del campione era a concentrazioni superiori alla soglia di immediato pericolo (10 vol.%); e il 2,2% delle misure era superiore alla soglia immediatamente letale (25 vol.%). Un quarto delle misure in tombini e pozzi era sopra il TWA; il 6,25% del campione era sopra la soglia di immediata pericolosità; il 2,5% era sopra la soglia immediatamente letale (Fig. 4.30).

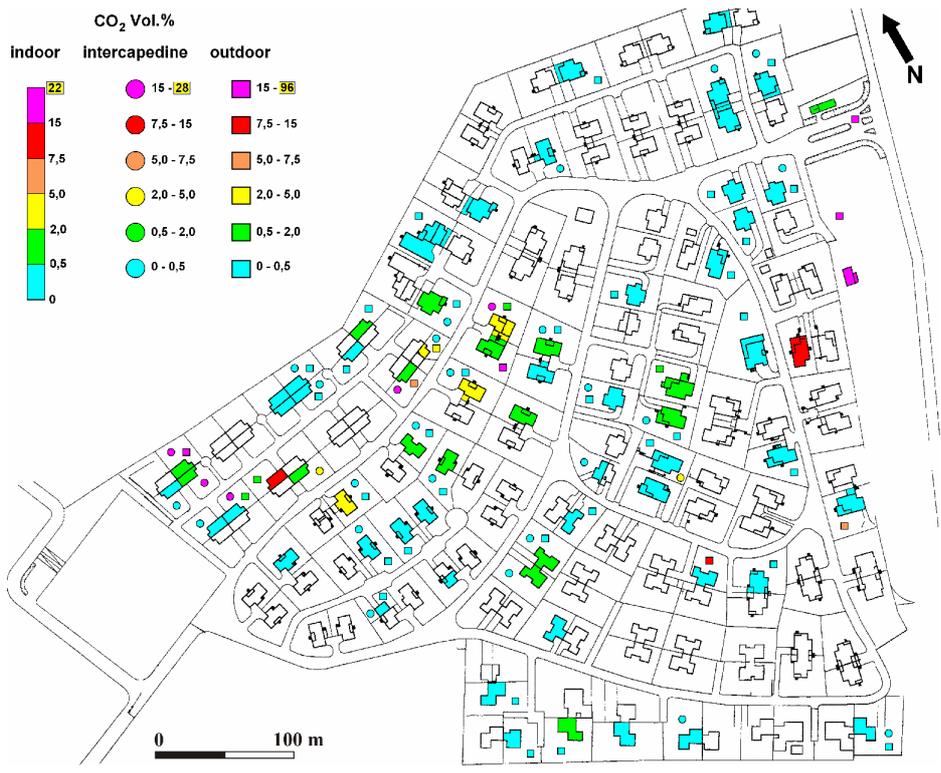


Fig. 4.29. Mappa delle misure di concentrazione di CO₂ in ambienti chiusi (abitazioni colorate secondo la scala di concentrazioni di sinistra in legenda), nelle intercapedini (cerchi colorati con scala delle concentrazioni in legenda) e nei tombini di servizio (quadrati colorati con scala di concentrazioni e limiti in legenda) del consorzio residenziale di Vigna Fiorita.

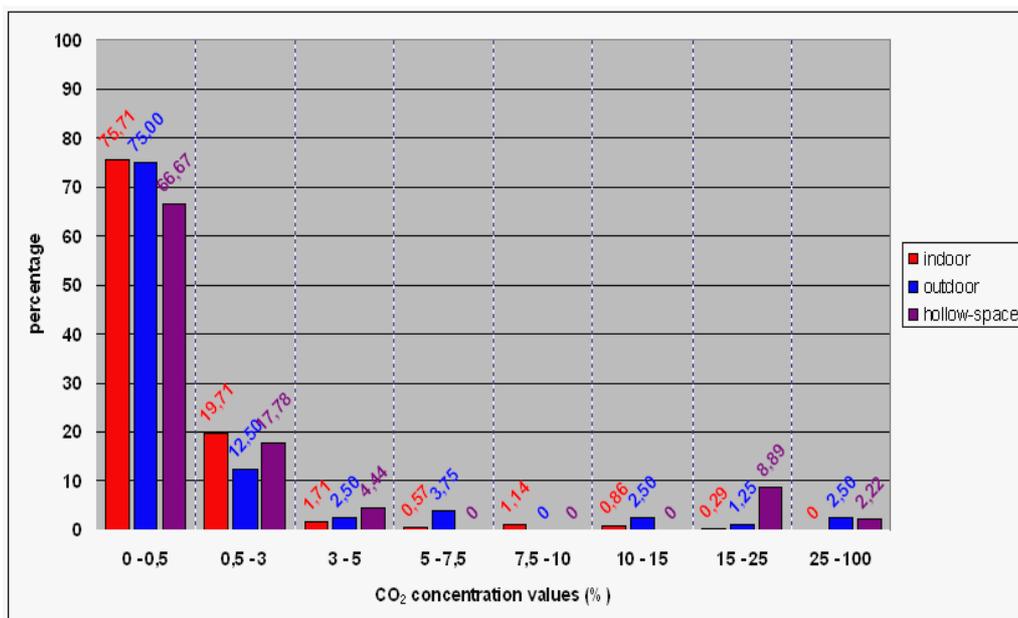


Fig. 4.30. Istogrammi delle concentrazioni misurate nella campagna 2006-07 a Vigna Fiorita. Le misure sono state eseguite in abitazioni (barre rosse), nelle intercapedini (barre viola) e in tombini di servizio (barre blu) del consorzio di Vigna Fiorita.

4.4. Solforata di Pomezia

4.4.1. Le misure di flusso di CO_2 e H_2S dal suolo

La Solforata è un'area storicamente nota per le manifestazioni gassose e la risorgenza di acque sulfuree. La manifestazione è ubicata sul bordo NW del bacino plio-pleistocenico di Ardea che costituisce una depressione tettonica allungata in direzione NE-SW e controllata da un sistema di faglie dirette (Faccenna *et al.*, 1994a). Anche questa manifestazione si trova in corrispondenza di un alto strutturale del basamento carbonatico (anomalia gravimetrica positiva) allungato in direzione NE-SW. La morfologia originale della zona è stata modificata da scavi minerari, con conseguente formazione di laghetti artificiali e pozze nella stagione piovosa.



Fig. 4.31. Panoramica sull'area a maggior rilascio di gas dal suolo alla Solforata di Pomezia (da Google Earth).

Tutta l'area è interessata da un degassamento diffuso ma la principale emissione di gas avviene presso il laghetto più occidentale e in un vicino fosso (Fig. 4.31) dove, grazie alla presenza di acqua, sono evidenti numerose bolle di gas allineate NNE, NE o ENE. Che la direzione delle faglie che alimentano l'emissione gassosa sia prevalentemente NE-SW è dimostrato anche dai profili di flusso che permettono di identificare le fratture emissive e i cui massimi sono disposti secondo questa direzione. Come già descritto per Cava dei Selci, anche alla Solforata l'abbassamento della falda idrica ha determinato negli anni un

restringimento della superficie dei laghetti. Nell'agosto 2003 i laghetti erano addirittura scomparsi e sul fondo fangoso semi-essiccato si potevano osservare spettacolari piccoli crateri e vulcanetti di fango prodotti dalle emissioni gassose (Fig. 4.32).



Fig. 4.32. Crateri creati dalle emissioni di gas sul fondo essiccato del laghetto della Solforata.

In una prospezione con la camera d'accumulo, eseguita nell'agosto 1996 con 110 punti di misura su una superficie di 55.000 m² (Fig. 4.33), Chiodini e Frondini (2001) hanno stimato alla Solforata un flusso conduttivo di CO₂ di 46 ton/giorno.

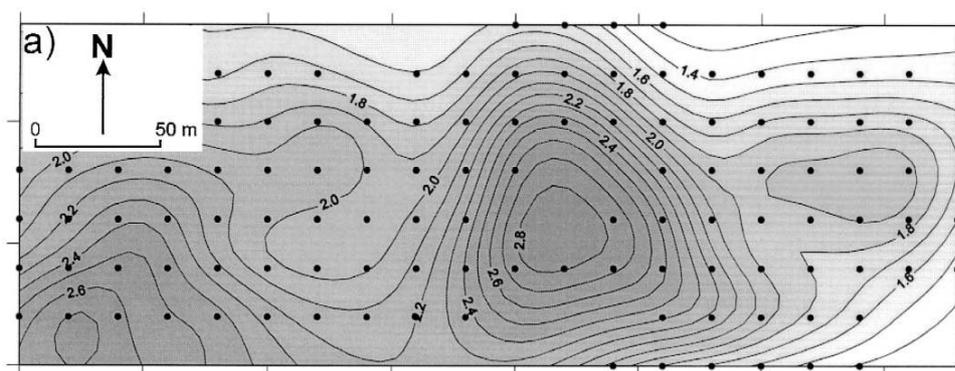


Fig. 4.33. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo di agosto 1996 (da Chiodini & Frondini, 2001)

Un'altra campagna è stata eseguita nell'estate 2003 da Carapezza et al. (2005). Il flusso di CO₂ è stato misurato su 200 punti su un'area di circa 3 ettari (Fig. 4.34).

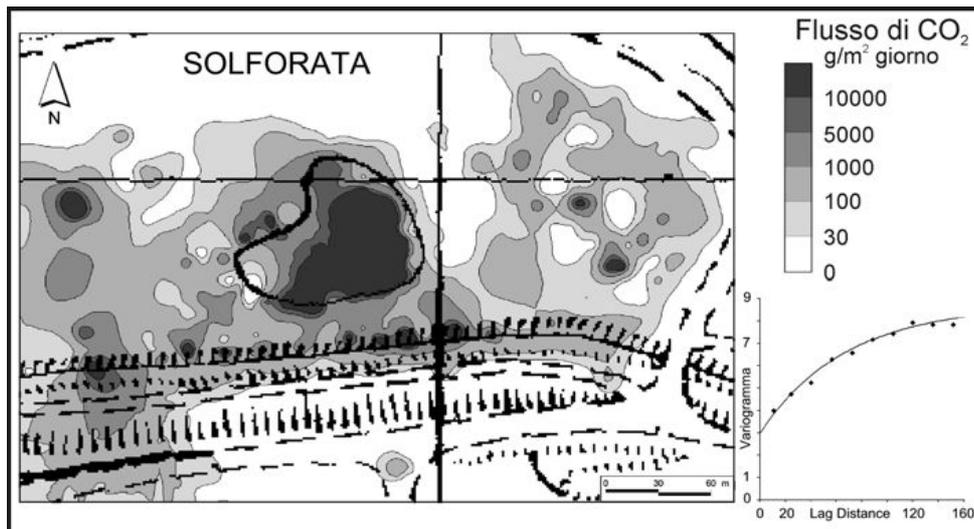


Fig. 4.34. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo del 2003 (da Carapezza et al., 2005).

Il valore medio del flusso è di 936 g/m²giorno, con massimi di oltre 36.000 g/m²giorno. Il flusso totale conduttivo di CO₂ da 30.000 m² è stato stimato in 61,2 ton/giorno (Carapezza et al., 2005).

Nel maggio 2007 è stata eseguita una nuova campagna di misura del flusso diffuso dal suolo. In questa occasione è stato misurato per la prima volta anche il flusso di H₂S.

In Fig. 4.35 è mostrata la mappa del flusso di CO₂ che è stata ottenuta sulla base di 357 misure di flusso eseguite su una superficie di circa 264.000 m². Si sono misurati flussi da 0,16 a 9500 g/m²giorno, con una media di 334. Questa campagna è stata condotta su un'area più ampia rispetto alle precedenti e questo ha permesso di individuare nuovi settori anomali della Solfiorata di Pomezia (Fig. 4.35).

Soil Flux map

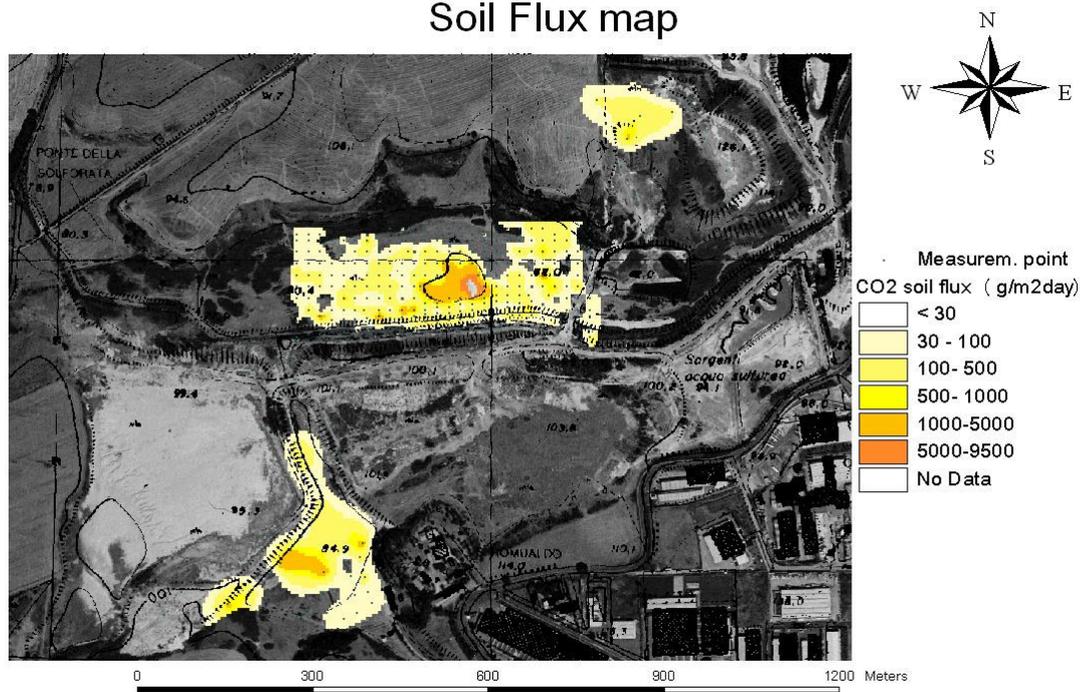


Fig. 4.35. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna di maggio 2007.

Tab. 4.8. Classi di flusso e loro contributo al degassamento totale di CO₂

classe g/m ² giorno	frequenza %	area m ²	flusso medio g/m ² giorno	flusso totale ton/giorno
0,1-7,5	15,6	*	background	*
7.5-55	49,7	97.016	27,4	2,66
55-400	24,0	76.441	140,6	10,75
400-3000	8,6	16.516	1079	17,82
3000-9500	2,2	2201	5810	12,78
Totale		192.200		44,01

*il contributo del background non è sommato a quello anomalo

I risultati del calcolo del flusso totale sono mostrati in Tab. 4.8: è stato calcolato un flusso totale di 44 ton/giorno da una superficie anomala di 192.200 m².

Come già detto, nel maggio 2007 è stato investigato anche il flusso diffuso di H₂S dalla Solforata. Sono state eseguite in totale 357 misure con risultati da 0 a 168 g/m²giorno. 274 di queste misure (quasi il 77% del totale) hanno dato un valore nullo (Tab. 4.9) ed esse sono interpretate come valori di background naturale. Le restanti 83 misure individuano un'area di degassamento diffuso anomalo localizzata nella zona del laghetto principale (Fig. 4.35). Vale a dire che in alcuni settori della Solforata si verifica un degassamento diffuso di sola CO₂ dal suolo. Questo può dipendere, considerato che l'H₂S è un componente maggiore dei gas emessi dai Colli Albani, dal fatto che nei punti in cui il

flusso dal profondo è basso, questo gas viene assorbito dalla falda senza raggiungere la superficie.

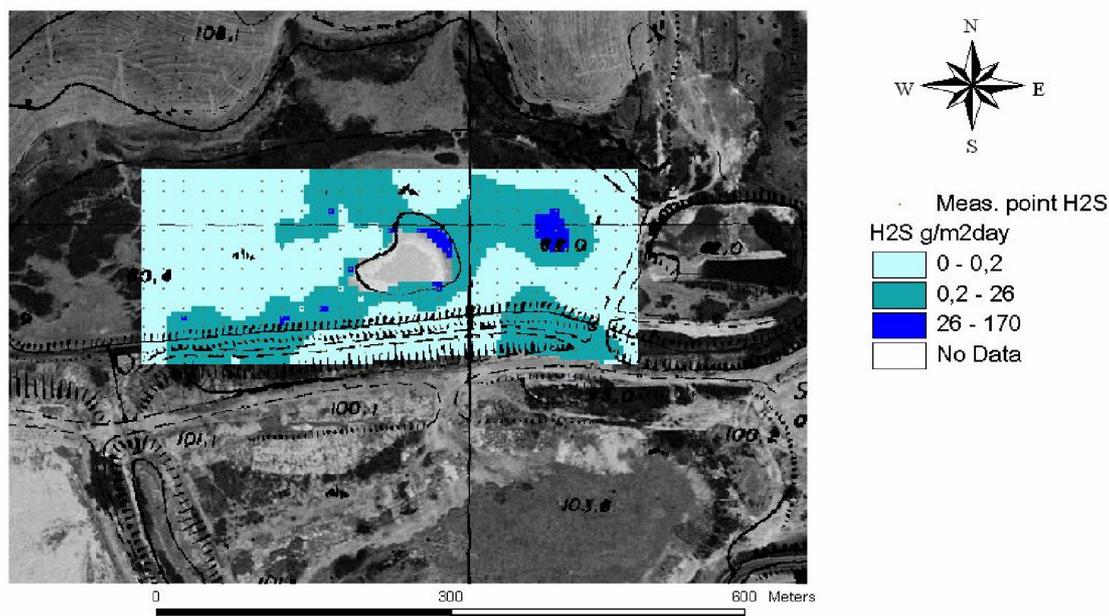


Fig. 4.36. Mappa del flusso diffuso di H₂S dal suolo della campagna di maggio 2007.

Tab. 4.9. Classi di flusso e contributo al degassamento totale di H₂S

classe g/m ² giorno	frequenza %	area m ²	flusso medio g/m ² giorno	flusso totale ton/giorno
0	76,8		background	
0,01-0,19	17,1	56202	0,05	0,003
0,19-26	2,8	37497	5,9	0,22
26-168	3,4	3577	68,5	0,24
Totale		97276		0,47

Dai calcoli eseguiti risulta un flusso totale di circa 0,5 ton/giorno di H₂S da un'area di circa 97000 m² (Tab. 4.9).

4.4.2. Le misure di flusso viscoso di gas dall'acqua

Nel maggio 2007 si è applicata per la prima volta una nuova tecnica di misura del flusso viscoso di gas dal suolo o da superfici d'acqua, con l'uso di una piattaforma galleggiante o di secchi come camere di accumulo, e di contatori del gas ad uso civile come misuratori di portata (vedi Cap. 2.2 per la descrizione della metodologia) (Fig. 4.36). La Solforata di Pomezia è infatti il sito dei Colli Albani dal quale si manifesta in maniera più intensa il degassamento viscoso (convettivo) ben visibile come bolle di gas gorgogliante anche di grandi dimensioni sia nel laghetto che lungo il vicino Fosso della Solforata. Un precedente tentativo di stima del flusso attraverso misure eseguite con la tecnica della camera

d'accumulo da Carapezza et al. (2005) aveva portato a risultati di parecchie decine di ton/giorno emesse in atmosfera. Il metodo, e di conseguenza la stima, era affetto però da un errore molto alto quando si misurano flussi elevati.



Fig. 4.37. Esempi delle misure di flusso viscoso eseguite alla Solforata di Pomezia nel maggio 2007. a) Piattaforma galleggiante nel laghetto; b) Secchi e contatori nel fosso.

Con questa innovativa tecnica sono state eseguite 30 misure del flusso (21 dal lago con piattaforma galleggiante e 9 dal fosso con secchio) e sono state misurate portate da 0,7 a 62 l/min distinte in base al diagramma di probabilità cumulata di Fig. 4.38 in sei misure a bassa portata (<4 l/min), sedici medie (4-27 l/min) e otto alte (27-62 l/min). Queste ultime si sono misurate solo in otto punti ad alto flusso. Le seconde sono state scelte come rappresentative di 55 punti riconosciuti come mediamente emissivi che è stato possibile contare sulla superficie del laghetto. Le prime sono infine un campione rappresentativo delle centinaia di punti blandamente emissivi non precisamente quantificabili presenti nel laghetto e lungo il fosso.

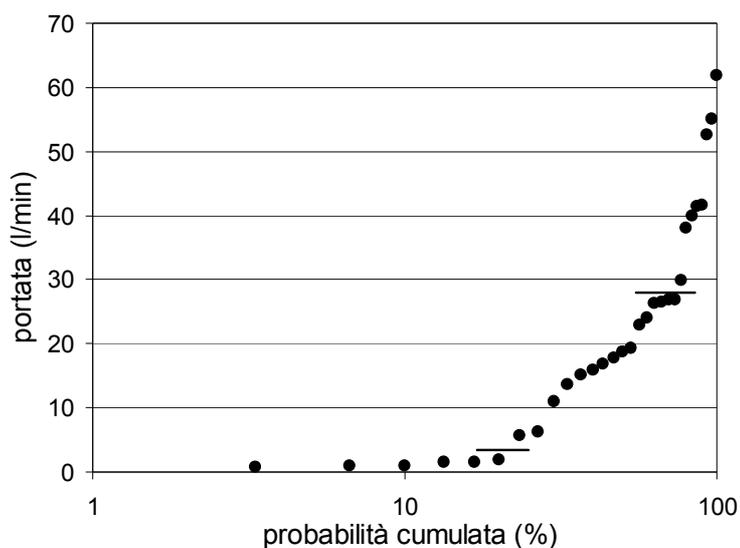


Fig. 4.38. Diagramma di probabilità cumulata delle misure di flusso viscoso eseguite alla Solforata nel maggio 2007.

Supponendo che i punti a basso flusso possano essere cinquecento, la somma dei contributi medi di ogni classe dà un flusso viscoso totale di 5,4 ton/giorno di CO₂ e 0,04 ton/giorno di H₂S.

La somma dei contributi dei flussi diffusi e viscosi di CO₂ e H₂S misurati alla Solforata di Pomezia nel maggio 2007 è quindi di 49,4 ton/giorno e 0,5 ton/giorno rispettivamente.

4.4.3. Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S

Nel maggio 2007 sono state eseguite anche misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL alla Solforata di Pomezia.

Sono stati eseguiti due profili TDL lunghi 68 e 54 m (solo H₂S in questo secondo profilo per malfunzionamento del TDL della CO₂) sopra il laghetto durante il giorno 11 maggio (Figg. 4.39 e 4.40), ed un profilo di 118 m lungo il fosso durante la notte tra il 14 ed il 15 maggio 2007 (Fig. 4.41).

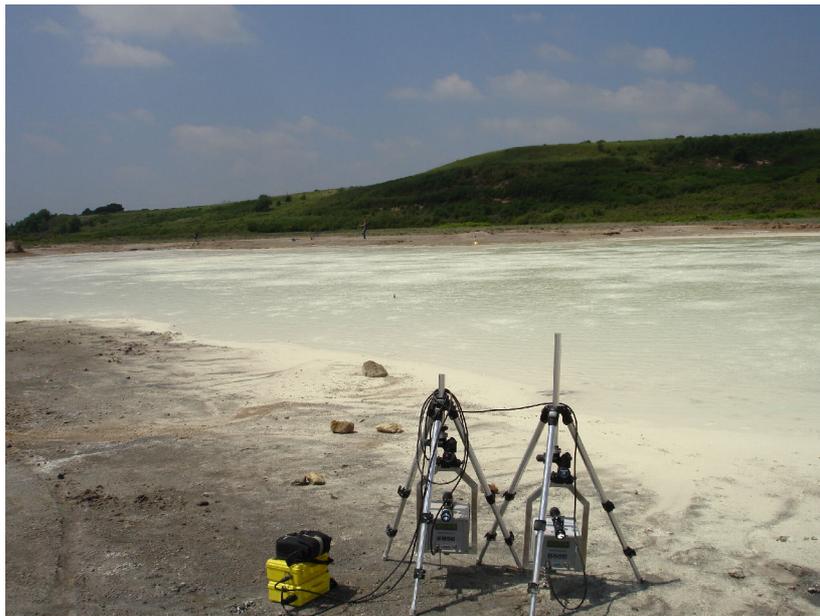


Fig. 4.39. Profilo TDL eseguito sopra il laghetto della Solforata l'11 maggio 2007.

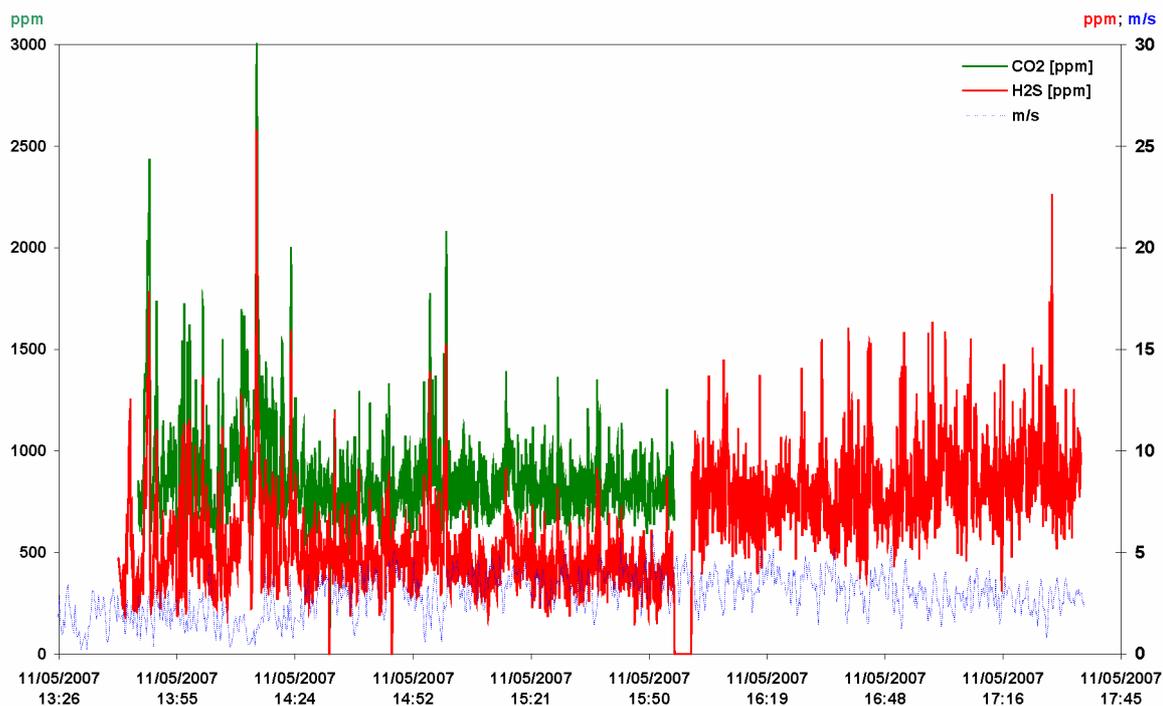


Fig. 4.40. Misure di concentrazione in aria eseguite con TDL sopra il laghetto della Solforata di Pomezia l'11 maggio 2007 a 20 cm di altezza. Le concentrazioni di CO₂ del primo profilo di 68 m sono in verde con scala sull'asse di sinistra. L'asse delle ordinate di destra mostra la scala dei valori delle concentrazioni di H₂S (in rosso) e della velocità del vento (in blu). Durante il secondo profilo di 54 m sono state misurate solo le concentrazioni di H₂S.

Le concentrazioni in aria misurate in questi due profili variano da un minimo di 139 ad un massimo di 3026 ppm di CO₂, e da un minimo di 1,4 a un massimo di 25,8 ppm di H₂S. L'8,5 % delle misure è compreso nell'intervallo tra 10 e 15 ppm di H₂S (limiti TWA e STEL), e solo lo 0,7% delle misure eccede la soglia dello STEL (Fig. 4.40). È chiaro, comunque, che questi sono valori medi su percorsi di varie decine di metri, e che quindi esistono settori in cui le concentrazioni in aria sono molto più alte, però, data la inaccessibilità del laghetto, in questo settore non si pone un problema di pericolosità da gas.

Ben diversa è la situazione del fosso, le cui misure TDL di concentrazione di CO₂ e H₂S in aria a 25 cm di altezza sono mostrate in Fig. 4.41. Questa registrazione è stata eseguita per 19 ore dalle 12:00 del giorno 14 alle 7:00 del giorno 15 maggio 2007, fino a esaurimento della batteria.

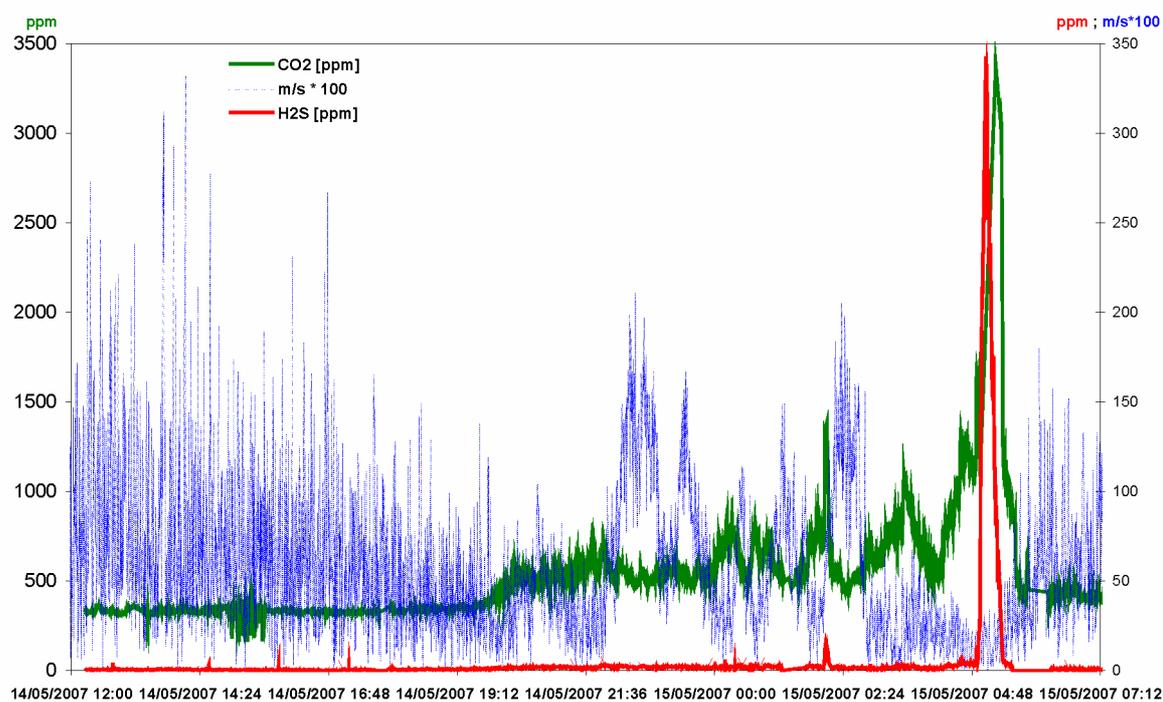


Fig. 4.41. Misure di concentrazione con TDL di CO₂ (linea verde; asse delle ordinate di sinistra) e H₂S (linea rossa; asse di destra) in aria, e misure della velocità del vento (linea blu, asse di destra) magnificate di cento volte, eseguite nel Fosso della Solforata a 25 cm dal suolo durante la notte tra il 14 e il 15 maggio 2007.

Si vede dalla Fig. 4.41 come le concentrazioni dei gas in aria variano in relazione con la velocità del vento. Si può notare che il vento ha soffiato più intensamente nel primo pomeriggio andando ad affievolirsi all'incirca tra le 16:30 e le 19:00. Nelle successive ore, fino alle 2:00, si è mantenuto basso con delle folate più forti di frequenza circa oraria, per poi quasi cessare fino alle 5:00 del mattino. Infine ha ripreso intensità fino alla fine della registrazione alle 7:00 del 15 maggio. Contemporaneamente si osserva un andamento inverso delle concentrazioni di CO₂ e H₂S. Nel primo pomeriggio i valori sono bassi e compresi tra 300 e 360 ppm di CO₂ e tra 0,1 e 1 ppm di H₂S. All'incirca dalle 17:00 le concentrazioni in aria di CO₂ crescono prima lentamente e dalle 19:00 rapidamente fino a 500-600 ppm di fondo e con picchi fino a 1000-1400 ppm; l'H₂S cresce fino a valori di 1-3 ppm con picchi fino a 13,5 ppm. Dalle 2:00 un nuovo comportamento parallelo di CO₂ e H₂S porta a misurare dei picchi in aria rispettivamente di 3500 ppm e 343 ppm. Per un'ora circa le concentrazioni medie di H₂S sono state a livelli pericolosi (>100 ppm) o immediatamente letali (>250 ppm). Si ripete che, considerando che il TDL esegue una misura media di concentrazione nel suo percorso ottico (di ben 118 m per questo profilo), queste condizioni pericolose o addirittura letali si sono presumibilmente verificate in

qualche porzione del fosso per un tempo più lungo e a valori più elevati, anche per la CO₂. Questi dati spiegano perché lungo il fosso della Solforata si ritrovano spesso carcasse di animali anche di grande taglia (uccelli, volpi, cinghiali).

4.5. Tor Caldara

Le misure di flusso di CO₂ dal suolo

Nell'agosto 2005 è stata eseguita una campagna di misure di flusso di CO₂ dal suolo (85 misure su circa 160.000 m²) all'interno della Riserva Naturale di Tor Caldara situata lungo la costa tirrenica a poche decine di km a S di Roma al margine sudoccidentale dei depositi vulcanici dei Colli Albani (Fig. 3.5). Anche questa è un'area nota per le emissioni di gas dal suolo, situata in prossimità dell'epicentro del terremoto di Anzio di M= 4,7 del 22 agosto 2005. All'interno della Riserva sono presenti due cave abbandonate per la coltivazione dello zolfo dalle quali si verificano le emissioni più intense (Fig. 4.42 e 4.43).

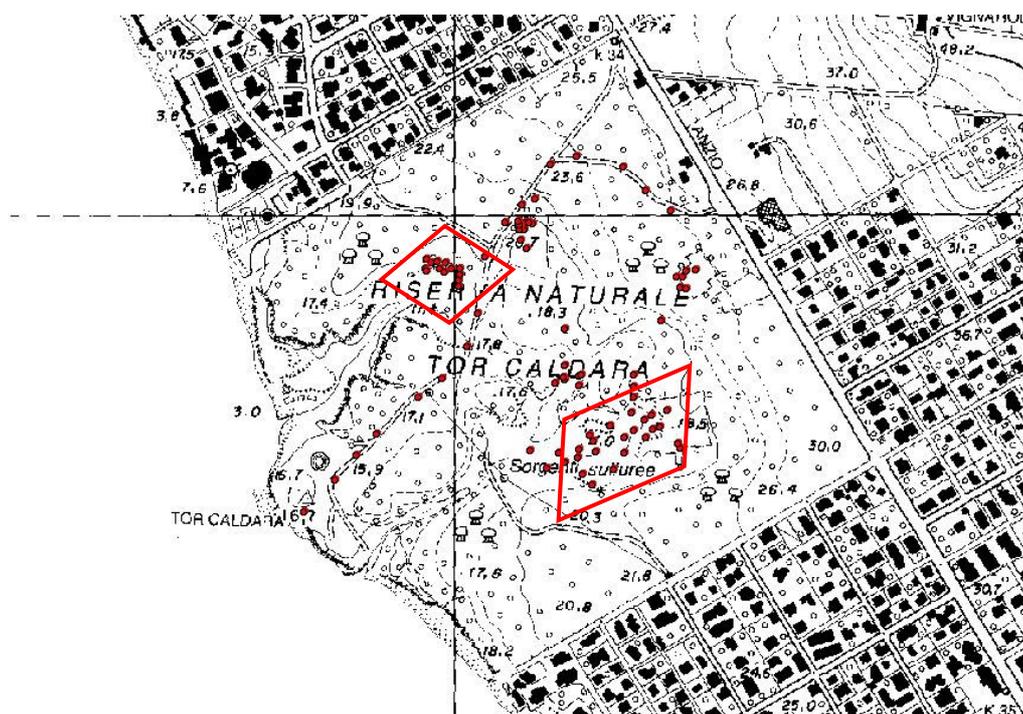


Fig. 4.42. Localizzazione delle 85 misure di flusso di CO₂ dal suolo della campagna di agosto 2005 nelle Riserva di Tor Caldara. Il rombo più piccolo individua la cosiddetta miniera piccola, il rombo più a Sud individua la miniera grande.

Sono stati misurati flussi diffusi di CO₂ da 4 a 3300 g/m²giorno, con media di 259 g/m²giorno. È stato stimato un flusso totale di 13,2 ton/giorno da una superficie anomala di circa 148.700 m² (Tab. 4.10 e Fig. 4.43).

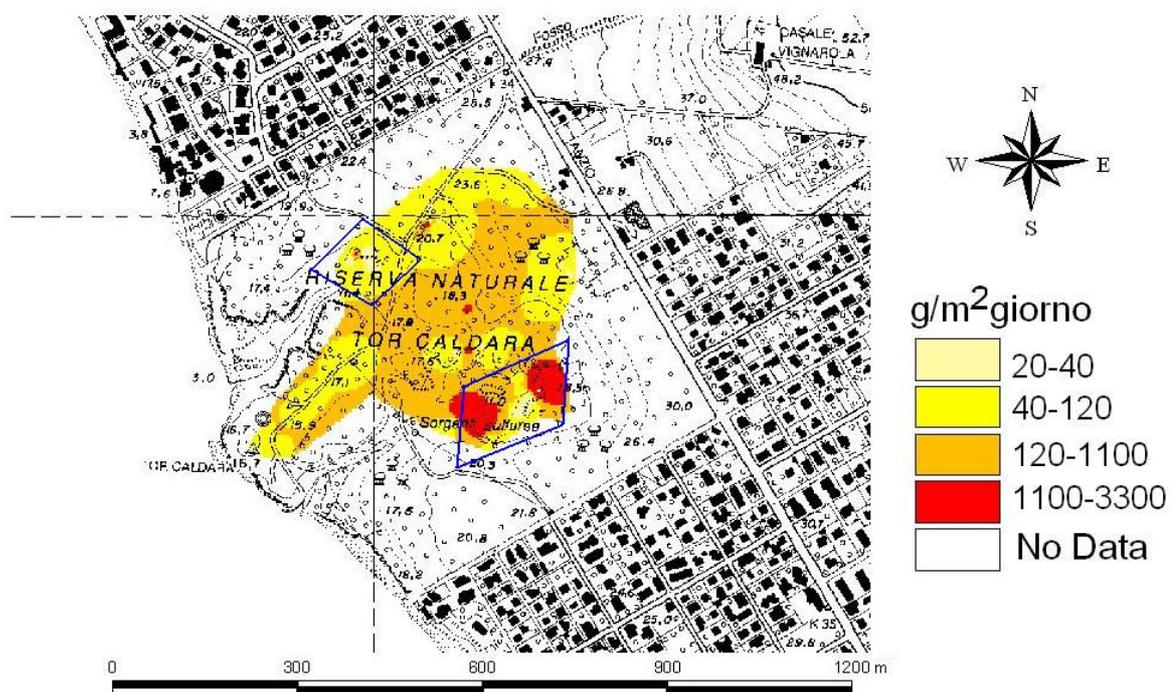


Fig. 4.43. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna di agosto 2005 a Tor Caldara.

I rombi blu individuano le miniere abbandonate.

Tab. 4.10. Calcolo del flusso totale diffuso di CO₂ della campagna di agosto 2005 a Tor Caldara.

classe g/m ² giorno	Frequenza %	Flusso med. g/m ² giorno	Area m ²	Flusso tot. ton/giorno
4-20	27,1	background		*
20-40	34,1	30,4	62.8953	1,9
40-120	18,8	69,5	77.530	5,4
120-1100	12,9	587,7	7655	4,5
1100-3300	7,1	2211,0	626,5	1,4
Totale			148700	13,2

* il contributo del background non è aggiunto al flusso e all'area totali anomali

4.6. Geochimica dei laghi craterici di Albano e di Nemi.

Il Lago di Albano, situato 20 km a SE di Roma, è ospitato all'interno della depressione craterica più recente del complesso vulcanico quiescente dei Colli Albani (Fig. 3.4), i cui depositi più recenti, sia vulcanici che epivulcanici –parecchi lahar generati da fuoriuscite di acque del lago-, sono stati datati nell'Olocene (Funciello et al., 2002, 2003; Soligo et al., 2002). È il lago craterico più profondo d'Italia (-167 m nel novembre 2005; Anzidei et al., 2008), con una morfologia ad imbuto (Martini et al., 1994; Anzidei et al., 2008). Esistono

numerose evidenze morfologiche, stratigrafiche, archeologiche e storiche delle variazioni del suo livello (Fig. 4.44). Al duplice scopo di prevenire future esondazioni, del tipo di quelle che nel IV Sec. a.C. avevano devastato l'area albana e di irrigare i terreni circostanti, nel 394 a.C. i Romani scavarono un tunnel (Fig. 3.4) per mantenere il livello 74 m al di sotto del margine più basso del bordo craterico (Chiarucci et al., 1987; Funicello et al., 2003; Anzidei et al., 2008; De Benedetti et al., 2008). Il lago è localizzato al di sopra dell'alto strutturale carbonatico sepolto di Ciampino, allungato in direzione NW-SE e che contiene un reservoir geotermico di media entalpia dal quale risalgono fluidi verso la superficie (Carapezza et al., 2005). Studi anteriori hanno riconosciuto la presenza di emissioni di gas sul fondo del lago (Caputo et al., 1986).

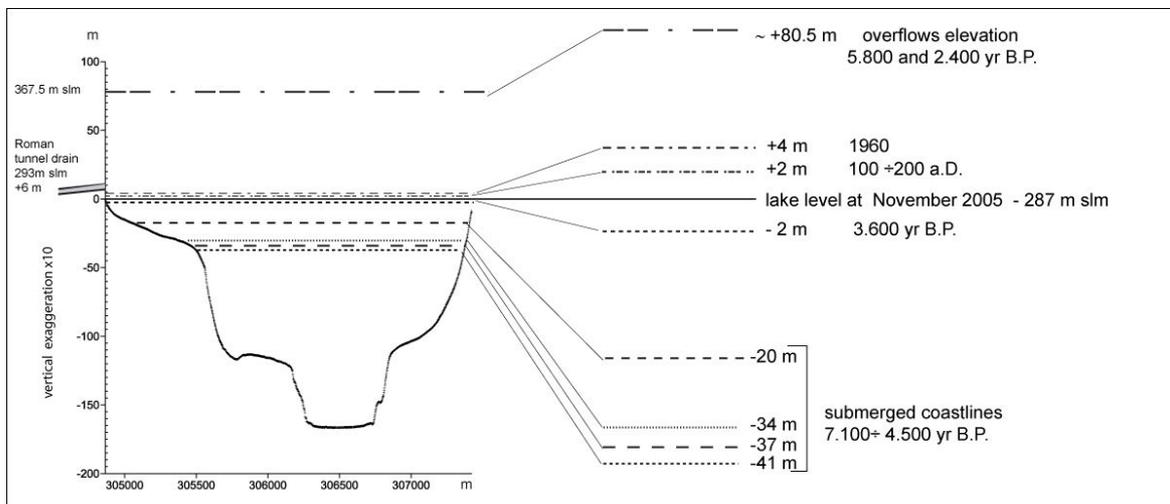


Fig. 4.44. Variazioni storiche del livello del lago Albano (esagerazione verticale 10X) da Anzidei et al. (2008). Le variazioni in positivo o in negativo sono riferite al livello del lago a novembre 2005 (287 m s.l.m.).

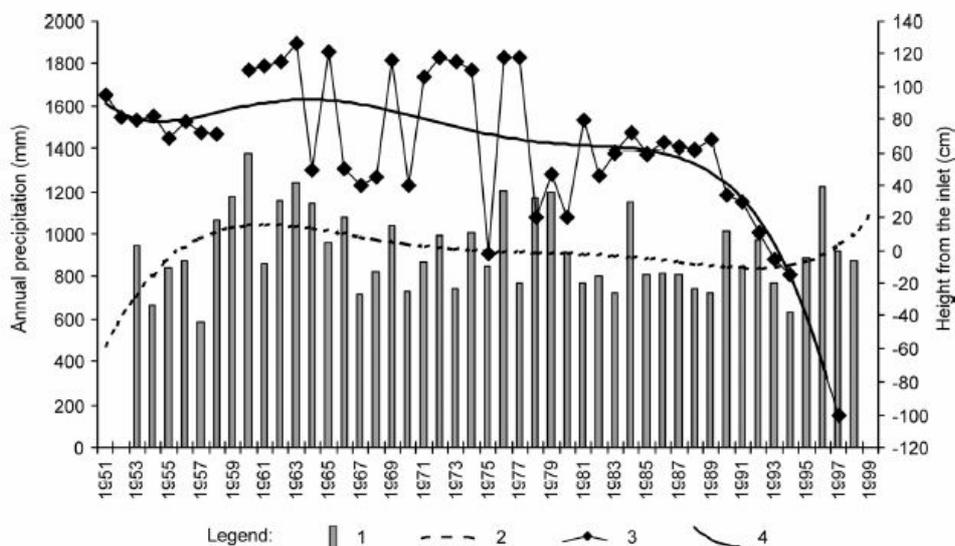


Fig. 4.45. Variazioni recenti del livello del lago espresse in cm rispetto alla quota di 293 m s.l.m. dell'imbocco del tunnel di drenaggio (rombi neri; asse di destra) a confronto con le precipitazioni annuali (da Capelli & Mazza, 2005).

La geochimica del lago è stata studiata in precedenza da Martini et al. (1994), Pedreschi et al. (1995) e Cioni et al. (2003). Quest'ultimo è il lavoro più completo e descrive i risultati di una campagna eseguita nel dicembre 1997 con misure di temperatura, pH, ossigeno disciolto, conduttività elettrica eseguite lungo profili verticali con sonda multiparametrica Ocean Seven 410, e delle analisi dei componenti maggiori e minori delle acque, e delle analisi chimico-isotopiche dei gas disciolti campionati a diverse profondità. I risultati indicano una bassa probabilità di eventi tipo Nyos (rilascio di una nube di gas da un lago craterico per *rollover* delle acque), ma l'alta densità abitativa ha suggerito l'opportunità di ripetere campagne periodiche di monitoraggio geochimico delle acque. Dal 2001 è iniziato lo studio geochimico sistematico del lago, con ripetizione delle misure dei parametri chimico-fisici (T, pH, O₂, conducibilità, salinità) ed analisi di acque e gas in esse disciolti lungo profili verticali, prevalentemente nel punto più profondo del lago (Carapezza et al., 2005b, 2008; Anzidei et al., 2008). Due profili simili sono stati eseguiti anche nel vicino Lago di Nemi nel maggio 2004 (Carapezza et al., 2008a). È stata anche eseguita una campagna di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo lungo le rive dei laghi di Albano e Nemi (Carapezza et al., 2005b; 2008a).

Di seguito vengono riportati i dati raccolti e pubblicati in due articoli scientifici (Anzidei et al., 2008; Carapezza et al., 2008a) di cui lo scrivente è co-autore.

4.6.1. Le misure di flusso di CO₂ dal suolo

Sono state eseguite 376 misure di flusso diffuso lungo le rive, spesso molto strette, dei laghi di Albano (242 misure) e Nemi (134 misure) (Fig. 4.46).

Una debole anomalia di flusso è stata osservata lungo i bordi settentrionale e meridionale di Nemi con valori massimi leggermente superiori a 100 g/m²giorno (Fig. 4.46A). Una anomalia di flusso più pronunciata si estende per circa 700 m lungo il bordo orientale del lago Albano in prossimità della sorgente ormai secca dell'Acqua Acetosa (Fig. 4.46A e D). Le misure di flusso qui eseguite hanno dato un valore massimo di 3000 g/m²giorno e una media di 227 g/m²giorno. La morfologia acclive del bordo craterico interno e la densa vegetazione hanno impedito di eseguire misure su una griglia regolare, e la mappa di flusso di Fig. 4.46D non può essere considerata pienamente rappresentativa. Le anomalie principali sembrano, comunque allineate in direzione circa NE-SW ed il loro prolungamento (linee a tratteggio in Fig. 4.46D) va ad incontrare la zona di emissione di gas del fondo del lago.

Questi flussi di CO₂, sebbene ben più bassi di quelli delle principali strutture di degassamento dei Colli Albani (Cava dei Selci o Santa Maria delle Mole le più vicine), sono comunque superiori ai flussi prodotti dalla sola attività biologica e indicano che esiste un significativo rilascio di gas endogeno, soprattutto dal bordo orientale del Lago Albano (Carapezza et al, 2008).

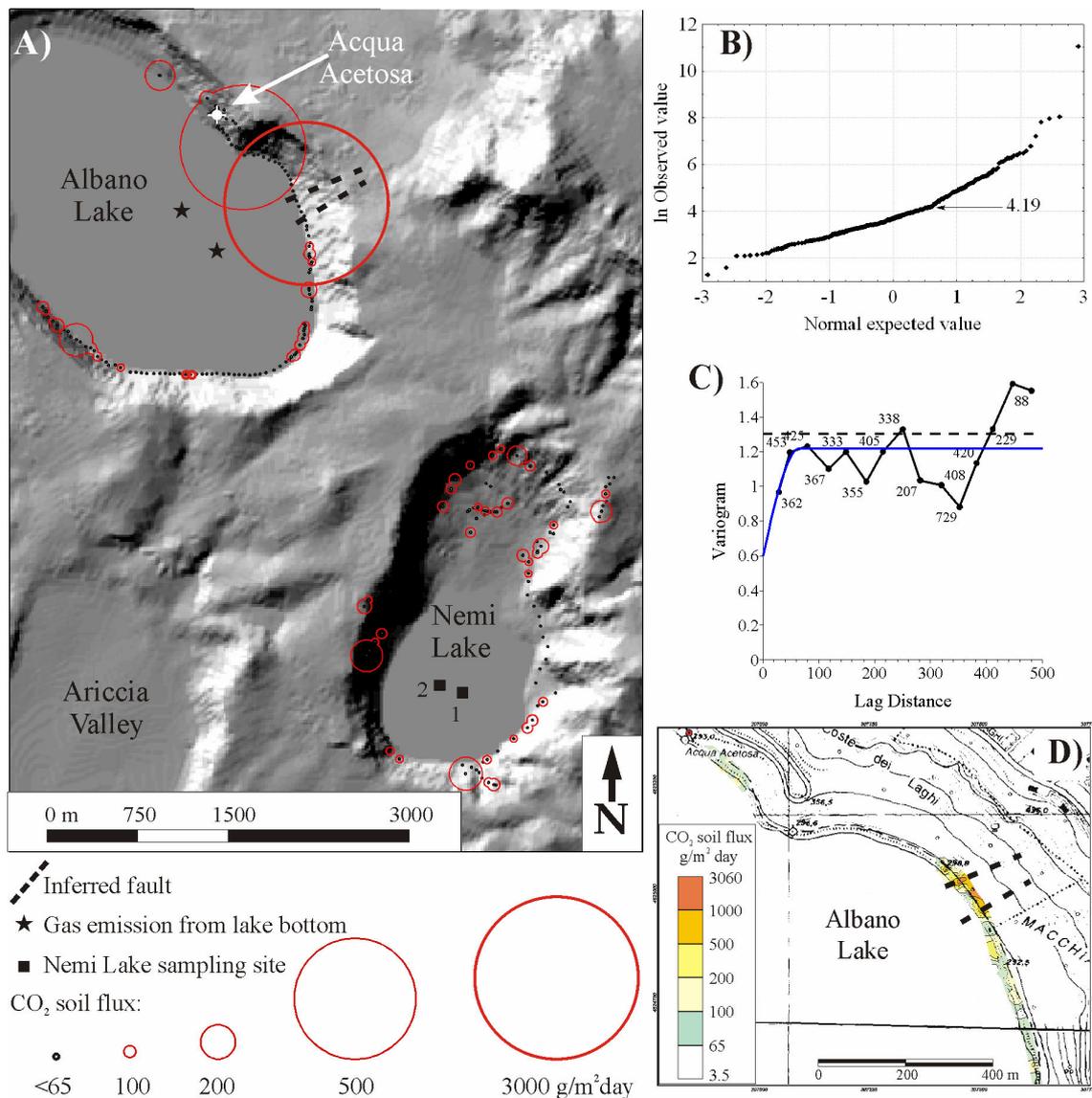


Fig. 4.46. A) Degassamento diffuso dalle rive dei laghi di Albano e di Nemi. Il diametro dei cerchi rossi è proporzionale al flusso dal suolo (cerchi neri: background < 65 g/m²giorno); B) Normal Probability Plot delle misure di flusso espresse in logaritmi naturali (la freccia nera indica la soglia tra background naturale e flusso endogeno); C) Semivariogramma utilizzato per il kriging delle misure di flusso; D) Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo relativa all'area di emissione più intensa dal bordo orientale del Lago Albano. I quadrati nel lago di Nemi indicano l'ubicazione dei profili con sonda multiparametrica.

4.6.2. I profili verticali multiparametrici

Al fine di seguire l'evoluzione temporale delle condizioni chimico-fisiche delle acque, sono stati eseguiti nel lago Albano venti profili verticali dal luglio 2001 a settembre 2008, in collaborazione con ricercatori dell'IGG-CNR di Pisa, con le stesse metodologie e tecniche analitiche di Cioni et al. (2003). Oltre al profilo nel punto più profondo del lago, ripetuto in ogni campagna, nel luglio 2001 sono stati eseguiti anche tre profili allineati lungo l'asse maggiore del lago; nel giugno 2003 sono stati misurati altri tre profili allineati con le fratture supposte dai dati di flusso sul bordo del lago; nel maggio 2004 un ulteriore profilo è stato misurato nel punto più profondo; dal novembre 2007 vengono eseguiti due profili trasversali all'asse maggiore del lago in due settori individuati come crateri dalla batimetria di dettaglio di Anzidei et al. (2008) (inserto in Fig. 3.4).

Ad eccezione delle variazioni stagionali che si registrano nelle porzioni più superficiali della colonna d'acqua, i profili verticali di T e O₂ disciolto mostrano che il lago è costituito: i) da un epilimnio ricco in ossigeno disciolto fino a -30/-35 m; ii) un termocline a O₂ ridotto fino a -50/-80 m –che sono le probabili profondità di mixing stagionale-; iii) un ipolimnio anossico con temperature che si mantengono costanti fino al fondo del lago (Figg. 4.47 da A a F).

Il pH, che è compreso tra 7,8 e 8,8 in superficie, decresce con la profondità (Figg. 4.47B e D) e si è osservato nel tempo un radicale cambiamento in questo parametro chimico. Nelle campagne dal dicembre 1997 al gennaio 2005 si sono registrati nell'ipolimnio valori leggermente acidi compresi tra 6,6 e 6,88. Dal maggio 2005 a gennaio 2006 invece il pH è cresciuto fino a divenire leggermente basico con valori che arrivano fino a 7,5 nel dicembre 2007 (Figg. 4.47 e 4.48). Anche la temperatura ha mostrato delle consistenti variazioni. Nello stesso periodo da maggio 2005 a gennaio 2006, si è osservata un'inversione tra -32 e -100 m, e le temperature si sono abbassate di circa 0,4/0,6 °C. Le acque profonde, che erano state ad una temperatura circa costante di 9,1/9,2 °C da dicembre 1997 a gennaio 2005, sono diminuite per passare a 8,6/8,7 °C registrati da maggio 2006 a ottobre 2008 (Figg. 4.46A, 4.46D e 4.47). Questo indica che a partire dall'inverno 2005-2006 si è verificato un mixing con acque invernali fredde di superficie che hanno sostituito quelle meno dense profonde.

Come detto, le temperature della superficie cambiano con la stagione, dai 25/28 °C dell'estate ai 9/10 °C dell'inverno avvicinandosi alle temperature del fondo e riducendo le condizioni di stabilità del lago. Si può quindi verificare un mixing di acque ipolimniche meno dense ma più ricche in nutrienti con acque epilimniche più fredde e quindi più dense,

generando delle fioriture algali come quelle osservate nel febbraio 2004 a -10 e -20 m. Questa eutrofizzazione rappresenta un pericolo biologico potenziale, poiché la biomassa algale è composta da parecchie specie sia epatotossiche che neurotossiche (Elwood & Albertano, 2005). Queste intense attività biologiche nell'epilimnio possono anche spiegare, insieme al rovesciamento delle acque, le riduzioni nell'O₂ disciolto che talora si osservano a quelle profondità (Carapezza et al., 2008a).

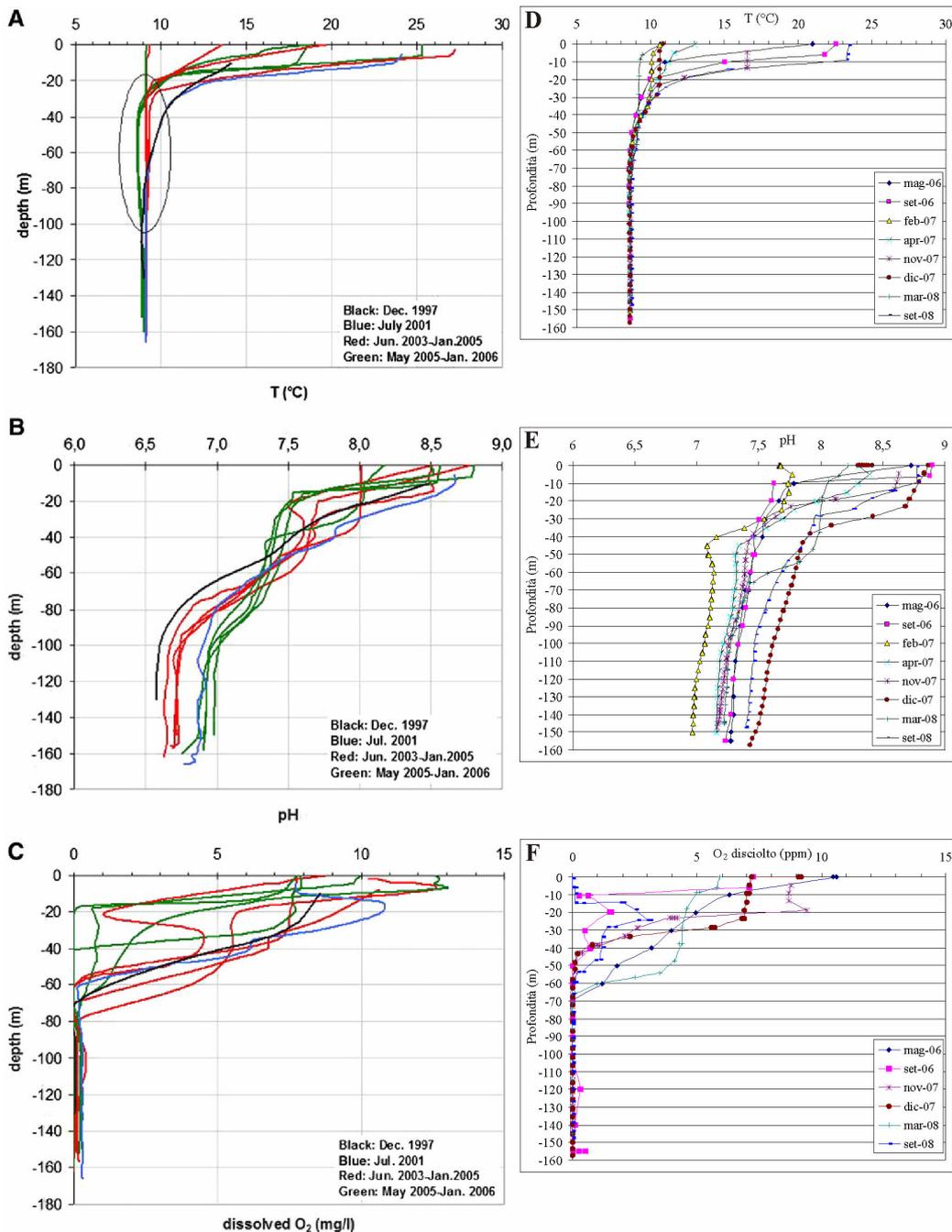


Fig. 4.47. A) Variazioni con la profondità della temperatura delle acque del lago Albano registrate da dicembre 1997 a gennaio 2006. Il circolo rosso evidenzia le campagne in cui si è registrato il mixing; B) Variazioni di pH con la profondità da dicembre 1997 a gennaio 2006; C) variazioni dell'O₂ disciolto con la profondità da dicembre 1997 a gennaio 2006 (da Carapezza et al., 2008a). D), E), F): Variazioni rispettivamente di T, pH, O₂ disciolto con la profondità registrate da maggio 2006 a settembre 2008.

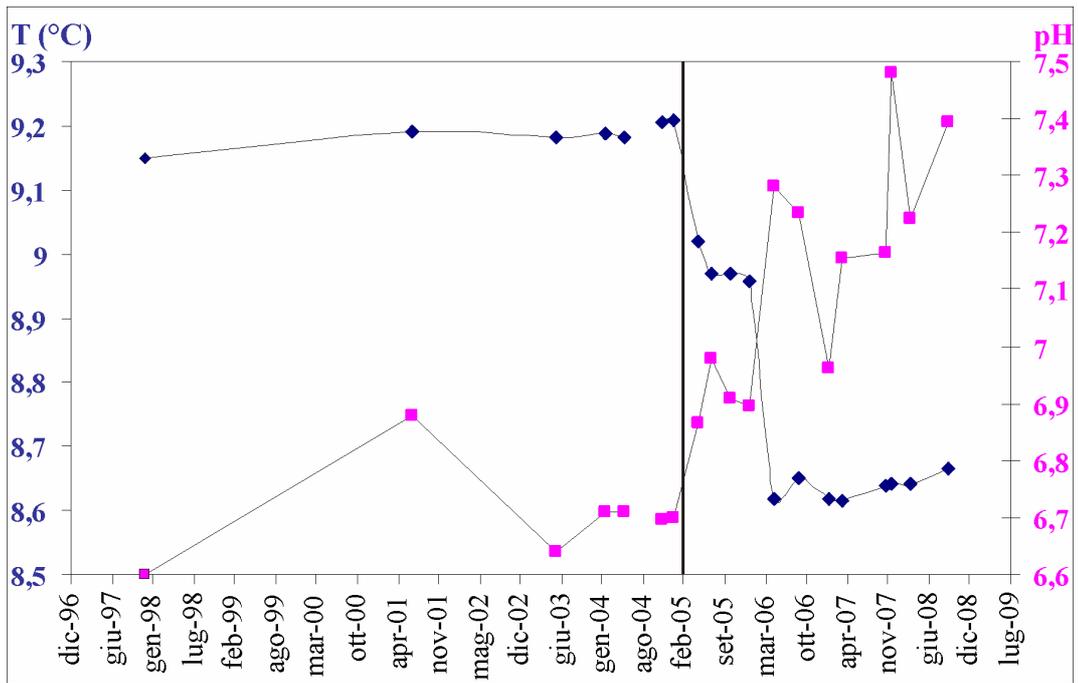


Fig. 4.48. Variazioni temporali di temperatura (rombi blu; asse dei valori di sinistra) e pH (quadrati fucsia; asse dei valori di destra) delle acque più profonde del lago Albano (-150 m, tranne per la campagna di dicembre 1997 per la quale è riportato il valore di -130 m) registrate da dicembre 1997 a settembre 2008.

4.4.3. I campionamenti di acque e gas disciolti

Contemporaneamente ai profili con sonda multiparametrica, sono stati prelevati campioni di acque a varie profondità per le analisi chimiche e isotopiche (componenti maggiori, minori ed in traccia) e per le analisi chimico-isotopiche dei gas disciolti ($\delta^{13}\text{C CO}_2$, $\delta^{13}\text{C CH}_4$, $\delta\text{D CH}_4$, $^3\text{He}/^4\text{He}$). Dal 2001 al 2003 le acque sono state campionate ad intervalli di 10 m; nelle campagne dal 2004 al gennaio 2006 sono state campionate solo in superficie e nel punto più profondo; da aprile 2006 i campioni sono prelevati a 0, -30, -70, -110 m e nel punto più profondo (circa -150 m).

Le variazioni dei componenti principali delle acque sono mostrate in Figg. 4.49A, B e C. Le concentrazioni di K, Na, Mg, Cl sono costanti ad ogni profondità e in ogni campagna nei limiti delle incertezze analitiche, $[\text{SO}_4]$ diminuisce con la profondità, probabilmente per riduzione del solfato in conseguenza di attività batterica nell'ipolimnio anossico; l'aumento di $[\text{Ca}]$ e $[\text{HCO}_3]$ con la profondità può essere spiegato con precipitazione di calcite in acque poco profonde e sua dissoluzione nell'ipolimnio (Cioni et al., 2003; Carapezza et al., 2008a).

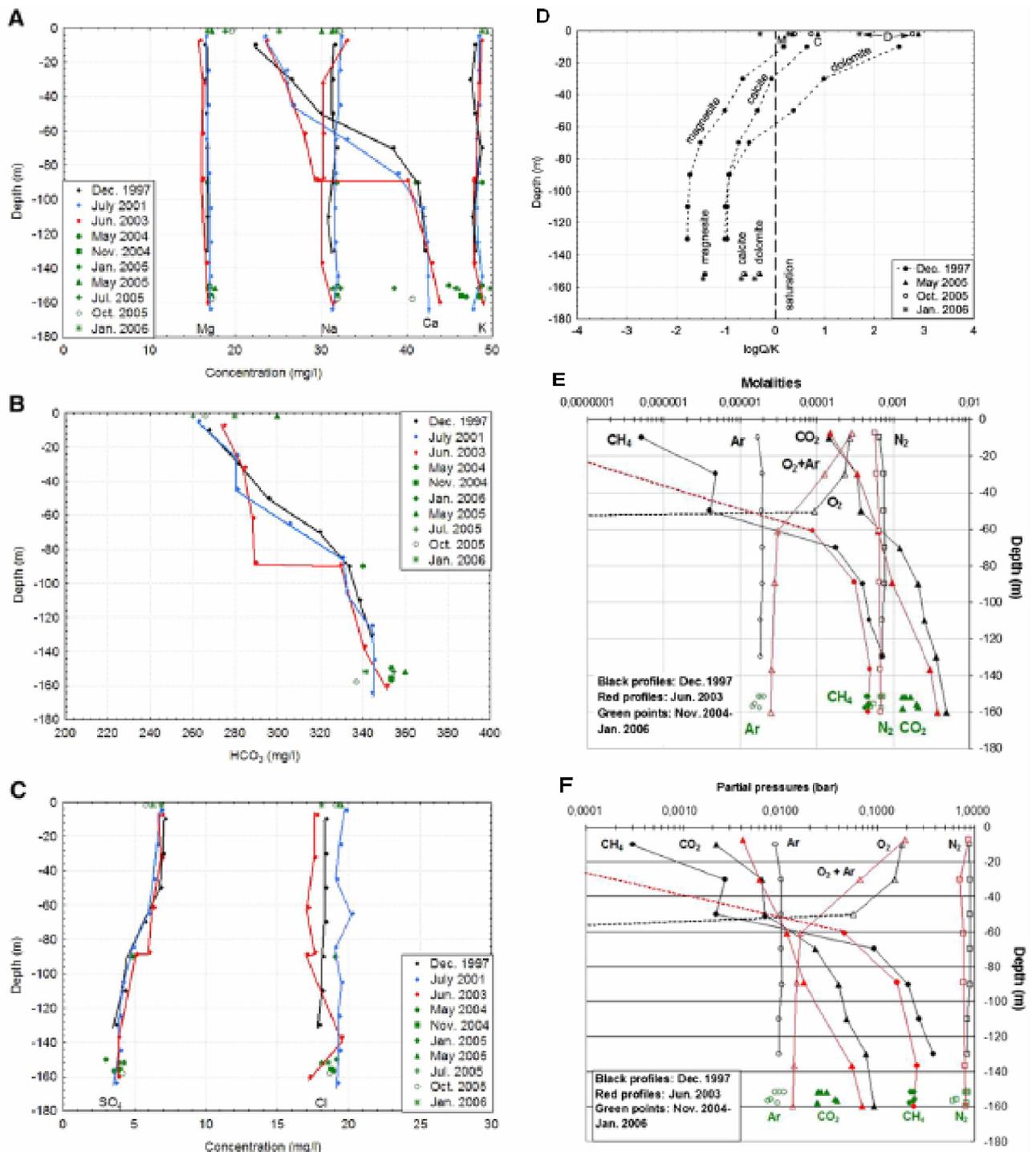


Fig. 4.49. Variazioni temporali dei principali componenti chimici dell'acqua e dei gas disciolti nel lago Albano da dicembre 1997 a gennaio 2006 (mod. da Carapezza et al., 2008a). A) Cationi; B) Bicarbonati; C) Anioni; D) Indice di saturazione dei minerali carbonati; E) Molalità dei gas disciolti; F) Pressioni parziali dei gas disciolti (i profili in rosso, relativi a giugno 2003, mostrano la somma di O_2+Ar , ma le misure dirette di Fig. 4.47 indicano che il contenuto di O_2 era nullo sotto i -70 m).

Nel giugno 2003 si è osservato un brusco aumento di $[Ca]$ e $[HCO_3]$ e una diminuzione di $[SO_4]$ tra -87 e -89 m. Il differente gradiente negativo di concentrazione con la profondità può suggerire un influsso di acque superficiali povere in calcio e bicarbonati nelle acque a -50/-90 m.

La Fig. 4.49D mostra che le acque del lago, fino a -50 m, sono sovrassature in calcite, dolomite e magnesite, e divengono sottosature in carbonato con la profondità. La Fig. 4.49D mostra anche che nel 2005-2006 le acque più profonde erano meno sottosature che nel 1997 (indicatori e linee a tratteggio).

In Fig. 4.49E sono riportate le concentrazioni dei gas disciolti alle varie profondità. N_2 è il componente principale a tutte le profondità con una pressione parziale di circa 0,8 bar. Anche la pressione parziale di Ar è costante per tutta la colonna d'acqua, ma è di due ordini di grandezza inferiore. O_2 è il secondo componente nelle acque superficiali quindi decresce rapidamente fino ad essere nullo da -60 m circa. Le pressioni parziali di CO_2 e CH_4 crescono con la profondità, e nelle acque più profonde la pressione parziale del metano (0,3 bar) è superiore a quella della CO_2 . Questo aumento del metano si spiega con la sovrapposizione di due processi: la decomposizione di materia organica e l'iniezione dal fondo di gas ricco in CH_4 (Cioni et al., 2003; Carapezza et al., 2008a), come mostra anche la composizione isotopica del C e dell'H del metano disciolto nelle acque profonde campionate nel novembre 2007 (Fig. 4.50).

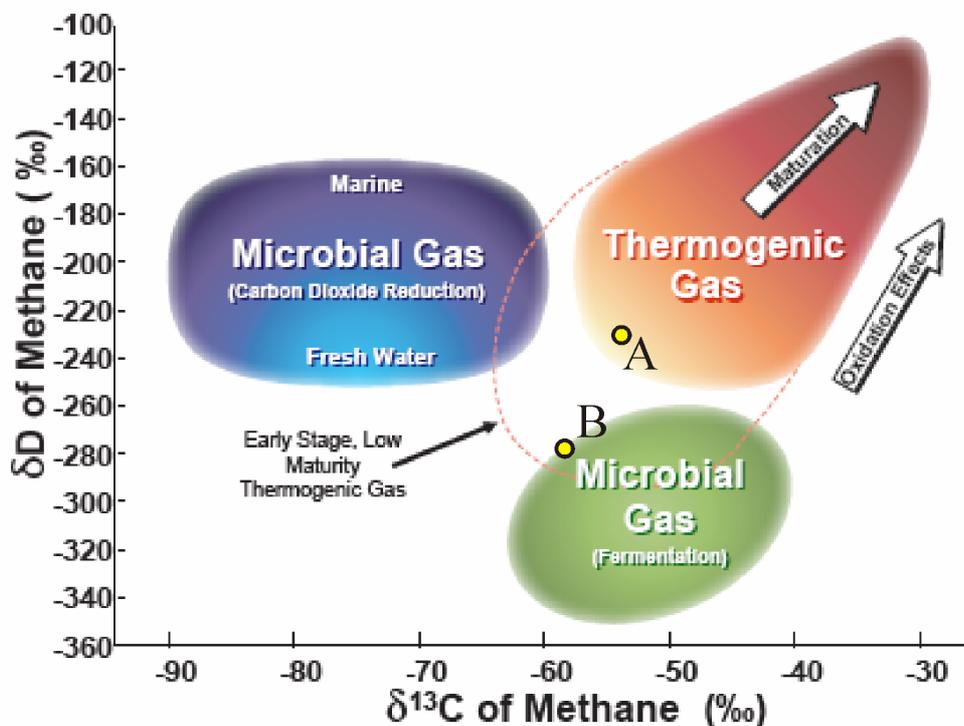


Fig. 4.50. Composizione isotopica del carbonio e dell'idrogeno del metano disciolto nelle acque (campioni A e B) a -150 m nel novembre 2007.

La presenza di una componente di gas endogeno profondo, di origine magmatica o mantellica, è anche indicata dal rapporto isotopico dell'elio disciolto che ha un rapporto $R/R_a = 1,30$ che ricade nell'intervallo di variazione dei gas emessi da vari siti dei Colli Albani ($R/R_a = 0,94/1,90$. Carapezza & Tarchini, 2007) e nell'intervallo di variazione delle inclusioni fluide in fenocristalli di depositi vulcanici degli Albani ($R/R_a = 1,17/1,70$. Martelli et al., 2004). Il $\delta^{13}C_{CO_2}$ varia tra 3,8 e 3,9 ‰ vs. PDB ed è più alto del rapporto isotopico che si misura nei gas emessi alla superficie dai Colli Albani (1,23/1,39; Carapezza & Tarchini, 2008).

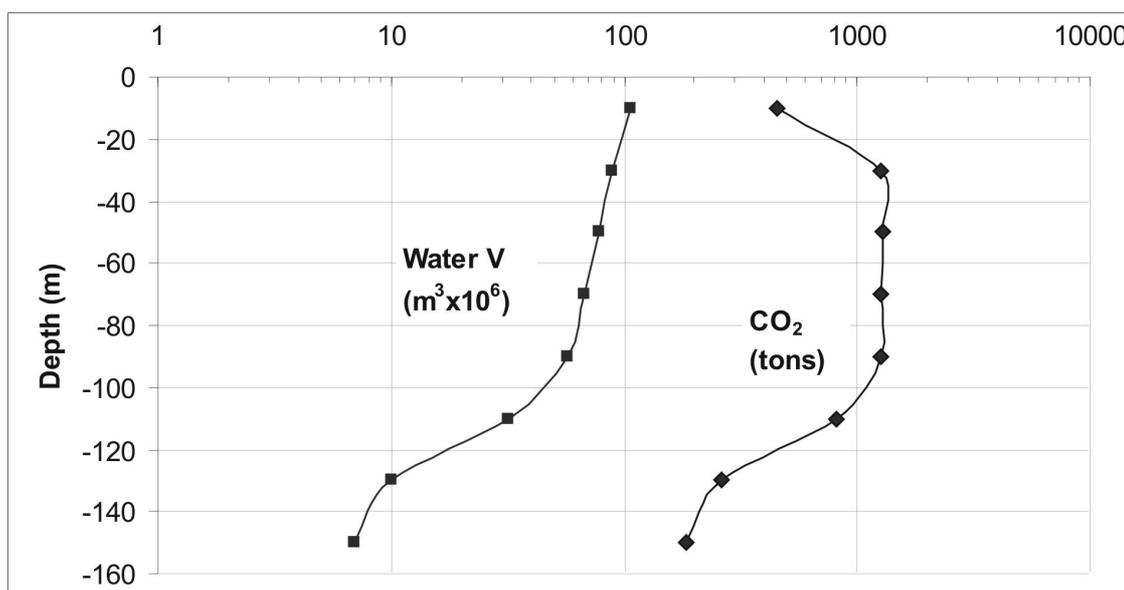


Fig. 4.51. Calcolo dei volumi di acqua lacuale presente ad intervalli di 20 m, e calcolo della relativa massa di CO₂ disciolta nelle acque del lago Albano (da Anzidei et al., 2008).

La massa totale di CO₂ disciolta nelle acque del lago è stata calcolata usando le concentrazioni di CO₂ misurate nei campioni prelevati a differenti profondità nella campagna di maggio 2006 e i volumi di lago ottenuti dalla batimetria di dettaglio di Anzidei et al. (2008) (Fig. 4.51). Sono state considerate otto porzioni del lago per intervalli di profondità di 20 m dalla superficie al fondo, e per ognuna è stato calcolato il volume d'acqua e la concentrazione di CO₂. La quantità di CO₂ ovviamente riflette il volume d'acqua considerato; comunque si nota in Fig. 4.51 che la massa di CO₂ disciolta rimane circa costante tra -40 e -100 m poiché la progressiva riduzione di volume (il lago è imbutiforme) da 88 a 57 × 10⁶ m³ è compensata dall'aumento nella concentrazione del gas con la profondità. Al di sotto dei -120 m è disciolto nell'acqua un totale di 465 ton di CO₂ in un volume di 17 × 10⁶ m³.

È importante osservare che nel 1997 il totale era significativamente più alto: 4190 ton di CO₂ (quasi un ordine di grandezza superiore) calcolate sulla base dei dati di Cioni et al. (2003). Questo è un ulteriore indizio che sono avvenuti fenomeni recenti di rovesciamento delle acque del lago con acque superficiali povere in CO₂ che hanno sostituito acque profonde le quali, una volta risalite a quote minori, hanno parzialmente essolto gas (Anzidei et al., 2008). Fenomeni di questo tipo possono verificarsi al lago Albano quando, in caso di inverni freddi con abbondanti piogge, la temperatura delle acque superficiali si abbassa sotto gli 8,5/9 °C. In particolare ci sono evidenze sia chimiche che biologiche di un rovesciamento avvenuto nell'inverno 2003-2004 (Fig. 4.49; Carapezza et al., 2008a) e nei primi mesi del 2005 (Figg. 4.47 e 4.48).

4.6.4. Misure con sonda multiparametrica e analisi chimico-isotopiche delle acque del lago di Nemi

Il lago occupa la porzione meridionale di un cratere complesso dalla struttura allungata circa N-S (Fig. 4.46A) prodotto da due violente eruzioni freatomagmatiche avvenute nella terza fase dell'attività vulcanica dei Colli Albani (De Rita & Narcisi, 1983). La superficie del lago è di circa 1,6 km², il perimetro è di circa 4,5 km, la profondità media è di 16 m e la massima è di 32 m. Anche a Nemi è presente un tunnel di drenaggio lungo 1650 m il cui imbocco è a 320 m s.l.m., scavato in epoca pre-Romana e attivo fino al 1928 (dal 1928 al 1932 il livello del lago fu abbattuto di circa 10 m per consentire il recupero di due navi Romane). Da allora il tunnel funziona sporadicamente e solo in occasione di piogge intense, a causa dell'abbassamento del livello del lago dovuto al sovrasfruttamento delle acque del lago e dell'acquifero circostante.

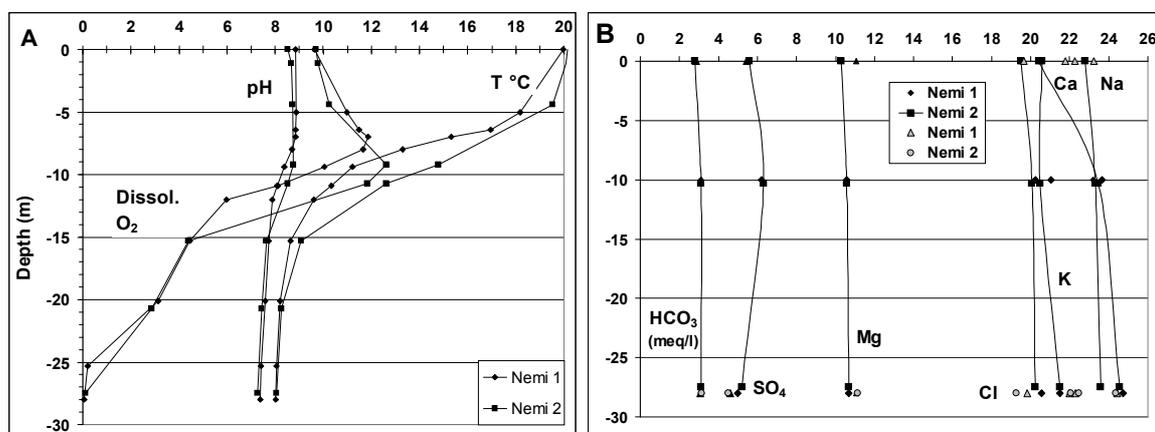


Fig. 4.52. A) Variazioni con la profondità di T, pH e O₂ disciolto misurate nel Lago di Nemi nel maggio 2004. B) Variazioni con la profondità delle concentrazioni di anioni e cationi (da Carapezza et al., 2008a).

Nel maggio 2004 sono stati eseguiti nel lago di Nemi due profili verticali fino a -28 m (-30 m era la profondità massima al momento della campagna), con le stesse metodologie di campionamento e di misura con sonda multiparametrica usate al lago Albano (Fig. 4.46A per la localizzazione). Le variazioni di temperatura, pH e ossigeno disciolto sono mostrate in Fig. 4.52A: O₂ mostra un piccolo incremento tra -4 e -10 m, poi decresce per annullarsi da -25 m; la temperatura decresce dalla superficie (19,9 °C) fino a -20 m (8 °C) per mantenersi costante fino al fondo; il pH varia da 8,83 alla superficie a 7,37 al fondo, con un comportamento simile a quello del lago Albano (Carapezza et al., 2008a). Questi dati sono simili a quelli pubblicati da Martini et al. (1994). Come per il lago Albano, si osserva un leggero incremento di [HCO₃] e [Ca] e un decremento di [SO₄] con la profondità. Differente è il contenuto di K, più basso di Na e Ca, rispetto ad Albano (Fig. 4.52B) (Carapezza et al., 2008a). Non si evidenzia alcuna emissione di fluidi endogeni dal fondo del lago di Nemi.

5. PERICOLOSITÀ ASSOCIATA AD EMISSIONI ACCIDENTALI DI GAS DA POZZI

Nel corso degli ultimi venti anni sono avvenuti numerosi incidenti connessi all'emissione accidentale di gas da pozzi nell'area dei Colli Albani. La maggior parte di questi pozzi erano stati ubicati sull'alto strutturale carbonatico di Ciampino, che come abbiamo visto rappresenta la principale struttura permeabile che agisce come serbatoio per il gas che risale dal profondo e dalla quale il gas risale verso la superficie lungo faglie e fratture.

Un incidente di questo tipo è avvenuto nel 2005 anche a Fiumicino, in una zona molto periferica rispetto ai Colli Albani. Quattro di questi incidenti, avvenuti tra il 2003 e il 2008, sono stati indagati in dettaglio per contribuire alla loro messa in sicurezza e i risultati di questi studi sono riportati di seguito. Nella Fig. 5.1 è riportata l'ubicazione dei pozzi dei Colli Albani che hanno prodotto questi incidenti.

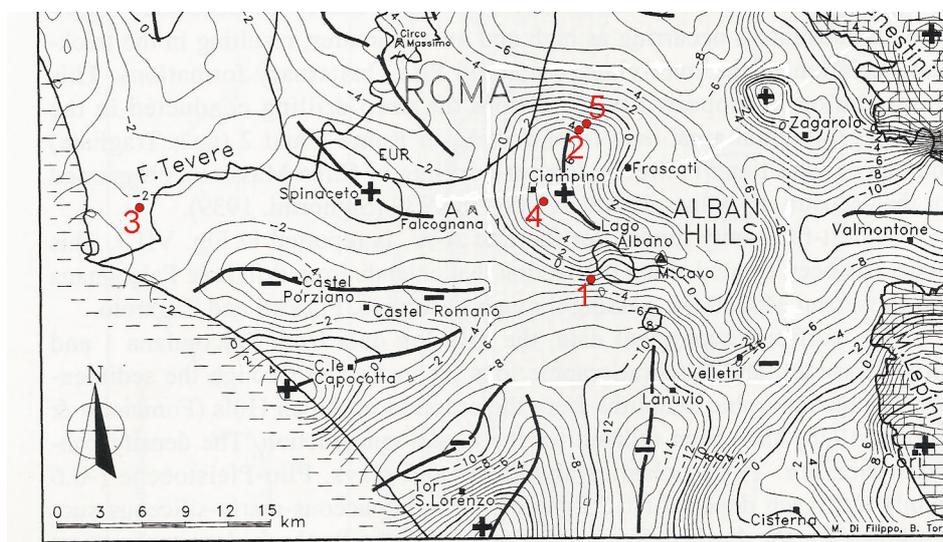


Fig. 5.1. Localizzazione degli incidenti con emissione di gas da pozzi. 1) Pozzo ENEL n. 203; 2) Pozzo di Via Valle Cupella; 3) Pozzo di Fiumicino; 4) Sondaggi di Via Maciocco; 5) Pozzo di Via Vervio.

5.1 L'incidente del 1986

Questo incidente è avvenuto il 30 gennaio 1986 da un pozzo profondo 230 m perforato dall'ENEL per misurare il gradiente geotermico. Il pozzo n. 203 (1 in Fig. 5.1) era stato ubicato a circa 700 m a SW del Lago Albano sullo stesso alto strutturale che ospita il lago craterico e, più a NW la manifestazione gassosa di Cava dei Selci. Il pozzo ha attraversato 180 m di depositi vulcanici (piroclastici e lave) ed è entrato nei sedimenti Pleistocenici (argille, conglomerati e sabbie) rimanendovi fino al fondo. Durante la perforazione, eseguita con l'impiego di fango bentonitico, si ebbero perdite di circolazione sia nella sequenza vulcanica sia nelle sottostanti rocce sedimentarie, con totale perdita di circolazione a 49 e 149 m di profondità. Questo conferma l'alternanza di livelli ad alta e

bassa permeabilità tipica dell'idrogeologia poco profonda dei Colli Albani. Un'altra perdita totale di circolazione avvenne da 200 m a fondo pozzo, dove furono probabilmente incontrate sabbie Pleistoceniche, come suggerito dalla natura del materiale portato in superficie dal fluido emesso dal pozzo.

L'emissione violenta dal pozzo (che era privo di *blowout preventer*, BOP) di una miscela di acqua e gas cominciò quando erano stati estratti 60 m di aste di perforazione. Il gas era costituito per lo più da CO₂, con minore H₂S (ENEL,1990). Circa 4 ettari di terreni coltivati furono danneggiati e 70 persone furono evacuate per oltre otto giorni dalle case vicine, fino a quando il pozzo fu sigillato con iniezioni di cemento.

Questo incidente dimostra la presenza, almeno in questa zona, di un acquifero pressurizzato a circa 200 m di profondità nelle sabbie pleistoceniche. Non è possibile stabilire se anche qualcuno dei livelli permeabili più superficiali, dove erano avvenute perdite totali di circolazione (-49 e -149 m), contiene un acquifero pressurizzato, poiché la densità elevata del fango di perforazione avrebbe comunque impedito la fuga di fluidi.

5.2. L'incidente del 2003 di Via di Valle Cupella (Roma)

Un'emissione incontrollata di gas è avvenuta il 27 settembre 2003 da un pozzo approfondito da 30 a 55 m per ricerca d'acqua e malamente rivestito con un tubo PVC cementato. Il pozzo (2 in Fig. 5.1) era ubicato pochi km a NE della manifestazione di Cava dei Selci, sullo stesso alto strutturale carbonatico, in una zona (Via di Valle Cupella) appartenente al X Municipio del Comune di Roma. In questa zona affiorano rocce vulcaniche appartenenti ad una colata piroclastica messa in posto 36 ka fa. La sequenza vulcanica ha qui uno spessore di circa 130 m e comprende un'alternanza di livelli piroclastici, lave, conglomerati, pozzolane e paleosuoli (Ventriglia, 1990; De Rita et al., 1992).

Evidentemente il pozzo ha attraversato un livello a bassa permeabilità che manteneva confinato un acquifero pressurizzato, causando una violenta fuoriuscita di un getto di gas e acqua per diversi metri sopra il pozzo, che non era dotato di BOP né aveva una valvola a testa-pozzo. Il gas, costituito prevalentemente da CO₂ con minore H₂S (Tab. 3.1), chimicamente identico a quello emesso in altri siti dei Colli Albani, come Cava dei Selci e Solforata di Pomezia, si è disperso per centinaia di metri nell'aria intorno al pozzo, causando la morte di molti piccoli animali (soprattutto uccelli, un gatto, una volpe; Fig. 5.2) e creando un pericolo ambientale nella vicina zona abitata, dove vi è anche un'importante linea ferroviaria (Fig. 3).



Fig. 5.2. Un gatto e una volpe deceduti a seguito delle emissioni gassose dal pozzo di Via di Valle Cupella nel 2003.

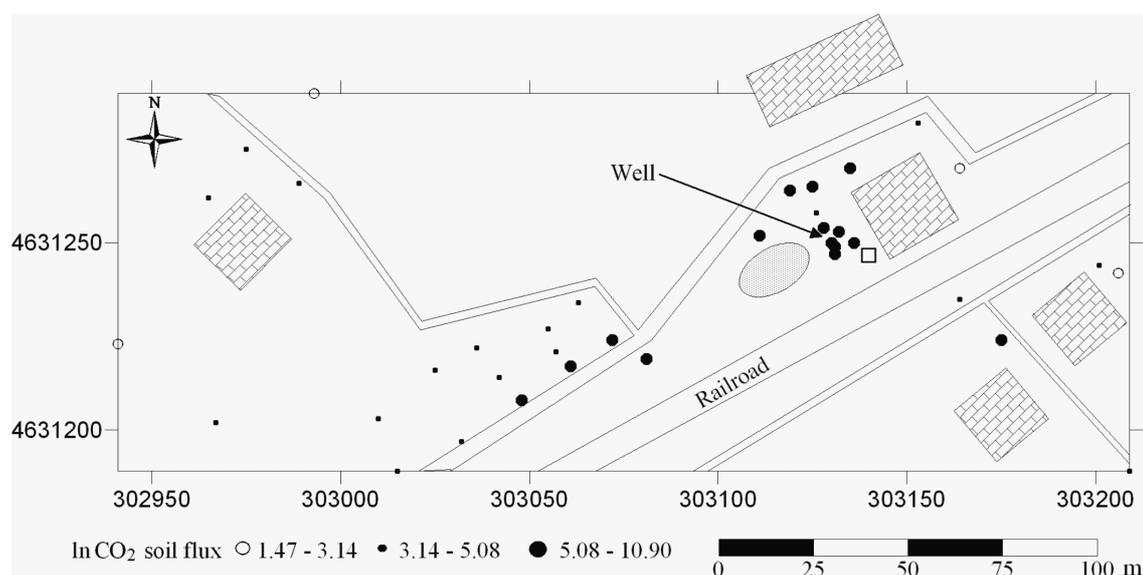


Fig. 5.3. Planimetria schematizzata dell'area soggetta al pericolo da emissione gassosa (da Carapezza & Tarchini, 2007). La punta della freccia indica il pozzo; Ellisse: area di rinvenimento degli animali deceduti; Quadrato aperto: sito della stazione automatica; Cerchi a grandezza variabile: misure di flusso anomalo di CO₂ dal suolo della prospezione del 4 ottobre 2003, Cerchi aperti: misure di flusso a normali valori di background naturale.

Il pozzo è stato sigillato con un'iniezione di cemento il 18 ottobre 2003 è l'intervento è stato coordinato dalla Protezione Civile di Roma con la collaborazione scientifica dell'Università Roma Tre e dell'INGV di Roma. Si riassumono di seguito i principali risultati del monitoraggio geochimico eseguito prima, durante e dopo l'intervento di messa in sicurezza del pozzo e che sono già stati oggetto di pubblicazione (Carapezza & Tarchini, 2007).

5.2.1. Monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo vicino al pozzo

le prime misure sull'emissione gassosa sono state eseguite il 4 ottobre, 7 giorni dopo l'incidente. Il pozzo, ubicato in un giardino privato a pochi m dalla casa (Fig. 5.3), era stato recintato e per ridurre l'emissione gassosa era stato parzialmente tappato con una rudimentale pila di mattonelle e tela gommata piazzate sopra il tubo PVC che sporgeva dal terreno (Fig. 5.4).



Fig. 5.4. Copertura rudimentale del pozzo di Via di Valle Cupella.

Un po' di gas veniva comunque emesso e si avvertiva un forte odore di H₂S per centinaia di m intorno al pozzo. In pochi giorni, le foglie degli alberi vicini erano ingiallite e la vegetazione del giardino era morta. Una concentrazione di CO₂ in aria di 0,5 vol.% fu misurata a un metro dal suolo vicino al pozzo (si ricorda che la concentrazione normale in aria è 0,033 vol.%). Valori più alti di [CO₂] in aria, fino a 0,8 vol.% furono trovati fuori dalla recinzione in una zona morfologicamente depressa dove il gas si accumulava in assenza di vento. È in questa zona che gli animali furono uccisi dall'emissione gassosa quando evidentemente la concentrazione di CO₂ e/o di H₂S vi aveva raggiunto valori letali (rispettivamente >8 vol.% e >250 ppm).

Una prima prospezione del flusso di CO₂ dal suolo con camera d'accumulo è stata eseguita il 4 ottobre su un'area di 40.000 m² intorno al pozzo (Fig. 5.3). Purtroppo l'urbanizzazione del sito non ha consentito una distribuzione su maglia regolare dei punti di misura e questo

ha impedito di ottenere una mappa del flusso affidabile dalla quale poter stimare il rilascio totale di CO₂.

Tab. 5.1. Parametri geochimico e ambientali misurati durante l'intervento al pozzo di Valle Cupella

		Prima della chiusura		Dopo la chiusura	
(A)		Camera d'accumulo			
		Flusso CO ₂ (g/m ² giorno)			
Prospezione del 4 ott. 03	Min-max	4 - 54,200	(18 - 54,200)*		
	Media	3325	(4483)*		
	no. mis	37	(25)*		
Prospez. del 25 ott 03	Min-max		1.4 - 143		
	Media		26.5		
	no. mis		25		
Prospez. del 4 nov 03	Min-max		1.5 - 62		
	Media		18.5		
	no. mis		16		
(B)		Stazione automatica			
Periodo di registrazione		13- 18 ottobre 03		19 ott-3 novembre 03	
Flusso CO ₂ (g/m ² giorno)	Min-max	3800 - 21,200	(0 - 42,000) [#]		83 - 360
	Media	9484	(14,490) [#]		155
CO ₂ in aria (ppm)	Min-max	300 - 45,000	(300 - 72,000) [#]		Normale dell'aria
H ₂ S in aria (ppm)	Min-max	0 - 5.6	(0 - 61.3) [#]		Normale dell'aria
(C)		Parametri ambientali			
		Min-Max (media)		Min-Max (media)	
Umidità aria (%)		16 - 98 (77)	Velocità vento (m/s)		0 - 4.7 (0.6)
Temperatura aria (°C)		2.9 - 25.3 (14)	Contenuto in acqua del suolo (%)		37.4 - 100 (58.7)
Pressione aria (hPa)		981 - 1004 (996)	Temperature suolo(°C)		0.7 - 19.9 (13.9)

* dati ricalcolati sui 25 punti ripetuti anche il 25 ottobre. [#]Dati misurati durante la chiusura mineraria del pozzo

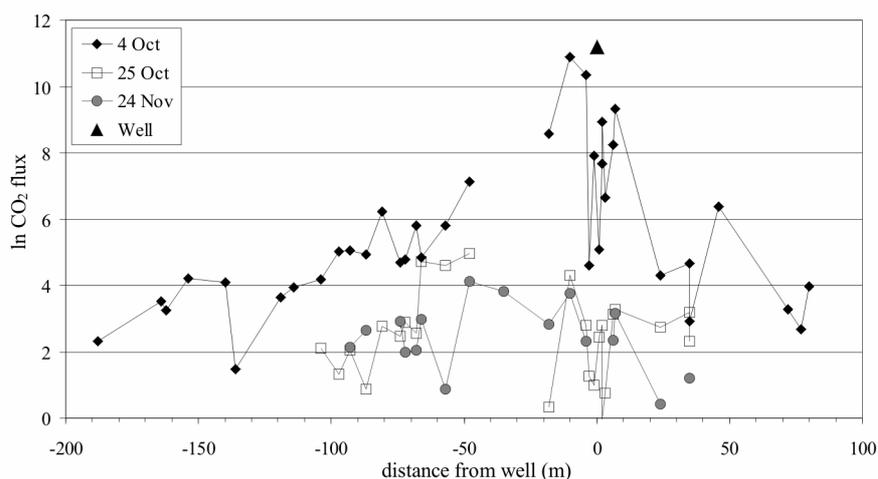


Fig. 5.5. Proiezione lungo un'asse circa NW-SE passante per il pozzo (triangolo nero) delle misure di flusso, espresse in logaritmo naturale, eseguite nelle tre prospezioni a Valle Cupella: rombi neri: prospezione del 4 ottobre; quadrati vuoti: prosp. Del 25 ottobre; cerchi grigi: prosp. Del 24 novembre 2003.

I valori di flusso misurati hanno mostrato un'ampia variazione, da 4 a 54.200 g/m²giorno (Tab 5.1 e Fig. 5.5) con una media di 3325 g/m²giorno. Tutti i valori di flusso superiori a 2500 g/m²giorno (ln= 7,8) erano ubicati a poche decine di m dal pozzo e la distribuzione spaziale dei valori mostra due direzioni preferenziali, NW e SW, di diffusione del gas nel suolo a partire dal pozzo (Fig. 5.3), che corrispondono verosimilmente a zone di più alta permeabilità vicino alla superficie (microfratture).

La seconda prospezione del flusso di CO₂ è stata eseguita il 25 ottobre, 2 giorni dopo la chiusura del pozzo con iniezioni di cemento, su una maglia più piccola di 25 misure sui punti dove, nella prima prospezione, erano stati trovati i più alti valori di flusso. L'emissione di gas dal suolo era fortemente diminuita (Tab. 5.1 e Fig. 5.5): il valore medio del flusso di CO₂ (calcolato solo sui 25 punti misurati in entrambe le prospezioni) era sceso da 4483 a 26,5 g/m²giorno e solo una debole anomalia persisteva vicino al pozzo, con 4 misure di flusso tra 70 e 143 g/m²giorno.

L'ultima prospezione è stata fatta un mese dopo, il 24 novembre, su 16 di questi punti; il flusso medio di CO₂ era sceso a 18,5 g/m²giorno (Tab. 5.1 e Fig. 5.5) indicando il sostanziale ritorno alle condizioni normali, quindi la cementazione del pozzo aveva dato un risultato positivo ripristinando l'isolamento dell'acquifero pressurizzato. L'efficacia dell'operazione di cementazione del pozzo nel ridurre il flusso di CO₂ dal suolo è evidente nella Fig. 5.6 dove sono riportati i diagrammi di probabilità cumulata dei valori in *ln* del flusso per le tre prospezioni.

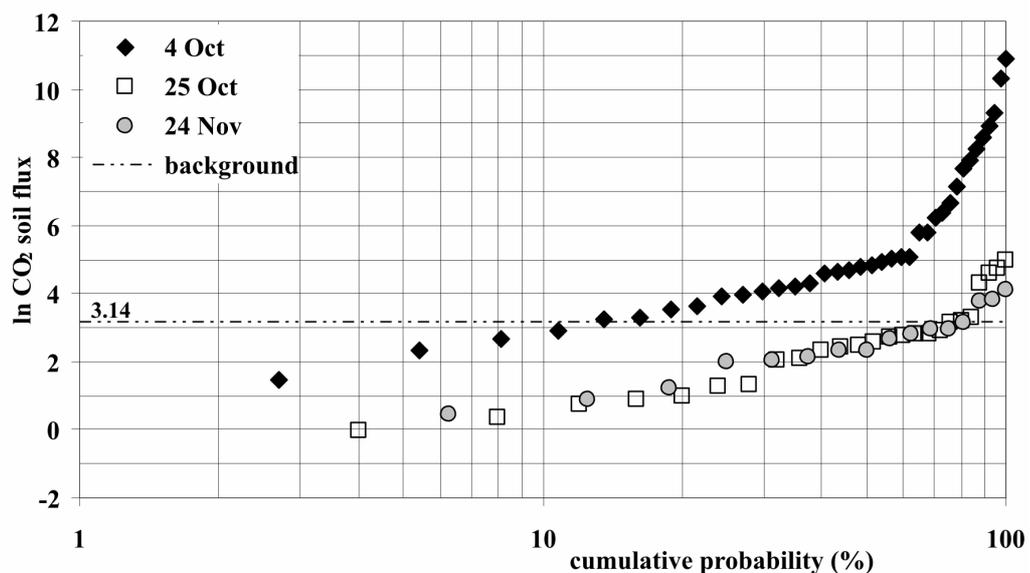


Fig. 5.6. Diagrammi di probabilità cumulata delle misure di flusso di CO₂ espresse in logaritmo naturale delle prospezioni a Valle Cupella: rombi neri: 4 ottobre; quadrati aperti: 25 ottobre; cerchi grigi: 24 novembre 2003; linea a tratteggio: soglia di background naturale del suolo dell'area.

Il valore di fondo –background- del degassamento naturale, biologico, della zona può essere apprezzato dai risultati dell'ultima prospezione, realizzata un mese dopo la cementazione del pozzo. Questo ha una soglia massima di 3,14 in logaritmo naturale, corrispondente a 23,2 g/m²giorno. Si tratta di un valore ragionevole che si inquadra bene nelle soglie di background stimate in altre prospezioni del flusso diffuso di CO₂ dal suolo in aree vulcaniche e geotermiche italiane (Chiodini et al., 1998, 1999). Nella prima prospezione, prima della cementazione del pozzo, solo il 16% delle misure di flusso erano ricomprese nel background; sono salite a 80% e 81% nella seconda e terza prospezione e i valori massimi di flusso sono scesi da 54.200 a 143 e 62 g/m²giorno rispettivamente. Le curve di Fig. 5.5 suggeriscono che prima della chiusura del pozzo, anche i punti più lontani dal pozzo mostravano valori di flusso più alti e quindi erano anch'essi interessati dalla diffusione di gas nel suolo, pur rimanendo nei limiti del background.

Che all'origine dei valori anomali del flusso vi sia stata la fuga di gas dal pozzo, è dimostrato anche dai dati registrati da una stazione automatica di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo. Questa stazione ha operato dal 13 ottobre a 3 novembre 2003; è stata installata nel giardino, vicino al pozzo nel punto dove era stato misurato il valore più alto di flusso (21.000 g/m²giorno; Fig. 5.3), per indagare le variazioni temporali del flusso di gas e per apprezzare gli effetti prodotti dall'operazione di cementazione. Un'altra breve registrazione di tre giorni è stata fatta il 24 novembre durante l'ultima prospezione per controllare che la cementazione del pozzo avesse effettivamente eliminato ogni emissione anomala di gas alla superficie. La stazione misurava, ogni 30 minuti, il flusso di CO₂ dal suolo, la concentrazione in aria di CO₂ e H₂S (rispettivamente all'altezza di 0,5 e 1,5 m dal suolo), la temperatura, l'umidità e la pressione dell'aria, l'umidità e la temperatura del suolo, la direzione e la velocità del vento. A parte piccoli intervalli (di qualche ora) nei quali la stazione non ha funzionato per problemi di alimentazione, è stato registrato un set continuo di dati che hanno coperto tutte le operazioni di cementazione del pozzo. Sono state acquisite in totale 988 misure con solo lo 0,01% di dati perduti. Nel secondo periodo si sono registrate 151 misure in tre giorni (Tab. 5.1).

La Fig. 5.7 mostra le variazioni del flusso di CO₂ registrate dal 13 ottobre al 3 novembre. Nel primo periodo di registrazione, precedente la chiusura del pozzo, i flussi erano alti e hanno fluttuato da 3800 a 21.200 g/m²giorno, con un valore medio di 9240 g/m²giorno. Queste fluttuazioni possono essere correlate alle forti variazioni dei parametri ambientali che influenzano il flusso di gas nel suolo, come la P atmosferica e l'umidità del suolo

(Rogie et al., 2001; Carapezza & Granieri, 2003) causate da alcuni temporali avvenuti in quei giorni (si veda la Tab. 5.1 per le variazioni registrate dei parametri ambientali).

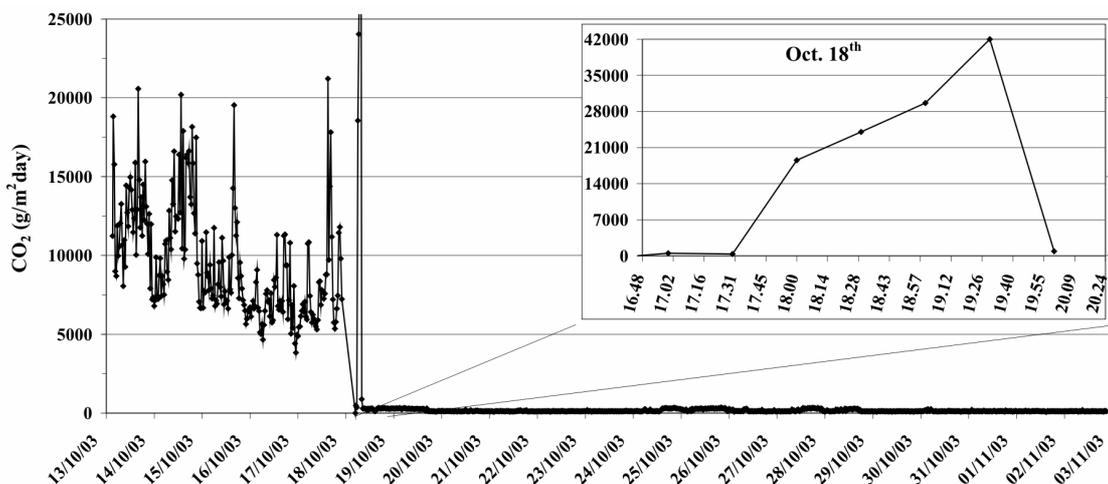


Fig. 5.7. Flusso di CO₂ dal suolo registrato dalla stazione automatica a Valle Cupella dal 13 ottobre al 3 novembre 2003. Nell'inserto le variazioni di flusso registrate il 18 ottobre durante le prime fasi di chiusura mineraria.

Anche i valori di [CO₂] e [H₂S] in aria sopra la stazione hanno mostrato forti fluttuazioni (Fig. 5.8), con la maggior parte dei valori superiori alle normali concentrazioni in aria e con picchi fino a 4,5 vol.% di CO₂ e 6 ppm per H₂S.

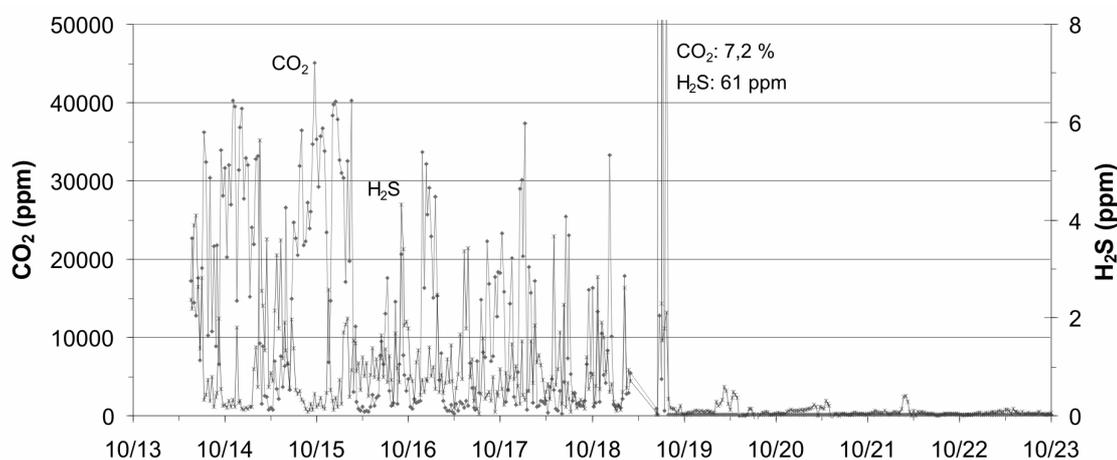


Fig. 5.8. Variazioni di [CO₂] e [H₂S] in aria registrate dalla stazione automatica vicino al pozzo di Valle Cupella.

Particolarmente interessanti sono le variazioni del flusso registrate dalla stazione nel pomeriggio del 18 ottobre, durante le operazioni iniziali di cementazione (vd. inserto di Fig. 5.7). La stazione non aveva operato per 5 ore, dalle 10:30, per una perdita di alimentazione, ma era perfettamente funzionante quando le operazioni sul pozzo

cominciarono alle 16:00. Non appena la pila di mattonelle sopra il pozzo fu rimossa consentendo il libero sfogo di tutto il gas in atmosfera, il flusso dal suolo si abbattè a zero mentre [CO₂] e [H₂S] in aria salirono rispettivamente fino a 7,2 vol.% e 61 ppm. Il flusso di CO₂ risalì poi rapidamente ad oltre 40.000 g/m²giorno, il valore massimo registrato dalla stazione, quando un'unità di testa-pozzo fu installata sul pozzo e la sua valvola chiusa, cosicché tutto il gas pressurizzato poteva diffondere lateralmente nel terreno permeabile in contatto con il tubo PVC non cementato. Successivamente, durante un tentativo di estrarre il tubo PVC, la parete de pozzo colassò a -10 m ostruendo il foro. A partire da questo momento, il flusso di CO₂ diminuì di nuovo e rimase basso nei giorni successivi (80-360 g/m²giorno) finché il pozzo fu definitivamente cementato mediante iniezione di cemento a 55 m di profondità (23 ottobre). Il flusso di CO₂ misurato dalla stazione è poi sceso ai valori di background naturale della zona (Tab. 5.1), una volta eliminato il gas diffuso dal pozzo.

I dati registrati dalla stazione automatica dimostrano che i flussi anomali di CO₂ dal suolo erano stati causati dall'infiltrazione laterale del gas dal pozzo quando questo era parzialmente ostruito dalla pila di mattonelle e tela gommata. In pochi giorni la CO₂ ha penetrato il suolo fino a circa 200 m di distanza (Fig. 5.3), in un livello permeabile che doveva essere molto superficiale, a meno di 10 m di profondità, considerato che i valori anomali di flusso sono pressoché scomparsi quando il pozzo è collassato a quella profondità. Il valore di flusso più alto (42.000 g/m²giorno) è stato registrato quando il pozzo era totalmente chiuso con le valvole alla sua testa. Questo valore era circa il doppio del massimo misurato quando il pozzo era solo parzialmente ostruito dalle mattonelle e quando fu eseguita la prima prospezione. È anche ovvio che l'acquifero pressurizzato alla profondità di circa 50 m, era perfettamente confinato al di sotto di uno strato impermeabile e che la presenza di un tale livello ricco in gas, anche se così poco profondo, non poteva essere accertato e nemmeno ipotizzato da misure di flusso di gas dalla superficie ed è stata rivelata dal blowout accidentale.

Si deve infine sottolineare la validità della tecnica di misura del flusso di CO₂ dal suolo, per accertare l'efficacia delle operazioni di chiusura mineraria di pozzi con emissione accidentale di gas.

5.3. L'incidente di Fiumicino del 2005

un'altra emissione accidentale di gas da un piccolo pozzo, che ha rischiato di causare vittime umane, è avvenuta nel 2005 nel Comune di Fiumicino in una zona dove non erano

note emissioni di gas a CO₂ dominante alla superficie (3 in Fig. 5.1). Fiumicino è ubicato alla foce del Tevere, a SW di Roma. La pianura del delta del Tevere è formata da una successione di terreni di età tardo Pleistocenica-Olocenica che si estende lungo la costa del Tirreno per 30 km e per 13 km verso l'interno (Belloti et al., 1995). Nella zona di Fiumicino, dove è stato perforato il pozzetto, la successione del delta esterno che copre una superficie di inconformità datata a 0,8 Ma che taglia sedimenti marini Pleistocenici, è costituita da 15-16 m di sabbie fini e silt dell'attuale fronte del delta, che poggiano su argille marine spesse più di 2,5 m, con intercalazioni di altre sabbie fini e silt sabbiosi. Si riassumono di seguito i principali risultati del monitoraggio geochimico eseguito prima, durante e dopo l'intervento di messa in sicurezza del pozzo e che sono già stati oggetto di pubblicazione (Barberi et al., 2007).

5.3.1. L'emissione accidentale di gas e l'intervento di messa in sicurezza

Il pozzetto era stato ubicato presso una cabina elettrica dell'ACEA (Fig. 5.9), e aveva lo scopo di realizzare la messa a terra elettrica della cabina, installando un elettrodo all'interno di un livello argilloso che si pensava di trovare sotto le sabbie affioranti in superficie. La perforazione iniziò alle 9:00 del 9 febbraio 2005; alle 14:00, a 27 m di profondità, fu osservata una brusca diminuzione della resistività elettrica, da 25 a 0,5 Ohm, e i perforatori ritennero di aver raggiunto l'argilla. La perforazione fu continuata per un altro metro e quindi un tubo d'acciaio da 2" fu installato nel pozzo. Alle 14:00 avvenne l'emissione violenta di un getto misto di acqua, gas e argilla che raggiunse le case vicine (1, 2, 3 in Fig. 5.9). Il tubo fu spinto nel pozzo per altri 2 m e vi furono rovesciate all'interno acqua e argilla. Lo spazio tra tubo e foro fu riempito con sabbia e l'emissione di gas apparentemente cessò. I perforatori pensarono di aver chiuso il pozzetto ed eliminato il problema dell'emissione di gas. La mattina del giorno dopo, 10 febbraio, la situazione sembrava la stessa e la macchina perforatrice fu rimossa. Nella notte tra il 10 e l'11 febbraio gli abitanti (7 persone) delle case vicine richiesero assistenza medica e furono ricoverati in ospedale per forti emicranie, senso di malessere, difficoltà di respirazione e accelerazione del battito cardiaco; due di loro avevano perso i sensi. Questi sintomi sono tipici di un'esposizione a concentrazioni di CO₂ in aria dal 10 al 15 vol.%. La mattina successiva intervennero i Vigili del Fuoco (VVF); tutte le case vicine al pozzetto furono evacuate perché al loro interno i VVF avevano misurato concentrazioni di CO₂ in aria superiori alla soglia "ufficiale" di sicurezza di 0,5 vol.% (bisogna sottolineare che questa era purtroppo anche la soglia massima di rilevabilità degli strumenti a disposizione dei

VVF). A richiesta dei VVF due nuovi pozzetti (F2 e F3 in Fig. 5.9) furono perforati a una profondità di 27-28 m, vicino al primo pozzetto, sperando così di poter esaurire rapidamente il gas accumulatosi nel sottosuolo.

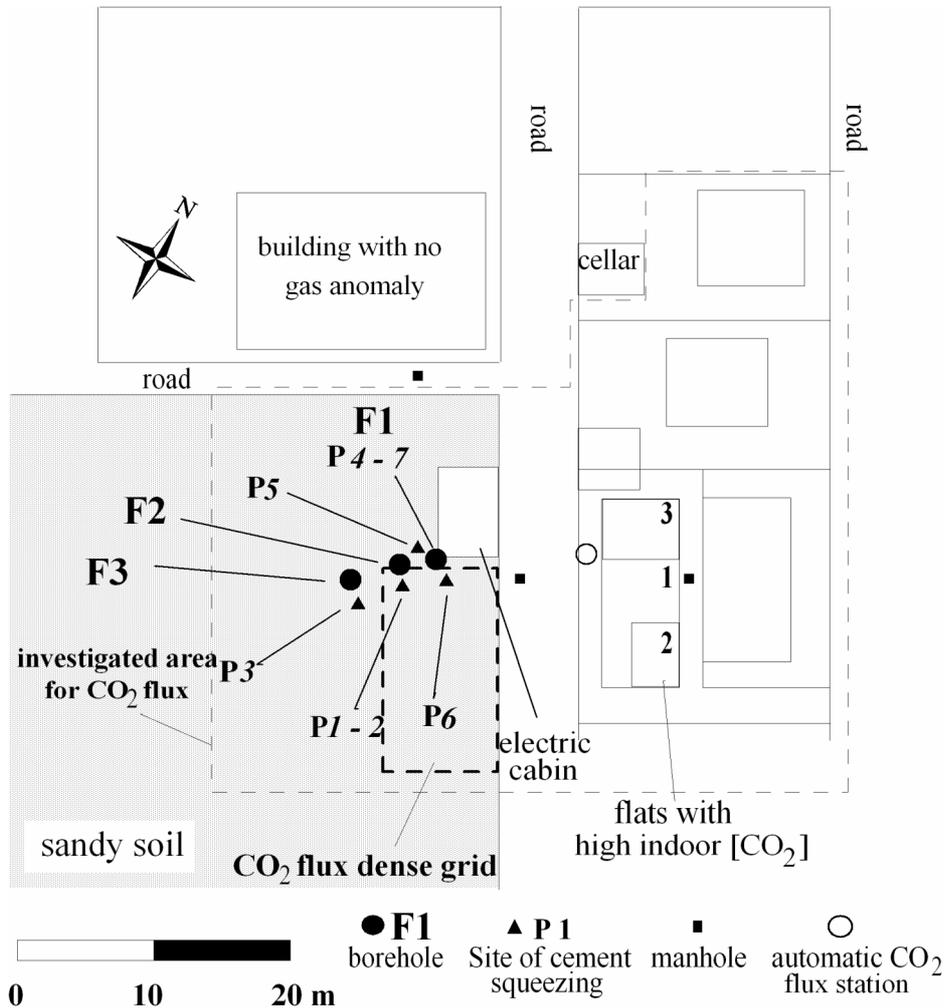


Fig. 5.9. Mappa schematica della zona affetta dall'emissione accidentale di gas di febbraio 2005 a Fiumicino. Sono indicati i siti delle perforazioni dalle quali fuoriusciva gas (F) e dei perfori dai quali è stato iniettato cemento (P). Le linee a tratteggio più spesso e più fine individuano i limiti delle zone investigate con camera d'accumulo per il flusso diffuso di CO₂ dal suolo.

Al contrario l'emissione di gas si verificò anche dai nuovi pozzi e le concentrazione del gas indoor continuo a crescere. Nel tardo pomeriggio dell'11 febbraio il gruppo Università Roma Tre- INGV di Roma, esperto in questi problemi, del quale lo scrivente faceva parte, fu chiamato per dare una valutazione scientifica del problema e suggerire i rimedi più opportuni. Alle 20:00 di quel giorno furono eseguite le prime misure del flusso di CO₂ dal suolo e delle concentrazioni di CO₂ all'interno delle abitazioni. Queste furono estese nei giorni successivi e risultò chiaro dai risultati delle misure di flusso (vd. Par. 5.3.1.2) che il

gas stava diffondendosi, principalmente dai pozzi F1 e F3, preferenzialmente verso le case fluendo all'interno delle sabbie permeabili superficiali.

Dal 19 febbraio al 30 marzo, su nostra richiesta, furono perforati altri quattro pozzetti (ubicazione in Fig. 5.9) e il pozzetto F1 fu riperforato, allo scopo di eseguire iniezioni di cemento nella formazione per ripristinare la continuità del pre-esistente livello impermeabile e confinare così nuovamente il gas nel sottosuolo. Sono state necessarie sette operazioni di “*squeezing*” di cemento (Tab. 5.2) con diversi volumi e proprietà, da questi pozzetti per ripristinare le condizioni naturali, eliminare il pericolo da gas dentro le case, e consentire ai loro abitanti di rientrarvi dopo l'evacuazione.

Tab. 5.2. Cronogramma delle operazioni di iniezione e caratteristiche del cemento

Operazione no.	Data gg.mm, hh	Sito (vd. Fig. 5.9)	Profondità		Vol m ³	Cemento	
			pozzo m	camicia m		d (Kg/l)	P di pompaggio (bar)
P1	21.02, 17	0.7 m da F2	30	28.5	6	1.60	1.5 - 2
P2	23.02, 11	Come sopra	30	28.5	3	1.70	2 - 3
P3	27.02, 10	0.8 m da F3	27.2		6	1.70	2 - 3
P4	28.02, 11	F1	30		3	1.70	1.5 - 3.5
P5	04.03, 08	0.7 m da F1	30	22	7	1.77	2 - 2.5
P6	19.03, 11	0.8 m da F1	27	21.3	5.3	1.77	-
P7	30.03, 17	F1	27		1.4	1.70	-

Note: 21/02 metà cemento è fuoriuscito dal pozzetto F2; 27/02 nessuna perdita, trovata argilla a 16-18 m; 30/03 riperforato F1, trovato cemento consolidato da 6 a 12 m, ciottoli a 15 m, argilla da 16 m di profondità.

Durante questo periodo, per monitorare il livello di pericolosità del gas e controllare l'efficacia delle operazioni di cementazione, il flusso diffuso di CO₂ dal suolo è stato misurato quasi ogni giorno con prospezioni nell'area intorno ai pozzi e alle case ed è stata installata una stazione automatica, con le caratteristiche già descritte in un'aiuola vicino alle case (ubicazione in Fig. 5.9). La concentrazione indoor di CO₂ è stata misurata frequentemente nei vari appartamenti e locali, tombini e tubi vicino alle case e sulle strade, nella cabina elettrica e in una cantina. La concentrazione in aria di CO₂ è stata anche misurata in continuo per lunghi periodi all'interno degli appartamenti a piano terra evacuati.

5.3.1.1. Emissione di gas dai pozzetti

Analisi rapide di terreno, con un Dräger X-am 7000 portatile, hanno rilevato che l'emissione gassosa dai pozzetti era costituita principalmente da CO₂ con solo qualche ppm di H₂S. il tasso di emissione è stato stimato dal gradiente dell'aumento di concentrazione della CO₂ all'interno di una camera d'accumulo posta sopra i fori scoperti. Si tratta di una stima grossolana del flusso di gas che serviva solo per un controllo dei cambiamenti del

tasso di emissione causati dalle iniezioni di cemento; i risultati, in ppm/s, sono mostrati in Fig. 5.10.

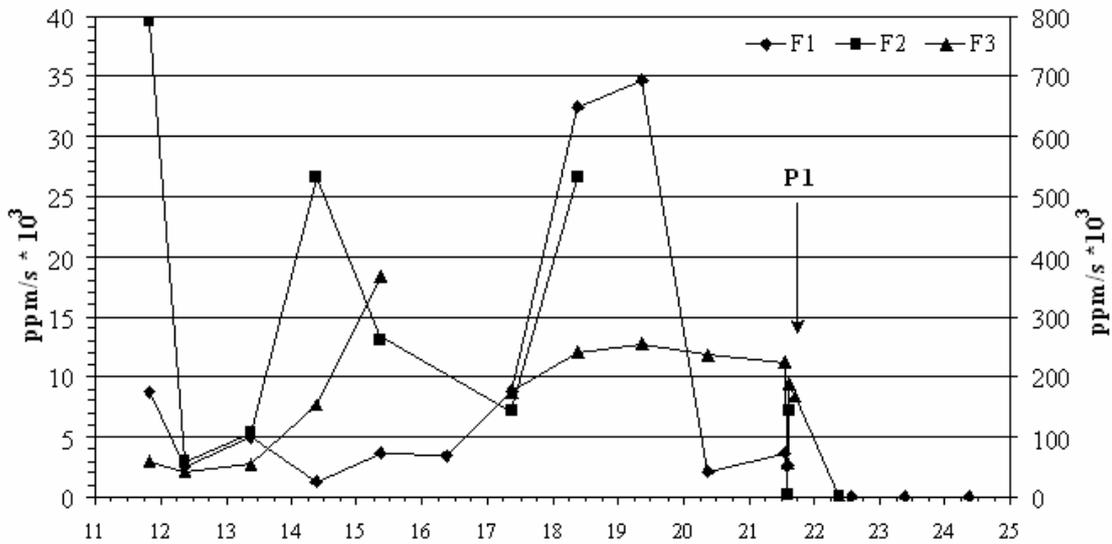


Fig. 5.10. Variazioni nel tasso di emissione di CO₂ dai tre pozzetti misurate dall'11 al 25 febbraio 2005. F1: scala dei valori di sinistra; F2-F3: scala di destra. La freccia indica la data del primo intervento di iniezione di cemento.

La forte diminuzione nell'emissione di gas osservata nel pozzetto F2 dall'11 al 12 febbraio è stata causata da un collasso parziale del pozzetto non tubato che il 12 febbraio risultò ostruito alla profondità di 2,5 m; comunque l'emissione riprese in modo significativo nei giorni successivi. Dalla Fig. 5.10 si vede come il tasso di emissione di CO₂ ha mostrato forti fluttuazioni, senza alcun apprezzabile andamento di decrescita. I valori minimi erano di circa 1300 ppm/s al pozzo F1 di 58.000 ppm/s a F2, e di 44.000 ppm/s a F3. l'emissione di gas dai pozzetti F1-F3 cessò totalmente dopo la prima iniezione di cemento realizzata il 21 febbraio dal perforo P1. In effetti circa 3 m³ della malta iniettata in P1 fuoriuscirono dal vicino pozzetto F2 (Note in Tab. 5.2) e una parte di questa fu fatta fluire all'interno di F3. Inoltre, durante la riperforazione di P1 si osservò una perdita parziale di circolazione e l'emissione di gas da F1 cessò completamente.

5.3.1.2. Flusso di CO₂ dal suolo

Prima dell'inizio delle operazioni di iniezione di cemento dall'11 al 21 febbraio, sono state eseguite undici prospezioni del flusso di CO₂ dal suolo, con una camera d'accumulo, con diverse densità e distribuzioni dei punti di misura. La prospezione più completa è stata fatta il 15 febbraio; partendo dai pozzetti, il flusso di CO₂ è stato misurato in tutte le direzioni, fino a quando venivano trovati valori bassi, tipici del background naturale.

Purtroppo la presenza di edifici, marciapiedi, strade asfaltate (Fig. 5.9) ha impedito di coprire l'area con una maglia regolare di punti di misura. Il flusso di CO₂ è stato misurato su 61 punti trovando una forte variazione di valori da 2 a 31.370 g/m²giorno, con media di 2026 g/m²giorno. Il trattamento statistico dei dati raccolti nelle varie prospezioni indica che la soglia massima del background poteva essere stabilita a 40 g/m²giorno. Nella prospezione del 15 febbraio, il 39 % dei valori rientravano nel fondo e i valori di flusso che eccedevano questa soglia furono considerati anomali e prodotti dalla diffusione del gas nel suolo a partire dai pozzetti.

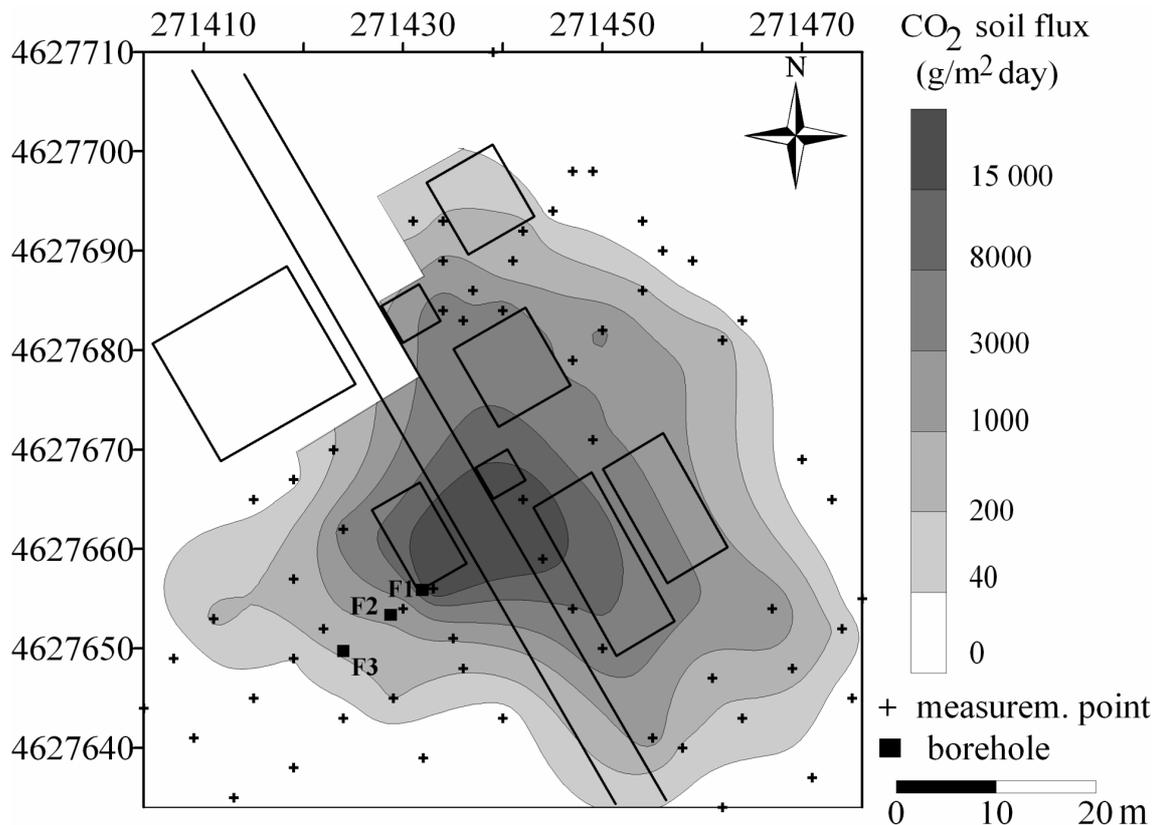


Fig. 5.11. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo della prospezione del 15 febbraio 2003.

La mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo (Fig. 5.11) indica chiaramente che il gas diffondeva all'interno delle sabbie permeabili superficiali, preferenzialmente dai pozzetti verso Est, cioè verso le case; questa era ovviamente una direzione di più alta permeabilità del suolo, probabilmente prodotta dai numerosi lavori di movimento di terra realizzati nella zona. Il flusso totale di CO₂ è stato stimato in circa 9 ton/giorno da una superficie a degassamento anomalo di 2900 m².

Dopo il 15 febbraio e prima delle iniezioni di cemento, il flusso di CO₂ rimase su valori alti in una vasta superficie intorno alle case, con valori medi sempre superiori a 2000

$\text{g/m}^2\text{giorno}$ fino a quasi $11.000 \text{ g/m}^2\text{giorno}$, e con un massimo di $47.000 \text{ g/m}^2\text{giorno}$ (Tab. 5.3).

Tab. 5.3. Principali risultati delle prospezioni di flusso di CO_2 dal suolo in $\text{g/m}^2\text{giorno}$ prima e dopo le iniezioni di cemento*

Data	No. mis	Media	Massimo	Data	No. mis	Media	Massimo
11-feb-05	16	3650	32165	03-mar-05	32	86	290
12-feb-05	26	3128	34104	4 mar - 05	Quinto squeezing in P4		
13-feb-05	26	3519	25931	05-mar-05	32	69	252
14-feb-05	6	10976	30378	06-mar-05	22	36	109
15-feb-05	61	2027	31371	07-mar-05	32	51	151
16-feb-05	26	4253	37385	08-mar-05	32	53	206
17-feb-05	28	2968	25435	09-mar-05	32	55	167
18-feb-05	30	4341	46924	10-mar-05	32	52	182
19-feb-05	24	6497	39748	14-mar-05	32	54	213
20-feb-05	13	6221	35025	15-mar-05	32	52	211
21-feb-05	7	9465	37496	16-mar-05	31	55	235
21-feb.-05	primo squeezing in P1			17-mar-05	29	44	143
22-feb-05	29	306	1174	18-mar-05	29	50	269
23-feb-05	29	269	2823	19-mar-05	30	44	229
23-feb.-05	secondo squeezing in P1			19 mar - 05	Sesto squeezing in P5		
24-feb-05	34	55	140	21-mar-05	30	42	194
25-feb-05	35	64	477	22-mar-05	30	40	154
26-feb-05	32	117	680	23-mar-05	18	65	237
27-feb-05	30	121	434	25-mar-05	18	46	127
27-feb.-05	terzosqueezing in P2			29-mar-05	30	24	84
28-feb-05	30	108	275	30-mar-05	13	52	125
28-feb.-05	Quarto squeezing in F1			30 mar - 05	Settimo squeezing in F1 (riperforato)		
01-mar-05	54	85	557	01-apr-05	13	64	159
02-mar-05	32	90	335	19-apr-05	54	31	139

*Vedi in Fig. 5.9 i siti di iniezione (squeezing) e l'area delle prospezioni del flusso

Il 22 febbraio, il giorno dopo la prima iniezione di cemento in P1, la situazione era completamente cambiata (Tab. 5.3). Nessun valore di flusso di CO_2 dal suolo superava i $3000 \text{ g/m}^2\text{giorno}$, e il valore medio delle misure era sceso da 2000 a $300 \text{ g/m}^2\text{giorno}$. Questo risultato positivo e la persistenza di valori anomali di flusso, anche se ridotti, suggerì di continuare le operazioni di iniezione di cemento. I dati della Tab. 5.3 mostrano come, a seguito delle iniezioni condotte nei nuovi pozzetti o nell'F1 riperforato, il flusso di CO_2 dal suolo continuò a diminuire progressivamente, in particolare dopo l'intervento del 4 marzo, quando il valore medio scese sotto i $70 \text{ g/m}^2\text{giorno}$. Una prospezione realizzata il 19 aprile, 20 giorni dopo l'ultimo squeezing, ha mostrato che il flusso di CO_2 dal suolo era sceso a un valore medio di $31 \text{ g/m}^2\text{giorno}$ (Tab.

5.3), indicando che si era sostanzialmente ripristinato il degassamento naturale della zona, con il 74 % dei valori entro il background.

Per valutare meglio l'efficacia delle iniezioni di cemento nel ridurre l'emissione di gas dalla superficie, fu creata una maglia fitta di punti di misura del flusso di CO₂ dal suolo nella zona tra i pozzetti iniziali e la strada (Fig. 5.9). Questa maglia densa di punti è stata misurata varie volte dal 6 marzo al 26 aprile, osservando anche in questo caso una progressiva riduzione del flusso di CO₂ dal suolo che, dopo la cementazione, aveva un valore medio di 28 g/m²giorno con solo pochi punti con 50 g/m²giorno (Fig. 5.12).

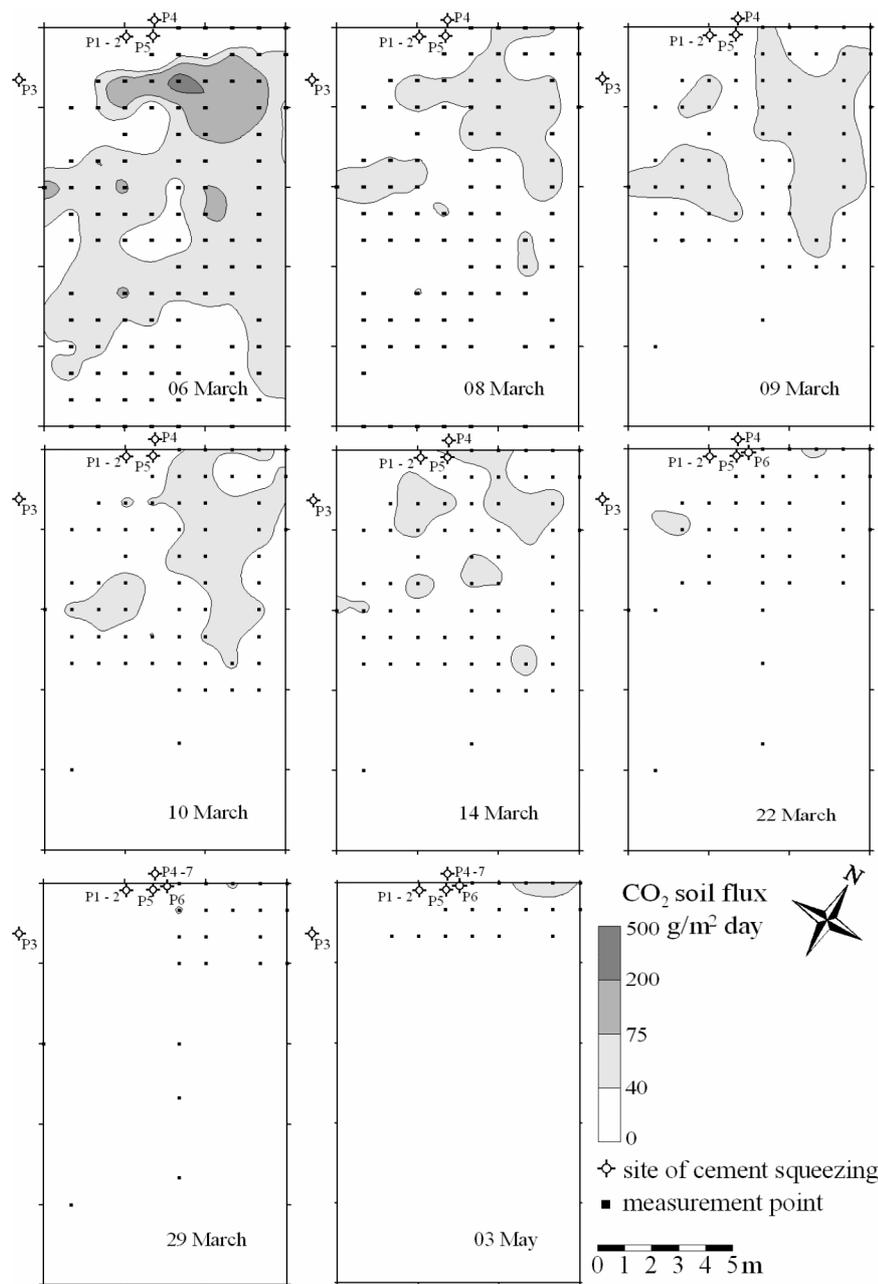


Fig. 5.12. Mappe delle misure di flusso di CO₂ dal suolo condotte sulla maglia densa vicino ai pozzetti.

Il flusso di CO₂ dal suolo è stato monitorato, dal 15 febbraio, anche mediante una stazione automatica, con le stesse caratteristiche precedentemente descritte al Par. 5.2, installate in un'aiuola di fronte alle case dove erano stati misurati elevati valori di flusso (vd. ubicazione in Fig. 5.9). Il flusso di CO₂ e i parametri ambientali sono stati misurati ogni 30 minuti. Nel caso di Fiumicino il flusso di CO₂ era fortemente influenzato dall'umidità del suolo, anche perché durante il periodo di osservazione vi furono violente piogge che causarono una diminuzione della permeabilità del suolo (e quindi del flusso di gas) perché i pori delle sabbie erano saturi d'acqua, più densa del gas.

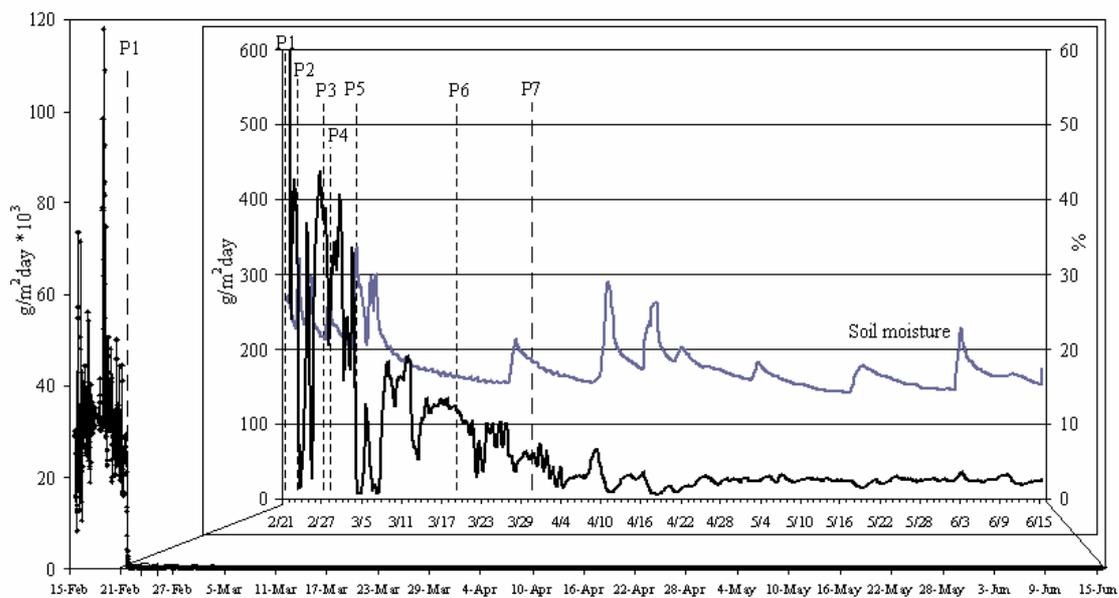


Fig. 5.13. Variazioni temporali del flusso di CO₂ (linee nere) misurato dalla stazione automatica a Fiumicino. Insetto: variazioni della media mobile giornaliera del flusso e dell'umidità del suolo (linea grigia) dal 21 febbraio al 15 giugno. Linee verticali a tratteggio: date delle operazioni di squeezing (P1 a P7). Notare la differente scala dei valori dei due grafici.

Nell'insetto di Fig. 5.13 sono riportate le medie mobili giornaliere dei flussi di CO₂ dal suolo e dell'umidità del suolo misurati dalla stazione e si può apprezzare la sistematica forte diminuzione del flusso di gas registrata all'aumento dell'umidità del terreno. Per questo motivo, solo i valori di flusso misurati in condizioni secche potevano esprimere l'effettivo livello di degassamento. Nel grafico di Fig. 5.13 si può riconoscere chiaramente la forte diminuzione del flusso di CO₂ causata dalla prima iniezione di cemento in P1 del 21 febbraio. Prima di questa operazione, i valori più bassi del flusso di CO₂ erano intorno a 10.000 g/m²giorno, i valori più frequenti tra 20.000 e 30.000 con varie misure sopra i 50.000 fino a un massimo di 110.000 g/m²giorno. Dopo l'iniezione in P1 i valori scesero al di sotto di 500 g/m²giorno, tanto che per apprezzare i valori registrati nei giorni successivi è necessario modificare la scala dell'insetto di

Fig. 5.13. I valori di flusso, dopo il primo squeezing, furono fortemente influenzati dalle piogge; comunque, nessuna diminuzione dei massimi, che ripetutamente si sono avvicinati a 500 g/m²giorno, è stata osservata fino all'intervento P4 del 4 marzo. Questa iniezione fu eseguita nel primo pozzetto perforato vicino al pozzetto F1 (vd. Fig. 5.9) e i valori massimi del flusso di CO₂ dal suolo registrati dalla stazione si ridussero di più della metà a circa 200 g/m²giorno. Le successive iniezioni di cemento ridussero ulteriormente il flusso di CO₂ che, alla fine delle operazioni, solo raramente superò i 50 g/m²giorno con valori di regola intorno a 30-40 g/m²giorno.

5.3.1.3. Concentrazioni in aria di CO₂ all'interno di locali

Le concentrazioni di CO₂ indoor sono state inizialmente misurate in tutti gli appartamenti vicino ai pozzetti mediante uno strumento portatile Dräger X-am 7000. In seguito le misure sono state concentrate in tre appartamenti al piano terra e in altri due locali (cabina elettrica e cantina; vd. in Fig. 5.9) dove la [CO₂] era al di sopra di valori pericolosi. Dal 1 marzo (appartamento n. 1) e dal 3 marzo (appartamenti n. 2 e 3) la [CO₂] indoor è stata misurata ogni 10 minuti al livello del suolo nelle camere da letto con identici strumenti Dräger X-am 7000. Nella Fig. 5.14 è mostrata la variazione temporale dei massimi registrati di [CO₂] indoor.

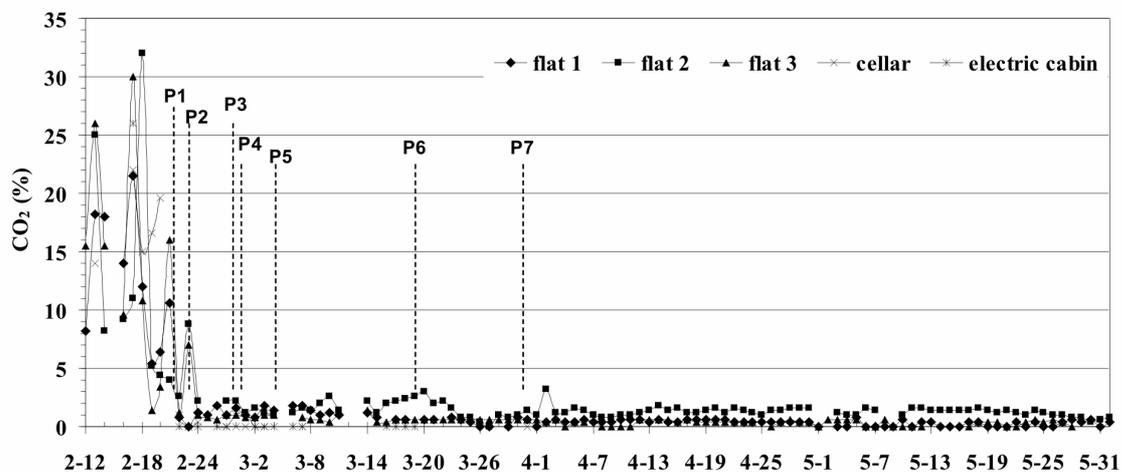


Fig. 5.14. Variazioni temporali dei massimi giornalieri di [CO₂] indoor registrati dal 12 febbraio al 31 maggio 2005 a Fiumicino.

Questi valori non corrispondono necessariamente ai massimi effettivi perché dipendono da quanto tempo gli ambienti erano rimasti chiusi, senza essere stati areati, prima della misura. I dati mostrano che, comunque, in ognuno degli ambienti investigati, prima delle iniezioni di cemento, le concentrazioni in aria erano spesso superiori a 10 vol.% e fino a 30 vol.% di CO₂. Si tratta di concentrazioni letali (vd. Tab. 3.2) che giustificano l'evacuazione di queste abitazioni e

locali. Dopo la prima iniezione di cemento del 21 febbraio, la [CO₂] indoor è scesa inizialmente sotto il 10 vol.% e, dal 23 febbraio, sotto 5 vol.%. È interessante osservare che circa 36 ore sono state necessarie, dalla prima eruzione di gas dal pozzetto F1 del 9 febbraio, perché il gas potesse diffondere lateralmente fino a raggiungere concentrazioni pericolose nelle case. Analogamente la concentrazione indoor di CO₂ si è abbassata sotto il 5 vol.% circa 36-48 ore dopo la prima iniezione di cemento P1 (Fig. 5.14). Dopo le altre iniezioni di cemento, le concentrazioni indoor hanno continuato a scendere progressivamente, tornando a valori normali dell'aria (330 ppm) agli inizi di marzo nella cantina e nella cabina elettrica. Negli appartamenti 1 e 3, la [CO₂] non ha mai superato 1,8 vol.% dopo il 24 febbraio, poi è scesa progressivamente a valori intorno a 0,5 vol.% dopo l'ultima iniezione di cemento del 30 marzo. Nell'appartamento 2 la [CO₂] è rimasta un po' più alta, con massimi intorno a 3 vol.%; qui il pavimento era stato mal costruito e mostrava evidenti fessure e disconnessioni dalle quali è stato misurato un flusso di 210 ppm/s di CO₂. Queste fessure furono sigillate con silicone e i massimi indoor di [CO₂] scesero a valori di 1-1,5 vol.%. Le famiglie furono autorizzate a rientrare nelle loro case con la raccomandazione di installare sistemi automatici ed efficienti per l'aerazione degli spazi e di ricostruire il pavimento dell'appartamento 2 introducendovi uno strato impermeabile.

5.4. Gli incidenti di emissione di gas da pozzi avvenuti nel 2008

Nel 2008 sono avvenuti due nuovi episodi di emissione accidentale di gas da pozzi nell'area dei Colli Albani, rispettivamente in Via Maciocco, molto vicino alla manifestazione gassosa di Cava dei Selci, nel Comune di Marino, e in Via Vervio nel X Municipio del Comune di Roma, in una zona molto prossima al pozzo di Via di Valle Cupella dove era avvenuto l'incidente del 2003 (Par. 5.2).

A Cava dei Selci (Via Maciocco; Fig. 5.1) l'emissione di gas è avvenuta in seguito alle perforazioni, eseguite tra il 16 e il 19 maggio 2008, di quattro pozzetti geognostici di 101 mm di diametro, a profondità variabile tra 10 e 15 m. Dai pozzetti, che hanno incontrato una falda acquifera stabilizzatasi a 4 m dal piano campagna, è avvenuta un'erogazione di gas (CO₂ e minore H₂S) e acqua. I pozzetti sono stati chiusi con piastre di cemento di 1 m² e spessore di 20-30 cm, ma l'emissione di gas è continuata per diffusione nel terreno permeabile intorno ai fori, causando la morte di numerosi piccoli animali (uccelli e lucertole) e la protesta degli abitanti delle vicine palazzine. Il nostro gruppo di ricerca (Università Roma Tre-INGV, Roma) è stato allertato dalla Protezione Civile della Regione Lazio e, a partire dal 31 maggio, ha eseguito lo stesso tipo di intervento già descritto in precedenza: misure ripetute del flusso di CO₂ dal suolo su punti fissi intorno ai pozzi, concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S sia all'esterno vicino ai fori e

nella zona a pilotis usata come parcheggio auto, sia indoor in alcune stanze vicino ai pozzi (per fortuna nessuna casa a piano terra), controllo continuo con stazione automatica del flusso di CO₂ e parametri ambientali in un punto di forte emissione vicino ai fori. Tutte queste misure hanno consentito di controllare l'efficacia delle operazioni di cementazione dei fori, che sono state completate il 1 luglio 2008. In questo periodo sono state riscontrate concentrazioni letali di H₂S (> 500 ppm) vicino alla perforazione S4, dal livello del suolo fino a 80 cm di altezza. Valori pericolosi di [H₂S] sono stati trovati anche nel vano delle scale della vicina palazzina. Anche la [CO₂] raggiunge concentrazioni letali in alcuni punti (14 vol.%). Alla fine delle operazioni di cementazione, la concentrazione in aria è tornata a valori vicini al normale, con qualche ppm di H₂S trasportato dal vento della vicina manifestazione di Cava dei Selci. Anche il flusso di CO₂ dal suolo è sceso a valori bassi, mentre concentrazioni alte e pericolose di CO₂ e H₂S si sono continuate a misurare nelle fessure del terreno alla base dei pilastri della vicina palazzina che è esposta al livello del suolo a un pericolo di gas per emissioni diverse da quelle avvenute nei pozzetti. Un esame delle carote delle perforazioni ha permesso di accertare la presenza di intercalazioni limo-argillose fino a 4-5 m di profondità, che probabilmente agivano come copertura impermeabile per il gas leggermente pressurizzato, contenuto in un sottostante livello più permeabile di piroclastici albane.

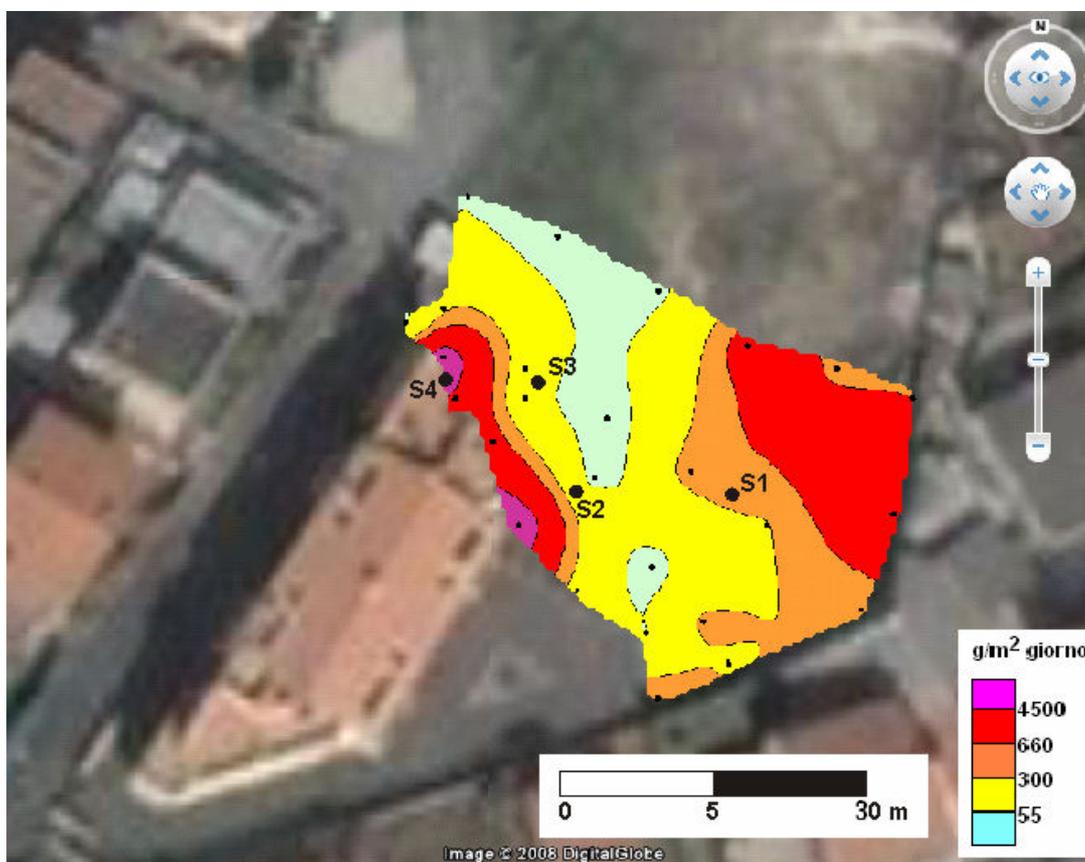


Fig. 5.15. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo misurato il 31 maggio 2008, prima delle operazioni di cementazione, sulla maglia di punti di monitoraggio impiantata nel terreno dei sondaggi geognostici S1-S2-S3-S4 e loro ubicazione (cerchi neri).

Nelle Figg. 5.15 e 5.16 sono mostrate le mappe di flusso di CO₂ dal suolo ottenute rispettivamente prima e alla fine delle operazioni di cementazione.

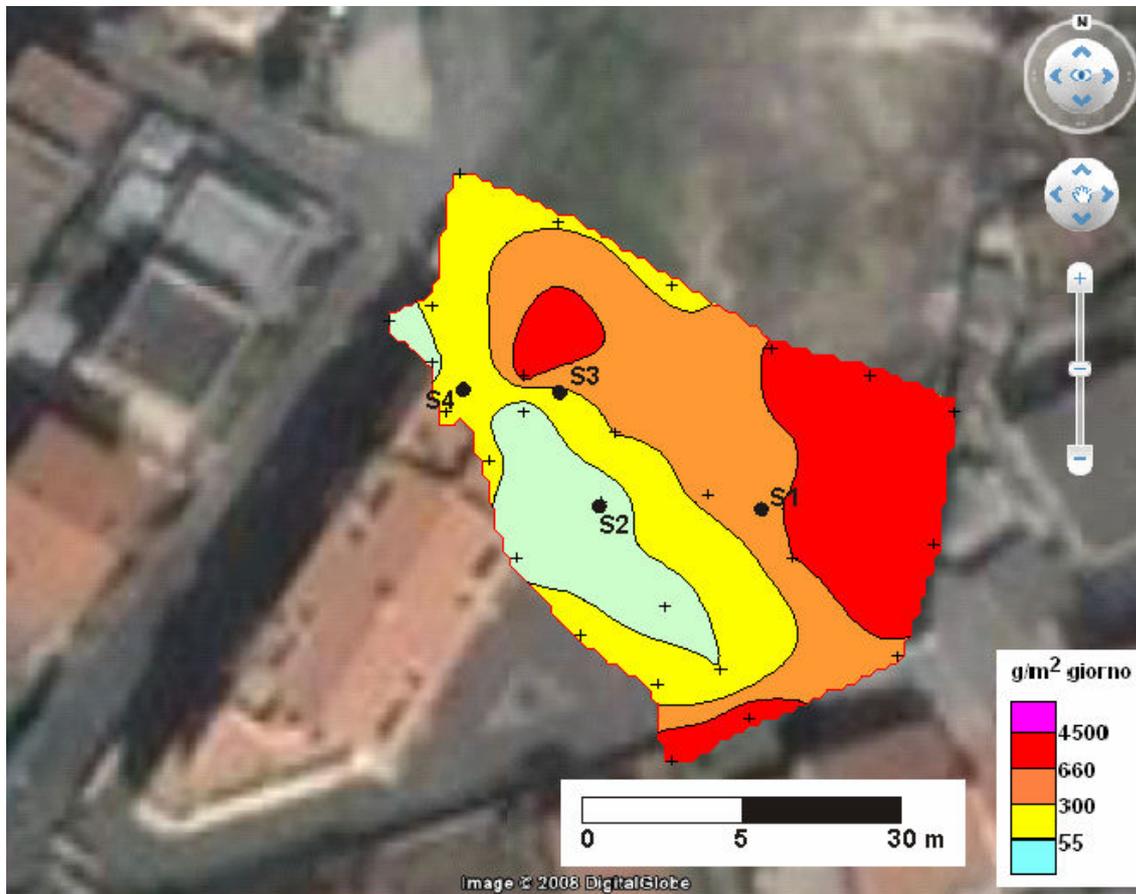


Fig. 5.16. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo misurato il 17 luglio 2008, alla fine delle operazioni di cementazione, sulla maglia di punti di monitoraggio impiantata nel terreno dei sondaggi geognostici S1-S2-S3-S4 e loro ubicazione (cerchi neri).

Le variazioni temporali del flusso di CO₂ misurato dalla stazione automatica sono mostrate in Fig. 5.17.

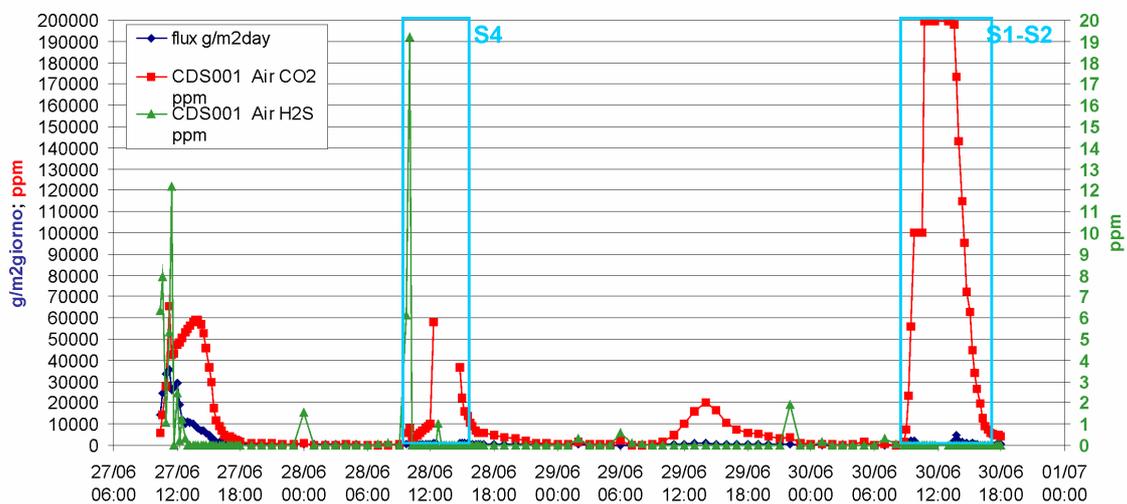


Fig. 5.17. Variazioni temporali del flusso di CO₂ dal suolo e delle concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S misurate dalla stazione automatica a Via Maciocco dal 27 al 30 giugno 2008 in concomitanza con le operazioni di cementazione dei pozzetti. Riquadri celesti: intervallio delle operazioni di cementazione. Infine la Fig. 5.18 mostra un grafico della registrazione in continuo delle concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S misurate a 40 di altezza presso la perforazione S4.

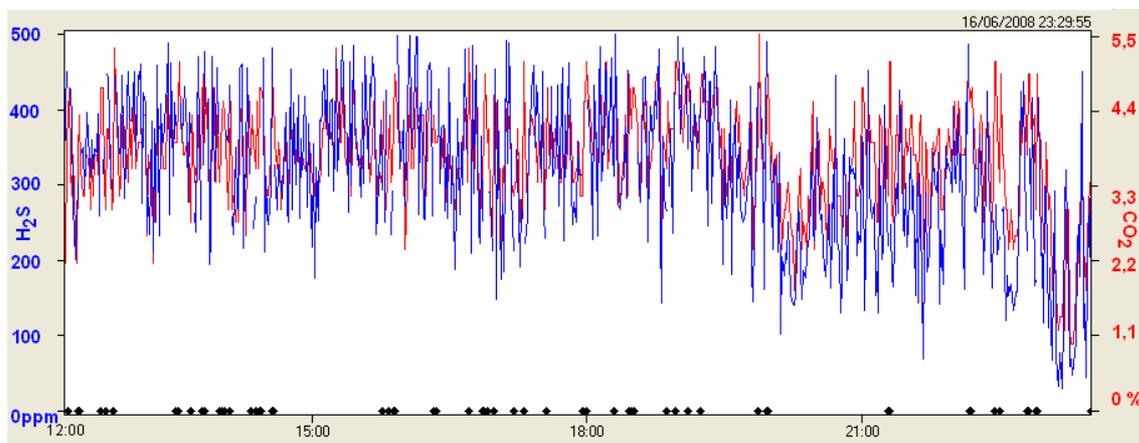


Fig. 5.18. Registrazione in continuo delle concentrazioni di CO₂ e H₂S in aria a 40 cm di altezza in prossimità del sondaggio S4 eseguite nel pomeriggio del 16 giugno 2008, prima delle operazioni di cementazione dei pozzetti. H₂S: linea blu, scala dei valori di sinistra in ppm (fondo scala dello strumento = 500 ppm); CO₂: linea rossa, scala di destra in vol.%.

Le operazioni di messa in sicurezza delle emissioni accidentali di gas dai pozzetti vicini a Cava dei Selci erano appena state completate, che un nuovo incidente avveniva poco lontano, a Via Vervio, nel X Municipio del Comune di Roma.

Qui, il 2 luglio 2008 una violenta emissione di gas, acqua e fango è avvenuta da un pozzo per ricerca d'acqua, perforato nel giardino di una villetta bifamiliare. Non è stata fornita alcuna descrizione della stratigrafia del pozzo per il quale è stata riportata una profondità di 41 m. L'emissione di gas ha interessato una vasta area, provocando la morte di alcuni gatti e creando fastidi ai residenti. Tutta la zona residenziale attorno è stata evacuata dai Vigili del Fuoco che avevano misurato concentrazioni di H₂S immediatamente letali di 500 ppm (fondo scala dello strumento dei VVF= 500 ppm) in aria a poche decine di m dal pozzo e ancora 80 ppm in aria a 100 cm di altezza e a più di trecento metri di distanza. Come misura di prevenzione i VVF hanno inoltre chiuso provvisoriamente il pozzo installando una sorta di *packer* a espansione nella sua parte superiore. Permaneva comunque una debole emissione di gas dal pozzo in prossimità del quale si sono misurate al suolo concentrazioni di CO₂ intorno al 10 vol.% e di H₂S di circa 50 ppm.

Anche qui, su sollecitazione dell'Protezione Civile del Comune di Roma sono state eseguite le stesse misure di controllo dell'intervento di cementazione del pozzo appena descritto per Via

Maciocco. Queste operazioni si sono concluse il 21 luglio 2008 e i dati da noi rilevati sia dai sensori in registrazione continua (concentrazioni outdoor e indoor di CO₂ e H₂S in aria; misure del flusso di CO₂ con stazione automatica) sia ripetendo misure di flusso dal suolo su una rete di punti fissi, hanno permesso di stabilire che la cementazione del pozzo aveva dato risultati positivi, essendo tutti i valori scesi a livello di normalità.

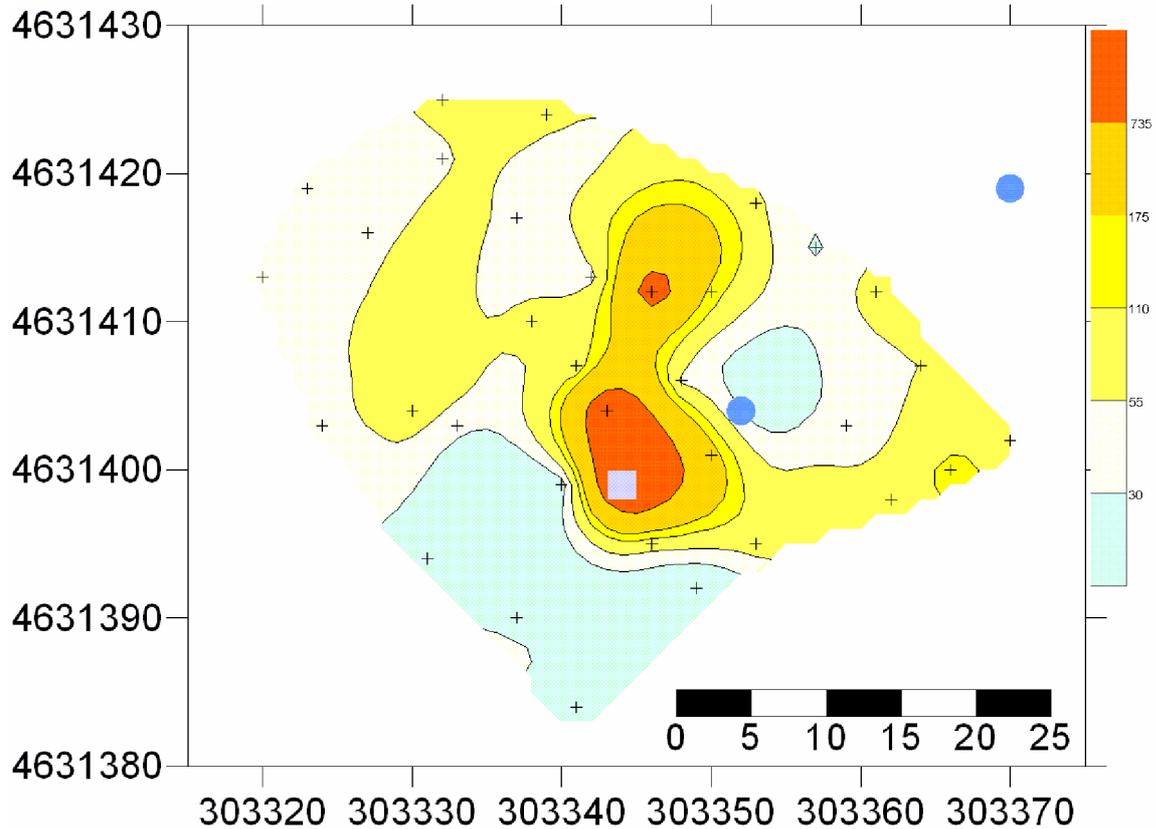


Fig. 5.19. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo della prospezione sulla maglia di punti fissi a Via Vervio del 3 luglio 2008, prima delle operazioni di cementazione. Scala dei flussi di CO₂ in g/m²giorno. Cerchi azzurri: pozzi per acqua (al centro della mappa il pozzo con emissione di gas). Quadrato grigio: ubicazione della stazione automatica.

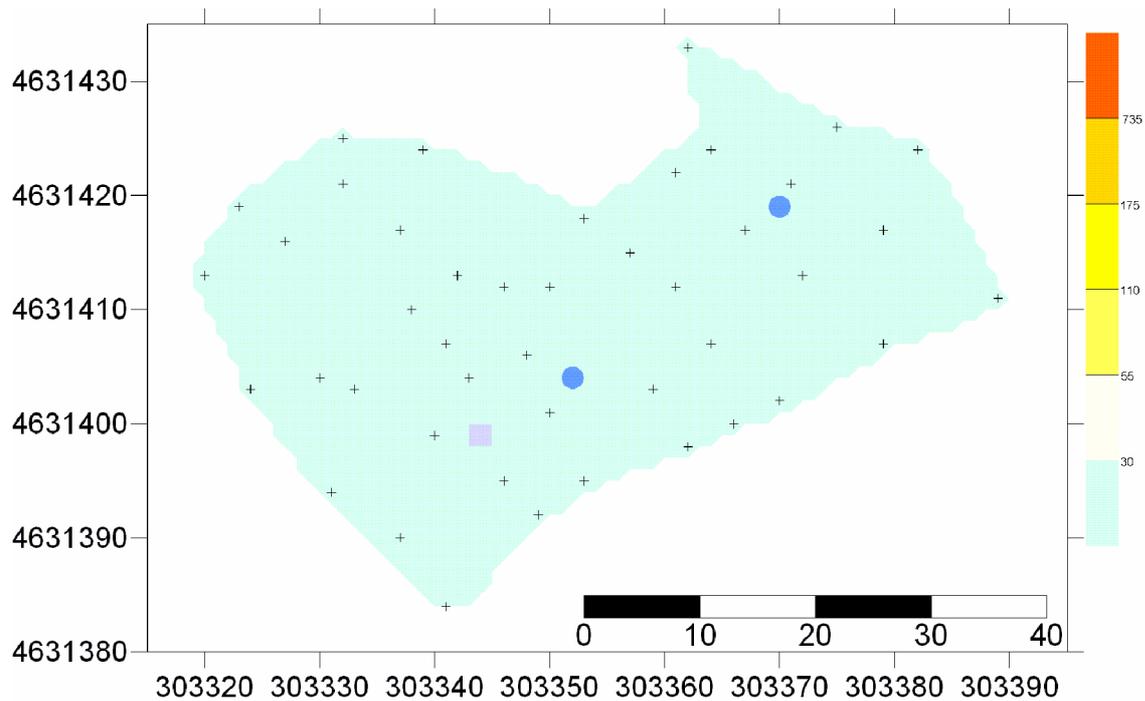


Fig.5.20. Mappa del flusso di CO₂ dal suolo dalla maglia fissa di punti di Via Vervio del 21 luglio 2008, alla fine delle operazioni di cementazione. Scala dei flussi di CO₂ in g/m²giorno.

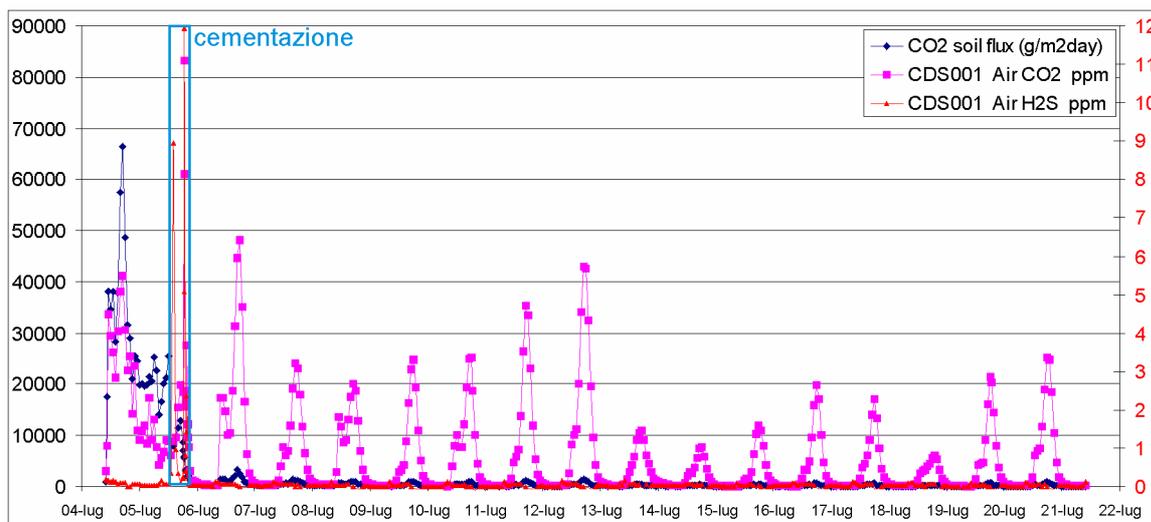


Fig. 5.21. Variazioni temporali del flusso di CO₂ dal suolo in g/m²giorno (rombi blu; scala dei valori di sinistra), della concentrazione in aria di CO₂ in ppm a 50 cm di altezza (quadrati fucsia; scala di sinistra) e della concentrazione in aria di H₂S in ppm a 150 cm di altezza (triangoli rossi; scala dei valori di destra), misurate dalla stazione automatica di monitoraggio a Via Vervio dal 4 al 21 luglio 2008. Il riquadro celeste mostra l'intervallo in cui si sono svolte le operazioni di cementazione nel pomeriggio del 5 luglio.

Nelle Figg. 5.19 e 5.20 si riportano le mappe del flusso di CO₂ dal suolo dalla rete di punti fissi di misura ottenute prima (3 luglio) e dopo (21 luglio) le operazioni di cementazione del 5 luglio 2008. Nella Fig. 5.21 si mostrano le variazioni nel tempo del flusso di CO₂ dal suolo e delle concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S, rispettivamente a 50 e 150 cm di altezza), misurate dalla

stazione automatica dal 3 al 21 luglio 2008. In quest'ultimo grafico si vede che nelle stesse ore di ogni giorno, si registrano valori più alti di flusso, anche dopo la cementazione del pozzo. Questo è stato attribuito allo scuotimento del terreno causato dal passaggio di treni sulla linea ferroviaria Roma-Cassino distante solo una ventina di metri dalla stazione di monitoraggio.

CAP. 6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-VULCANOLOGICO DELL'ISOLA DI VULCANO E PERICOLOSITÀ DA GAS

Vulcano, l'isola più meridionale dell'arco eoliano, è uno stratovulcano di circa 1500 metri di altezza dei quali 500 (Monte Aria) si sviluppano sopra il livello del mare. La parte emersa di Vulcano, che copre un'area di 22 km² e ospita due centri vulcanici attivi indipendenti (il cono della Fossa e Vulcanello; Fig. 6.1), si è sviluppata negli ultimi 120 ka ed è costituita da cinque principali complessi vulcanici: Vulcano primordiale; Caldera del Piano; Lentia; Vulcanello; Caldera della Fossa.

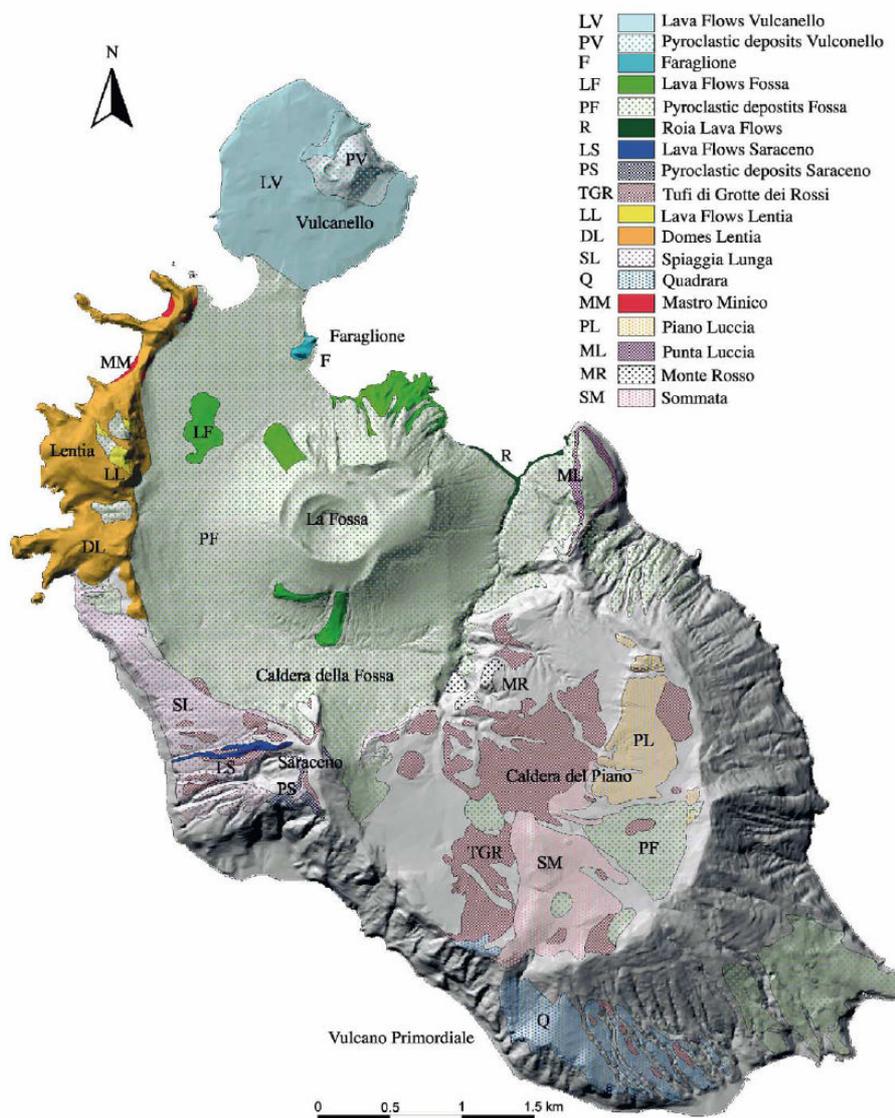


Fig. 6.1. Schema geologico di Vulcano (da Gioncada et al., 2003).

All'interno della caldera si trova l'apparato vulcanico attivo della Fossa di Vulcano, formato negli ultimi 6 ka da prodotti dell'attività esplosiva e da un minor volume di colate

laviche. La sequenza eruttiva della Fossa è caratterizzata da una forte variazione nella composizione dei prodotti emessi. Dati petrologici fanno supporre la presenza di un sistema a due stadi: uno profondo insediato a livello crostale inferiore alimentato da un magma basaltico-shoshonitico ed uno più superficiale, nella crosta superiore, costituito da sacche di magma con composizione intermedio-acida (Gioncada et al., 1998). Le profondità dei due sistemi sono state stimate in 2000-2500 m ($P > 300$ bar) per il sistema riolitico e 3000-3500 m ($P > 700$ bar) per quello basaltico/shoshonitico.

L'ultima eruzione si è verificata nel 1888-1890.

Tettonica e magma *mixing* rivestono un ruolo fondamentale nell'innescare dell'attività eruttiva alla Fossa. Infatti il cratere attuale si trova all'intersezione di due importanti trend vulcano-tettonici: il sistema di fratture orientato NNW, parallelo all'allineamento dei principali complessi vulcanici presenti sull'isola e un trend ENE allineato con la direzione di migrazione dei crateri minori della Fossa e di Vulcanello. Lo studio delle inclusioni fluide ha rivelato, contrariamente a quanto avviene di regola, una diminuzione del contenuto in volatili nel passaggio da magmi basici a silicici suggerendo l'esistenza di un sistema di alimentazione aperto dove magmi trachibasaltici subiscono una differenziazione a basse pressioni (1-2 Kbar) generando magmi intermedi. Questi ultimi attraverso cristallizzazione frazionata a basse pressioni (600 bar) evolverebbero in magmi riolitici (Clocchiatti et al., 1994; Barberi & Carapezza, 2001).

Dal 1890 il cono della Fossa è in uno stato di quiescenza caratterizzato da "crisi" episodiche durante le quali si registrano deboli sciami sismici, forti aumenti della temperatura delle fumarole crateriche, aumento della quantità di gas rilasciato, variazioni chimiche indicative di un aumento nella risalita di fluidi magmatici quali incremento del contenuto di CO_2 , He e N_2 ed espansione areale del campo fumarolico e variazioni nel rapporto isotopico $^3\text{He}/^4\text{He}$.

È inoltre presente un forte degassamento diffuso in tutta l'area sommitale del cono della Fossa e in diverse aree alla base dell'edificio (Spiaggia di Levante, Vulcano Porto e Grotte Palizzi) che risente delle "crisi" della Fossa (Granieri et al., 2006).

La lunghezza del periodo di quiescenza non influenza lo stile eruttivo e l'energia di una eventuale eruzione futura. Questo si deve al fatto che i processi magmatici alla Fossa avvengono in un sistema aperto dove il magma ha la possibilità di degassare continuamente, prevenendo l'accumulo di gas magmatici. Piuttosto, la magnitudo di un'eruzione futura dipenderà dall'efficacia dell'interazione magma/acqua.

Dal 1890 si sono verificati due principali episodi di aumento dell'attività fumarolica (considerati come *unrest*), nessuno dei quali seguito da eruzione. Il primo dei due episodi è avvenuto tra il 1913 e il 1923 quando la temperatura massima delle fumarole crateriche aumentò da circa 200 a 615°C (Sicardi, 1941). Il secondo episodio iniziò nel 1977 (Barberi et al., 1991) e la temperatura massima delle fumarole crateriche aumentò progressivamente da 280 a 692°C nel maggio 1993 (Chiodini et al., 1995). Poi riscese di nuovo per attestarsi a valori di 340-360 °C nel 2004. Nel dicembre 2004 e nel dicembre 2005 si sono verificate due fasi di anomala sismicità e degassamento diffuso al cratere della Fossa (Granieri et al., 2006) e nelle aree di degassamento della spiaggia di Levante e di Palizzi.

Le caratteristiche chimiche delle fumarole di alta temperatura attualmente presenti nella zona craterica della Fossa sono state interpretate come espressione di una comunicazione diretta del magma con l'esterno attraverso un sistema di fratture che facilita la risalita dei gas magmatici. Un aumento di temperatura e composizione "più magmatica" delle fumarole, senza che vi sia necessariamente alcuna risalita di magma, potrebbe rispecchiare semplicemente una maggiore facilità per i gas a raggiungere l'esterno, causata dalla fratturazione sismica dell'edificio o da fratturazione indotta da un aumento della P_{gas} in profondità. Altri geochimici preferiscono ipotizzare che queste variazioni riflettano una risalita del magma. Una interazione dei gas magmatici in risalita con acquiferi superficiali è all'origine delle fumarole di bassa T della Spiaggia di Levante, qui la temperatura è intorno ai 100 °C ed è "tamponata" dalla coesistenza di vapore e acqua liquida. Un aumento della temperatura delle fumarole è possibile solo in caso di aumento della pressione di vapore nell'acquifero che richiede a sua volta un sistema confinato. Questa mutazione delle condizioni di pressione potrebbe dar luogo ad esplosioni freatiche (si veda Granieri et al., 2006 e i riferimenti bibliografici ivi contenuti).

Uno dei fenomeni pericolosi che si possono verificare sull'isola è quello connesso alle emissioni di gas di origine vulcanica (CO_2 , SO_2 e H_2S), che è presente non solo in fasi di crisi ma anche in periodi di quiescenza come quello attuale. Le zone note soggette a pericolo si trovano in prossimità delle fumarole presenti in area craterica e pericraterica, in alcune aree sui fianchi del cono (Grotte di Palizzi) e sulla spiaggia di Levante. Le ricerche svolte a Vulcano per questa tesi, in collaborazione con ricercatori dell'Università Roma Tre, dell'INGV di Roma, dell'Osservatorio Vesuviano, dell'ITER di Tenerife (Spagna) e dell'Università di Düsseldorf (Germania) nelle aree abitate di Vulcano Porto hanno evidenziato che il flusso di anidride carbonica dal suolo raggiunge anche qua valori molto elevati portando la concentrazione in aria del gas a livelli pericolosi per la salute umana e

talvolta letali soprattutto in luoghi morfologicamente depressi sia naturali che di natura antropica (scavi, pozzi e scantinati).

CAP. 7. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DELLE EMISSIONI GASSOSE A VULCANO ATTRAVERSO MISURE DI FLUSSO DIFFUSO E VISCOSO DI CO₂, H₂S, SO₂ E DI CONCENTRAZIONE IN ARIA DI CO₂ E H₂S

A partire dall'aprile 1995 all'Isola di Vulcano ricercatori dell'Università Roma Tre, dell'INGV di Roma e dell'Osservatorio Vesuviano, hanno condotto a più riprese campagne per la valutazione della pericolosità delle emissioni gassose e per lo studio dei precursori geochimici di eruzioni del vulcano della Fossa (Fig. 7.1). In particolare sono state eseguite ripetute campagne di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo su una maglia fissa nell'area craterica della Fossa (Figg. 7.2, 7.3 e Tab. 7.1) i cui risultati sono stati pubblicati da Granieri et al. (2006) in un lavoro del quale lo scrivente è co-autore. Altre ricerche ancora inedite sono state eseguite alla Spiaggia di Levante (Figg. 7.11 e 7.12), a Palizzi (Fig. 7.15), che sono le altre due principali aree di emissione di gas dal suolo dell'isola. Nel dicembre 2005 è stata eseguita una campagna di misura del flusso diffuso dal suolo (Fig. 7.5) e di concentrazioni di CO₂ (Figg. 7.6 e 7.7) in aria nell'abitato di Vulcano Porto. Nel maggio 2007, in collaborazione con ricercatori dell'ITER di Tenerife (Spagna) e della Fachhochschule di Düsseldorf (Germania), è stata condotta una campagna di dettaglio nell'area della spiaggia di Levante con lo scopo di studiare il flusso totale di CO₂ e H₂S e di fare una valutazione della pericolosità dell'emissione di questi gas in atmosfera. Si ricorda che alla spiaggia di Levante è presente una "pozza di fango termale" frequentata da molti turisti. Sono state eseguite misure di flusso di CO₂ e H₂S dal suolo e di temperatura del suolo (Fig. 7.12); misure di flusso viscoso dalla spiaggia e dal mare (Fig. 7.13); misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL (Fig. 7.14). Anche al cratere sono state eseguite misure di [CO₂] e [H₂S] in aria con TDL (Fig. 7.4) e inoltre è stato misurato il flusso di SO₂ dalle fumarole crateriche con miniDOAS (ubicazione in Fig. 7.1) e sono stati misurati i rapporti di concentrazione in aria dei componenti principali dei gas emessi.

7.1. Campagne geochimiche al cratere della Fossa

7.1.1. Le campagne di misura del flusso di CO₂ dal suolo

Al cratere della Fossa sono state eseguite undici campagne di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo con camera d'accumulo (Tab. 7.1 e Figg. 7.2, 7.3) tra il 1995 e il 2006 (Chiodini et al., 1996, 2005; Granieri et al., 2006) sia per identificare le principali strutture

degassanti dell'area che per valutare lo stato di attività del vulcano comparando i tassi di rilascio di gas dal suolo e le analisi chimico-isotopiche dei gas emessi.

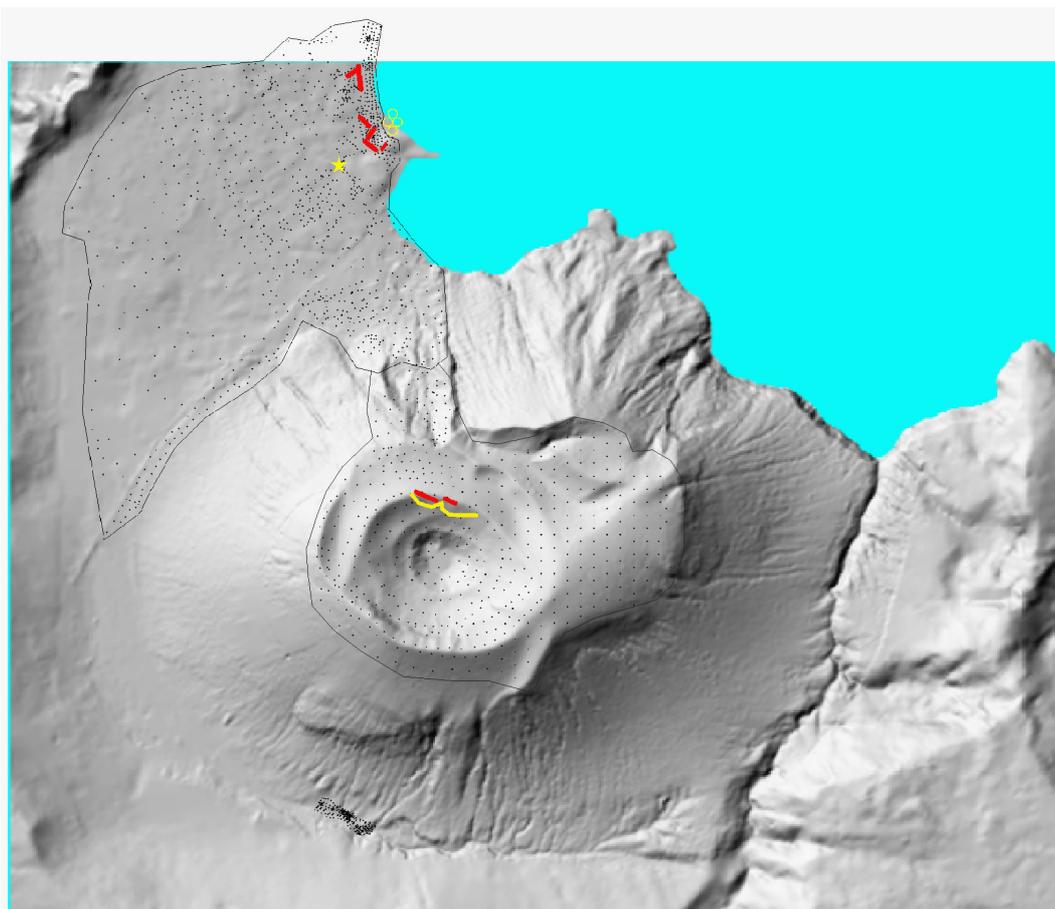


Fig. 7.1. Aree investigate nelle ripetute campagne geochimiche con vari metodi di indagine. Linea nera continua e punti neri: settori di Vulcano Porto e spiaggia di Levante (flussi diffusi e concentrazioni in aria), del cratere della Fossa e di Palizzi (flussi diffusi). Linee rosse: percorsi TDL; cerchi gialli: flussi viscosi; stella gialla: stazione automatica di monitoraggio; linea gialla: percorsi miniDOAS alle fumarole crateriche.

Tab. 7.1. Principali risultati delle campagne di misura di flusso diffuso di CO_2 dal suolo del cratere della Fossa.

Date	Investig. Area, Km^2	Meas. Points, n	Mean (Min-Max), $\text{gm}^{-2}\text{d}^{-1}$	Mean (Min-Max) ^{CTA} , td^{-1}
Apr.1995	0.82	91	435 (0.50–8830)	165 (136–193)
Jul. 1995	0.47	257	289 (0.50–7228)	109 (94–124)
Jul. 1998	0.75	429	288 (0.60–9633)	107 (98–116)
Mar. 2002	0.19	54	302 (0.70–2360)	68 (58–79)
Jun. 2003	0.75	76	129 (0.00–1238)	41 (37–44)
Dec. 2004	0.61	308	1370 (1.52–29386)	331 (307–355)
Apr. 2005	0.83	403	826 (1.06–31942)	223 (207–239)
May 2005	0.40	170	780 (0.56–18300)	152 (138–167)
Jul. 2005	0.80	381	333 (1.06–6386)	82 (76–87)
Dec. 2005	0.80	489	2750 (7.74–32510)	724 (693–754)
Jan. 2006	0.25	178	1992 (1.4–37346)	504 (451–556)

CTA: Crater Target Area

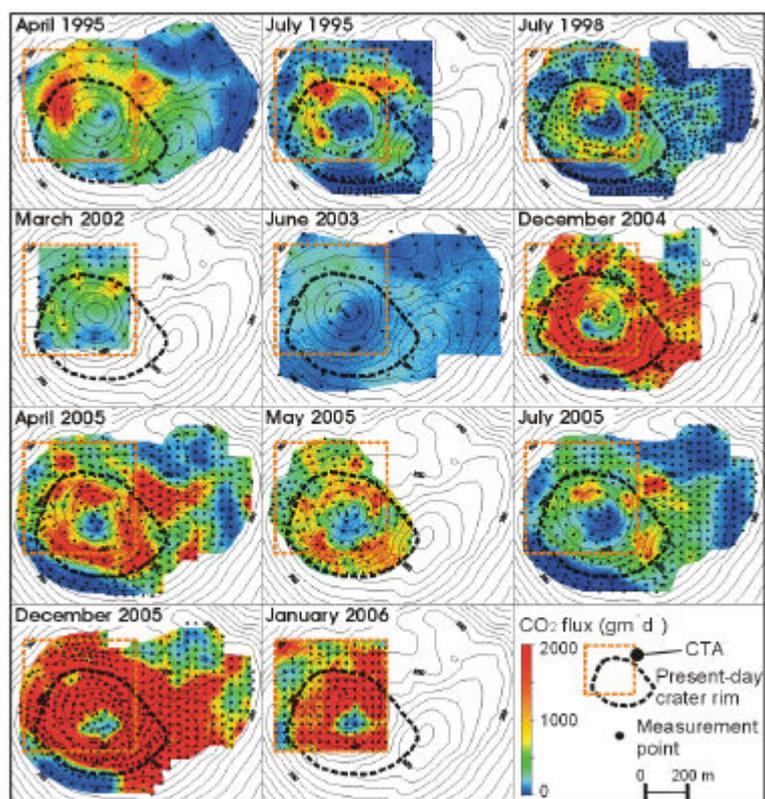


Fig. 7.2. Mappe del flusso diffuso di CO₂ dal suolo del cratere della Fossa delle campagne eseguite da aprile 1995 a gennaio 2006 (da Granieri et al., 2006).

Al fine di riconoscere le principali strutture attive di degassamento sono state prese in considerazione le cinque campagne più estese condotte in aprile 1995, luglio 1998, aprile, luglio e dicembre 2005. Dalla Fig. 7.2 si riconosce come prevalentemente attivo il settore craterico in corrispondenza degli orli –sia attuale che passati- ad esclusione del fondo del cratere attuale caratterizzato da bassissima permeabilità per fenomeni di *self-sealing* (Granieri et al., 2006).

Al fine di comparare i flussi totali calcolati per ogni campagna, è stata scelta un'area di 500 × 500 m che è stata misurata in ogni campagna (CTA= Crater Target Area; linea arancione a tratteggio in Fig. 7.2) ed è stato ricalcolato il flusso di ciascuna campagna relativo alle misure ricadenti nella suddetta area. In Tab. 7.1 sono riportati i valori del flusso totale, insieme all'area indagata e al numero totale di misure per ogni campagna. In Fig. 7.3 le variazioni del flusso totale di CO₂ sono comparate con la concentrazione di CO₂ misurata nei gas fumarolici: dal 1995 al 2003 si sono registrati flussi da 160 a 40 ton/giorno in periodo di quiescenza caratterizzata da emissione di gas a prevalente componente idrotermale e alto contenuto in vapor d'acqua. Le campagne dal 2004 al 2006 hanno invece seguito il corso di due crisi verificatesi alla fine del 2004 e alla fine del 2005. Il flusso totale della CTA di dicembre 2004 (330 ton/giorno) era 3-4 volte superiore al

precedente ed accompagnato da emissione di gas a prevalente componente magmatica ricca in CO₂; il flusso e la concentrazione di CO₂ alle fumarole sono andati a decrescere nelle successive campagne da aprile a luglio 2005, per poi risalire a 700 e 500 ton/giorno nelle campagne rispettivamente di dicembre 2005 e di gennaio 2006 di nuovo caratterizzate da fumarole a prevalente componente magmatica (Fig. 7.3) (Granieri et al., 2006).

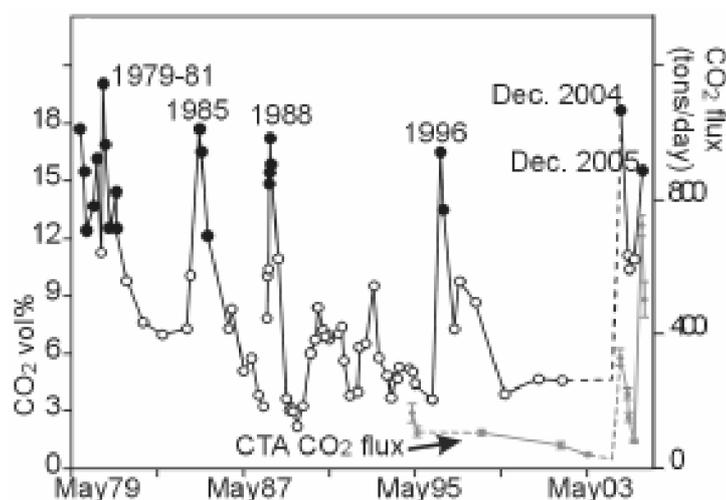


Fig. 7.3. Comparazione delle variazioni di flusso diffuso di CO₂ dal suolo della CTA e della concentrazione di CO₂ nei gas fumarolici dal 1995 al 2006 (da Granieri et al., 2006). Indicatori neri: gas fumarolici ad alta concentrazione di CO₂ (> 12 vol.%). Indicatori bianchi: gas fumarolici a bassa concentrazione di CO₂. Linea grigia e barre d'errore: flussi diffusi di CO₂ dal suolo misurati sulla CTA.

Si nota una forte correlazione tra aumento del rilascio diffuso di CO₂ dal suolo e incremento della componente magmatica nei gas fumarolici, cosa che è chiaramente espressione di episodi di intenso degassamento della sorgente magmatica (Granieri et al., 2006).

7.1.2. Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL

Misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL sono state eseguite lungo il campo fumarolico del bordo settentrionale del cratere della Fossa per verificare la pericolosità dell'area in considerazione della continua presenza di turisti. In Tab. 7.2 sono mostrati i risultati di due profili, lunghi 61 e 30 m, di misura di concentrazione in aria a 150 cm di altezza, cioè ad altezza d'uomo considerando che i turisti attraversano l'area ma non si siedono. Come rilevato ai Colli Albani, al cratere le concentrazioni più pericolose che si registrano sono quelle di H₂S, con valori massimi che superano le 100 ppm in aria (Tab. 7.2 e Fig. 7.4).

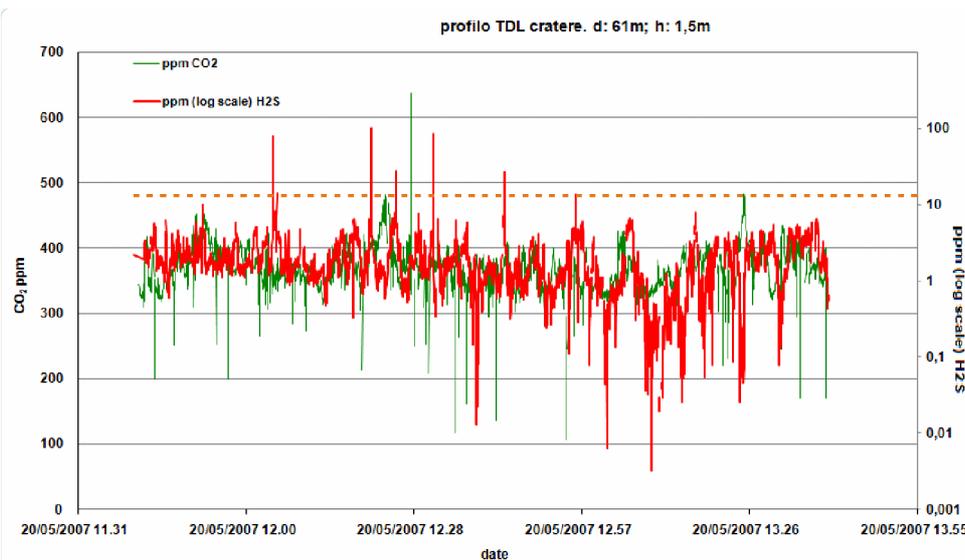


Fig. 7.4. Profilo TDL di concentrazione in aria di CO₂ (linea verde; asse dei valori di sinistra) e di H₂S (linea rossa; asse di destra) misurate al cratere della Fossa nel maggio 2007. Linea arancione a tratteggio: soglia STEL per l'H₂S.

Tab. 7.2. Risultati principali dei profili TDL di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S eseguiti a Vulcano nel maggio 2007

data	profilo H ₂ S	sito	lunghezza	altezza	durata	min	med	max
			m	cm				
19/05/2007	1	lago spiaggia	40	15	52	0,01	0,05	2,7
19/05/2007	2	lago spiaggia	21	15	96	0,01	0,25	8,6
19/05/2007	3	fumarole N pozza	19	20	33	3,6	10,99	19,8
19/05/2007	4	pozza	33	25	80	0,04	4,4	15,8
21/05/2007	5	a SW di pozza	42	20	104	0,01	2,24	6,5
21/05/2007	6	a S di pozza	19	20	76	0,03	6,4	14,2
20/05/2007	7	fumarole cratere	61	150	157	0,05	2,1	103
20/05/2007	8	fumarole cratere	30	150	49	0,1	7,5	179

data	profilo CO ₂	sito	lunghezza	altezza	durata	min	med	max
			m	cm				
19/05/2007	1	lago spiaggia	40	15	52	182	331	496
19/05/2007	2	lago spiaggia	21	15	96	116	281	513
19/05/2007	3	fumarole N pozza	19	20	33	420	661	916
19/05/2007	4	pozza	33	25	80	430	557	812
21/05/2007	5	a SW di pozza	42	20	24	315	382	468
21/05/2007	6	a S di pozza	19	20	76	333	525	817
20/05/2007	7	fumarole cratere	61	150	157	302	367	483
20/05/2007	8	fumarole cratere	30	150	28	300	420	523

7.1.3. Le misure di flusso di SO₂ dal plume craterico

Considerando che nell'area craterica vi sono fumarole di alta temperatura in cui predomina l'SO₂ rispetto all'H₂S che è più abbondante nelle manifestazioni di bassa T, sarebbe stato interessante effettuare anche misure di concentrazione in aria di SO₂ con TDL. Non avendo a disposizione la strumentazione specifica, sono stati eseguiti alla Fossa due profili con miniDOAS per la misura del flusso di SO₂ dal campo fumarolico lungo l'orlo settentrionale del cratere (Fig. 7.1). Il primo percorso, quello a NW in Fig. 7.1, è stato ripetuto 12 volte e si è potuto calcolare un flusso totale di SO₂ di 1,59 ± 0,54 ton/giorno. Il

secondo è stato ripetuto due volte e si è calcolato un flusso di $2,73 \pm 1,12$ ton/giorno. In totale si è quindi misurato un flusso di SO_2 dal campo fumarolico del bordo craterico di $4,32 \pm 1,66$ ton/giorno.

Nella stessa campagna si sono anche misurati i rapporti di concentrazione in aria dei componenti principali del gas emesso con uno strumento portatile installato in prossimità dei siti di indagine. Si sono in questo modo calcolati i rapporti di massa tra CO_2 e SO_2 , e tra H_2S e SO_2 . Noti questi rapporti ($\text{CO}_2/\text{SO}_2 = 10,3$; $\text{H}_2\text{S}/\text{SO}_2 = 0,4$) è stato possibile calcolare i flussi totali di CO_2 e H_2S dal campo fumarolico craterico, che equivalgono rispettivamente a 44,7 e 1,1 ton/giorno.

7.2. Campagne geochimiche a Vulcano Porto

7.2.1. Misure di flusso di CO_2 dal suolo

Nel dicembre 2005, la campagna di misura di flusso diffuso di CO_2 dal suolo condotta sull'area craterica, è stata estesa anche al settore settentrionale alla base della Fossa che comprende l'abitato di Vulcano Porto (Fig. 7.1). Sono state eseguite circa 1000 misure su un'area di 1 km^2 misurando flussi da 0,1 a 40.500 g/m^2 giorno, con media di 246 g/m^2 giorno. Il flusso totale calcolato per questa campagna è di $97,5$ ton/giorno da una superficie anomala di $0,97 \text{ km}^2$ (Fig. 7.5 e Tab. 7.3). Dalla mappa di Fig. 7.5 si vede come la maggior parte dell'area sia soggetta ad un fenomeno di degassamento anomalo e come le zone di maggior emissione siano prevalentemente concentrate nell'abitato di Vulcano Porto.

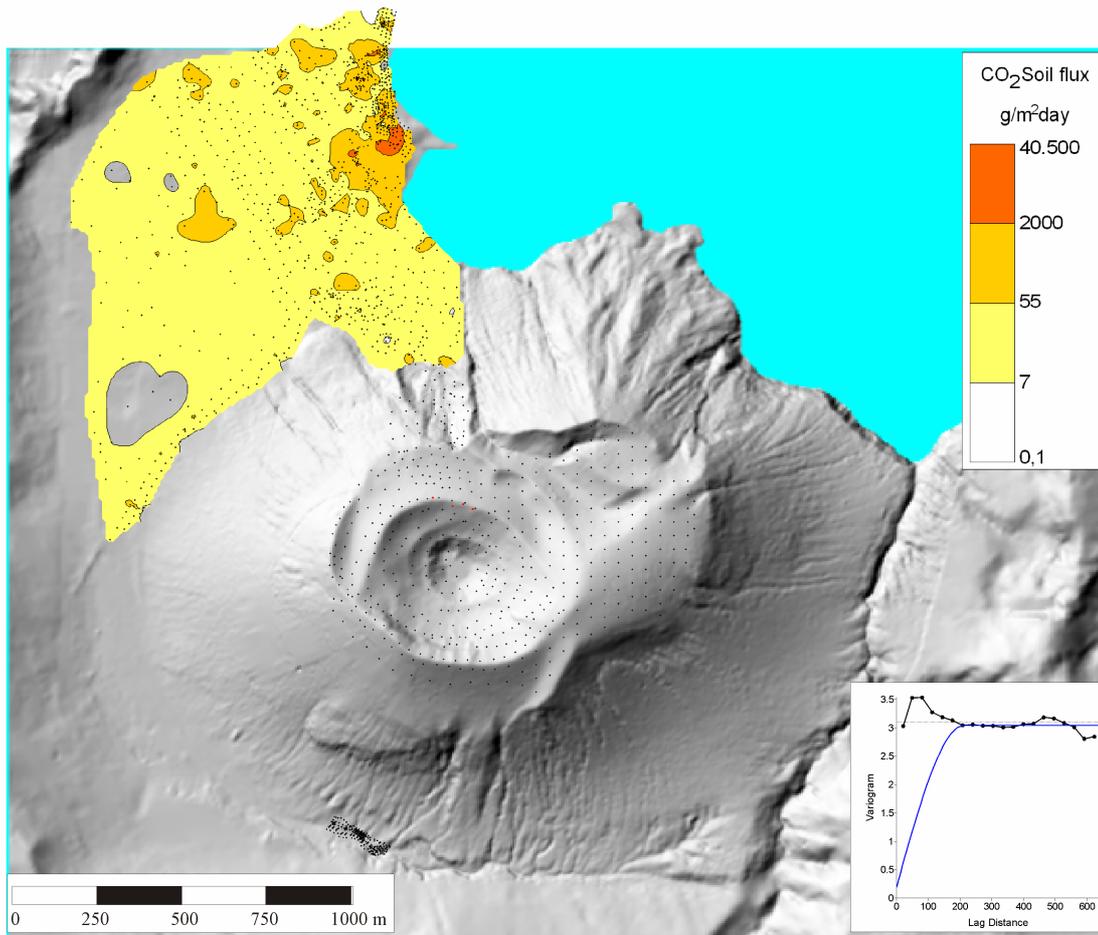


Fig. 7.5. Mappa del flusso diffuso di CO₂ dal suolo della campagna di dicembre 2005.

Tab. 7.3. Calcolo del flusso totale diffuso di CO₂ dal suolo della campagna di dicembre 2005 alla base del vulcano della Fossa e nell'abitato di Vulcano Porto.

Class g/m ² day	Frequency %	Mean g/m ² day	Area m ²	Flux tonnes/day
0.1-7	15.1	2.4	51,040	*
7-55	57.0	26.7	857,829	22.9
55-2000	26.4	243.7	109,576	26.7
2000-40,500	1.5	8576	5581	47.9
Total			1,024,026	97.5

* background contribution not calculated

7.2.2. Le misure di concentrazione in aria e indoor

Data l'alta percentuale di misure a medio e alto flusso dal suolo nell'abitato di Vulcano Porto, in dicembre 2005 e luglio 2006 sono state eseguite campagne di misura delle concentrazioni in aria di CO₂ sia all'aperto che in abitazioni. Sono state eseguite 149 misure in totale, e si sono misurate concentrazioni da 0 a 100 vol.%, con media di 2,9 vol.%. Dall'istogramma di Fig. 7.6 si osserva che quasi il 27% delle misure erano superiori alla soglia TWA, più del 12% superava lo STEL, quasi il 7% era sopra la soglia di

immediato pericolo, e il 5,8% delle misure era sopra la soglia immediatamente letale di 10 vol.% di CO₂.

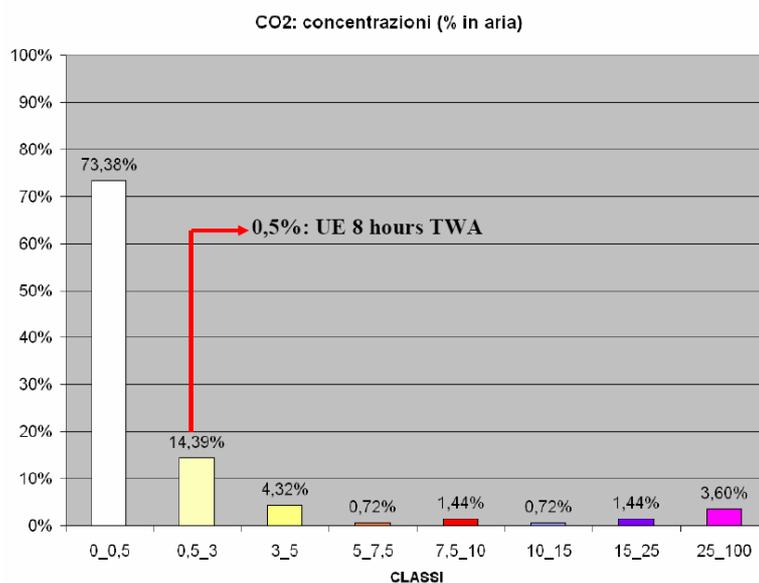


Fig. 7.6. Frequenza delle misure di concentrazione di CO₂ eseguite a Vulcano Porto per classi di pericolosità crescente (TWA= 0,5 vol.%; STEL= 3 vol.%; immediato pericolo= 10 vol.%; soglia immediatamente letale= 25 vol.%).

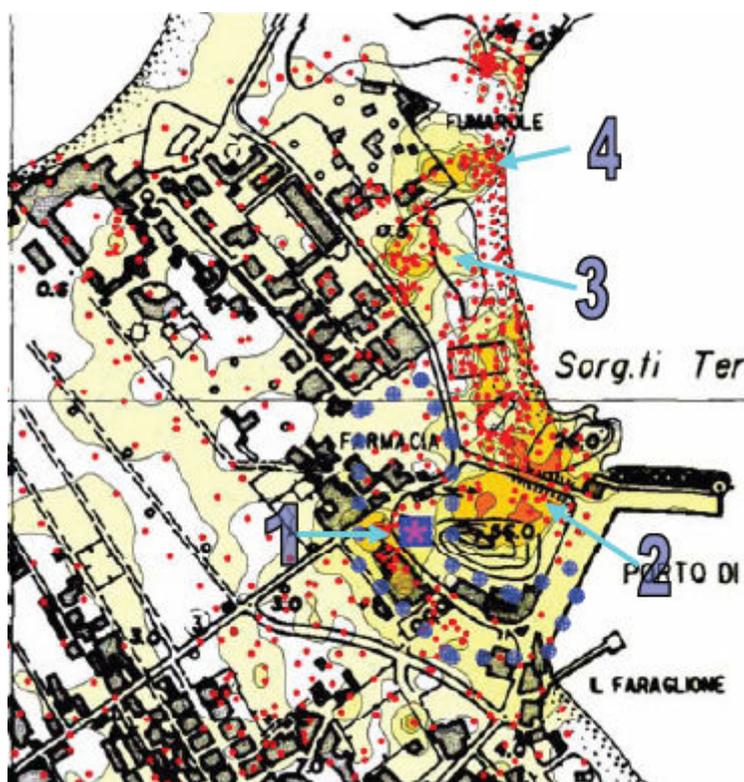


Fig. 7.7. Localizzazione del settore con maggiore frequenza di alte concentrazioni di CO₂ in aria (perimetro a cerchi azzurri), e confronto con la mappa di dettaglio del flusso di CO₂ dal suolo (1, 2, 3 e 4: aree a maggior rilascio di CO₂ dal suolo). L'asterisco rosa indica la localizzazione della stazione automatica di monitoraggio in continuo di CO₂ e parametri ambientali discussa nel testo più avanti.

La maggior parte delle misure ad alta concentrazione si sono registrate in un settore all'interno della zona più densamente abitata di Vulcano Porto che va dalla spiaggia di Levante al molo del porto passando ad Ovest del Faraglione (Fig. 7.7).

7.2.3. Il monitoraggio in continuo del flusso di CO₂ dal suolo

In Fig. 7.7 si mostra anche la localizzazione di una stazione di monitoraggio in continuo di CO₂ dal suolo e parametri ambientali. Questa è stata installata alla base occidentale del faraglione riparata dietro un muro, sulla base del fatto che in quell'area vi sono zone ad alto flusso ed alte concentrazioni in aria, e in base alla necessità di trovare un luogo protetto dal passaggio di abitanti e turisti dell'isola. La stazione ha operato per oltre un anno dal 19 gennaio 2006 al 1 marzo 2007, quando è stata spostata a Stromboli per monitorarne la crisi eruttiva.

La stazione era impostata per misurare ogni ora il flusso di CO₂ dal suolo e i parametri ambientali di temperatura, umidità e pressione dell'aria, temperatura e umidità del suolo, intensità e direzione del vento (vedi Par. 4.1.2 per la spiegazione della correlazione tra flusso e parametri ambientali).

Tab. 7.4. Statistiche descrittive delle misure eseguite dalla stazione di monitoraggio in continuo a Vulcano Porto da gennaio 2006 a marzo 2007.

Variabile	N Validi	Media	Mediana	Minimo	Massimo	Varianza	Dev.Std.
CO2 soil flux	9289	412,267	403,936	96,7124	940,096	9426,519	97,09026
Air R_H_ %	9300	69,835	70,500	28,1710	92,939	138,672	11,77593
Air T_ °C	9300	19,600	18,655	3,7000	37,380	42,044	6,48413
Bar_Pr_ HPa	9301	1016,711	1016,276	986,0153	1040,842	42,447	6,51512
Soil T_ °C	9301	26,552	26,690	20,7400	32,440	13,746	3,70759
Soil W_ %	9301	16,113	15,630	10,1200	46,670	15,155	3,89288
W_Dir_ °N	9301	176,792	149,786	0,0881	358,658	9536,049	97,65270
W_Speed m/s	9301	0,520	0,216	0,0286	6,417	0,462	0,67992

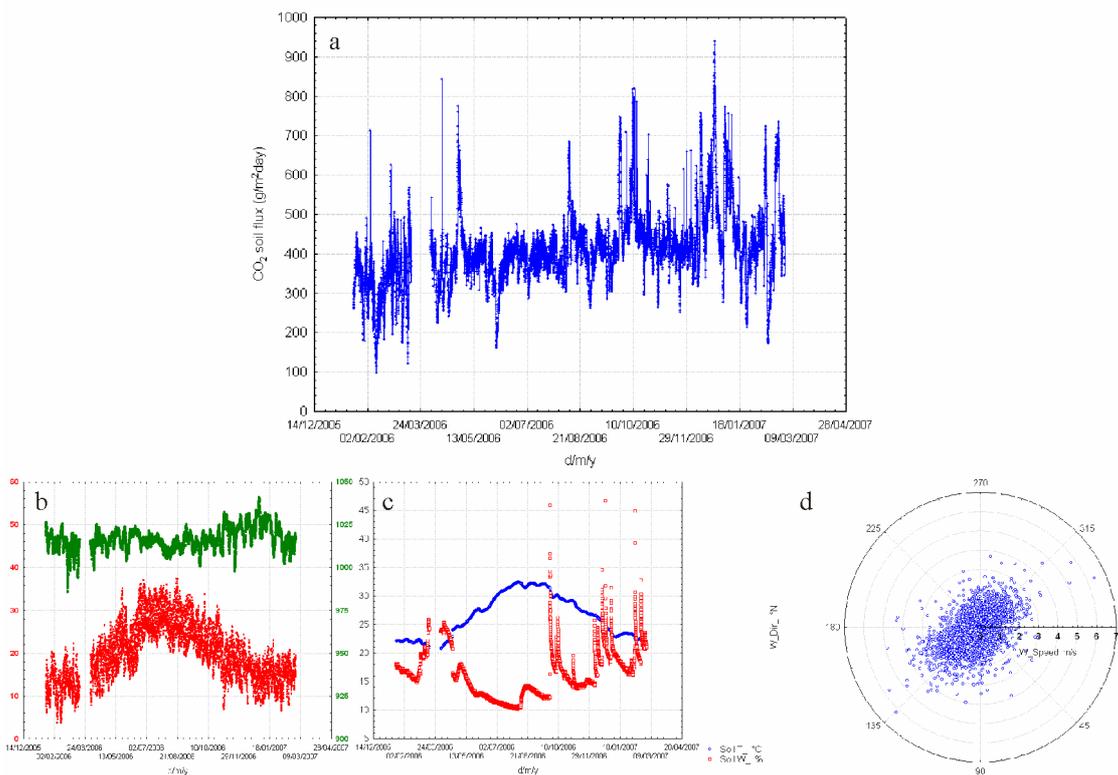


Fig. 7.8. Variazioni temporali registrate a Vulcano Porto da gennaio 2006 a marzo 2007 di: a) flusso di CO₂ dal suolo; b) temperatura (in rosso) e pressione (in verde) dell'aria; c) temperatura (in blu) e umidità (in rosso) del suolo. d) Intensità del vento in funzione della sua direzione.

Dalla Tab. 7.4 e dalla Fig. 7.8 si possono osservare le variazioni fino a un ordine di grandezza nel rilascio di CO₂ dal suolo verificatesi nell'intervallo di registrazione: sono stati infatti misurati flussi da 96 a 940 g/m²giorno, con una media di circa 412 g/m²giorno. Come discusso già in Par. 4.1.2, parte di queste variazioni sono da ascrivere a variazioni nella dinamica del vulcano e parte alle sole variazioni delle condizioni ambientali. In Tab. 7.5 si possono osservare valori di correlazione apprezzabili ma non elevati tra flusso e velocità del vento e umidità del suolo. Per quest'ultimo parametro si osserva un correlazione positiva poiché la camera d'accumulo della stazione era posta in un luogo riparato dalle intemperie, di conseguenza, ogni volta che fenomeni piovosi aumentavano l'umidità del suolo, il flusso di CO₂ veniva tamponato dal terreno circostante e prevalentemente convogliato al di sotto della camera d'accumulo protetta dalla pioggia. La correlazione negativa che si osserva tra flusso e velocità del vento è conseguenza del confinamento del gas nel suolo causato da venti più forti.

Tab. 7.5. Correlazioni tra flusso di CO₂ e parametri ambientali

Variabile	CO2 soil flux	Air R H %	Air T °C	Bar_Pr HPa	Soil T °C	Soil W %	W Dir °N	W Speed m/s
CO2 soil flux	1,00	0,19	-0,04	0,13	0,11	0,30	-0,01	-0,29
Air R H %	0,19	1,00	-0,41	0,05	-0,13	0,22	-0,17	-0,21
Air T °C	-0,04	-0,41	1,00	-0,22	0,78	-0,63	0,07	-0,01
Bar_Pr HPa	0,13	0,05	-0,22	1,00	-0,09	0,06	-0,07	-0,31
Soil T °C	0,11	-0,13	0,78	-0,09	1,00	-0,69	-0,04	-0,13
Soil W %	0,30	0,22	-0,63	0,06	-0,69	1,00	0,03	0,14
W Dir °N	-0,01	-0,17	0,07	-0,07	-0,04	0,03	1,00	0,07
W Speed m/s	-0,29	-0,21	-0,01	-0,31	-0,13	0,14	0,07	1,00

Le correlazioni marcate in rosso sono significative a livello $p < 0,05$

Allo scopo di distinguere il contributo endogeno da quello ambientale, è stato eseguito un trattamento statistico dei dati della stazione applicando una Regressione sui Componenti Principali con metodo *stepwise* in avanti dei dati. Come descritto in precedenza, questa regressione si compone in due fasi: una prima in cui i dati ambientali, tramite l'analisi dei Componenti Principali (PCA), vengono sostituiti con variabili artificiali indipendenti (fattori) che conservano il maggior quantitativo di varianza del set di dati ambientali di partenza; una seconda in cui si opera una regressione *stepwise* della variabile flusso di CO₂ sui fattori selezionando quelli che, in minor numero, possono spiegare la massima variabilità del flusso.

Tab. 7.6. Riepilogo della regressione *stepwise* in avanti del flusso di CO₂ dal suolo sulla base dei fattori della PCA.

N=9288		R= ,58569182 R ² = ,34303491 R ² Aggiustato= ,34282262 F(3,9284)=1615,9 p<0,0000 Err.Standard di stima: 78,712				
	Beta	Err.Std. di Beta	B	Err.Std. di B	t(9284)	p-level
Intercetta			412,3165	0,816732	504,8372	0,00
FATTOR6	0,489385	0,008412	47,5321	0,817033	58,1765	0,00
FATTOR2	-0,244349	0,008412	-23,7194	0,816577	-29,0474	0,00
FATTOR7	-0,209376	0,008412	-20,3249	0,816591	-24,8900	0,00

Dalla Tab. 7.6 si evince che il modello previsto del flusso di CO₂ sulla base delle variazioni dei parametri ambientali spiega il 34% della varianza del flusso (R²) ed è dato dalla combinazione lineare:

$$\Phi_{CO_2} = 412,3 + 47,5 \times \text{Fatt6} - 23,7 \times \text{Fatt2} - 20,3 \times \text{Fatt7}$$

In Fig. 7.9 si mostra il confronto tra valori osservati e valori previsti del flusso di CO₂ dal suolo. In Fig. 7.10 sono invece mostrate le variazioni nel tempo dei residui standardizzati tra flussi osservati e flussi previsti.

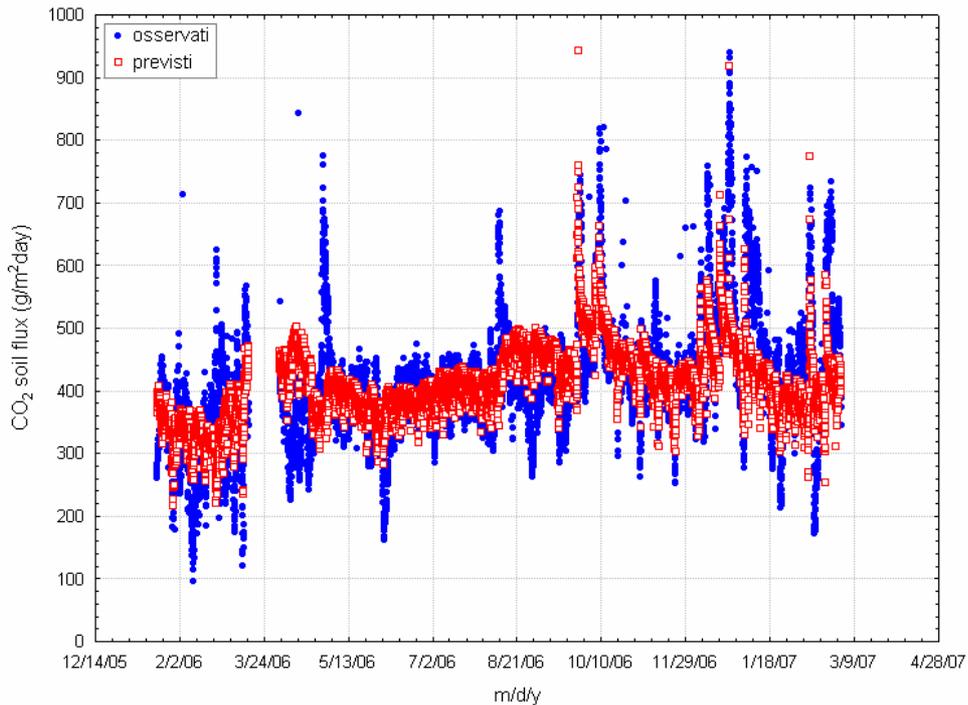


Fig. 7.9. Confronto tra misure di flusso di CO₂ dal suolo registrate dalla stazione automatica a Vulcano Porto (indicatori blu) e modello della variazione del flusso prevista in base ai soli parametri ambientali.

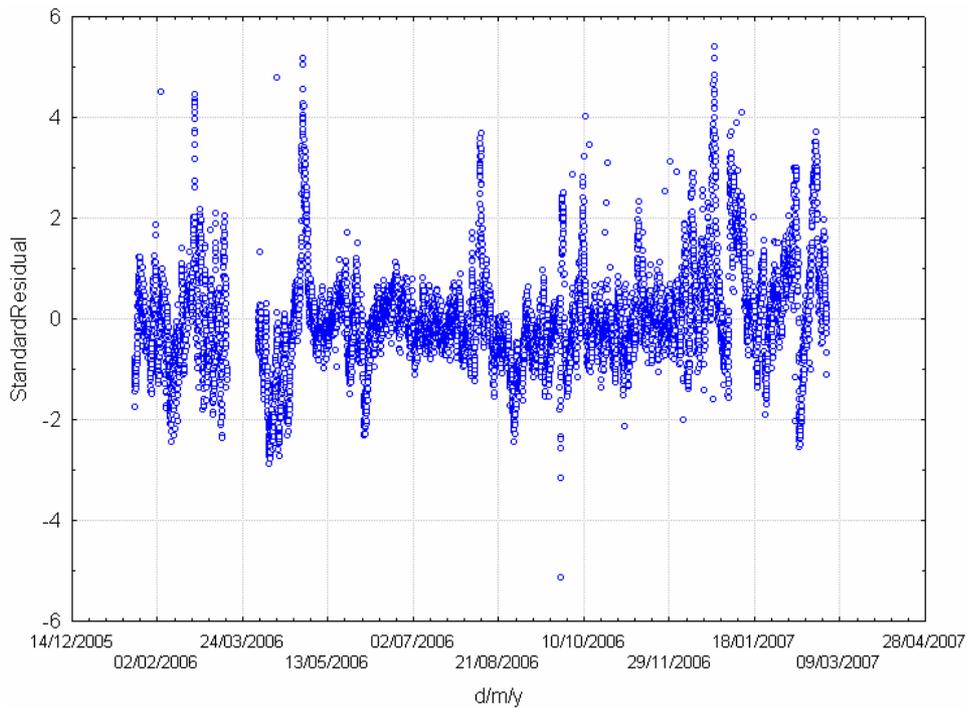


Fig. 7.10. Variazioni dei residui standardizzati tra flussi misurati e flussi previsti nell'intervallo di registrazione della stazione automatica.

Poiché i residui standardizzati sono la sottrazione del contributo ambientale ai flussi misurati dalla stazione, essi individuano quella parte delle variazioni di flusso che è legata alle variazioni nella dinamica del vulcano. Si possono notare alcuni picchi superiori a $\pm 1\sigma$

o $\pm 2\sigma$ ed è su quelli che verterà la prosecuzione dello studio cercando di correlarli con i parametri sismici registrati nello stesso periodo, in particolare la microsismicità, i cui dati sono stati richiesti all'INGV-Catania.

7.3. Le campagne geochimiche alla spiaggia di Levante

La spiaggia di Levante è un'altra area di degassamento dal suolo nota per la presenza di attività solfatarica con treni di bolle di gas gorgogliante visibili sulla sabbia e a mare e anomalie di temperatura del suolo. È infatti presente un acquifero molto superficiale nel quale i fluidi geotermici che risalgono dal profondo si disciolgono, portandolo alla T di ebollizione per la quota (100 °C), e parzialmente degassano verso la superficie.

7.3.1. Misure del flusso di CO₂ e H₂S dal suolo su maglia fissa

Nei periodi di crisi evidenziati da anomalie geochimiche di flusso di CO₂ dal suolo dell'area craterica e di concentrazione dei gas emessi dalle fumarole del cratere, sono state eseguite campagne specifiche di misura del flusso dal suolo anche alla spiaggia di Levante. È stata definita una maglia di punti di misura del flusso di CO₂ dal suolo a sviluppo rettangolare che segue la linea di costa per circa 175 m. L'area maggiormente anomala è quella più a S in prossimità della vasca di fango, e vi sono alcune minori zone di emissione anomala. Queste zone diventano più evidenti in periodi di crisi quando le anomalie si estendono (Fig. 7.11). Alla spiaggia di Levante è stato riscontrato lo stesso andamento temporale dei flussi al cratere (Fig. 7.11 e Tab. 7.7) Sono stati individuati due periodi di più intenso degassamento a dicembre 2004 e dicembre 2005 e periodi di degassamento più blando tra aprile e luglio 2005 e nei primi mesi del 2006 (Ricci, 2007).

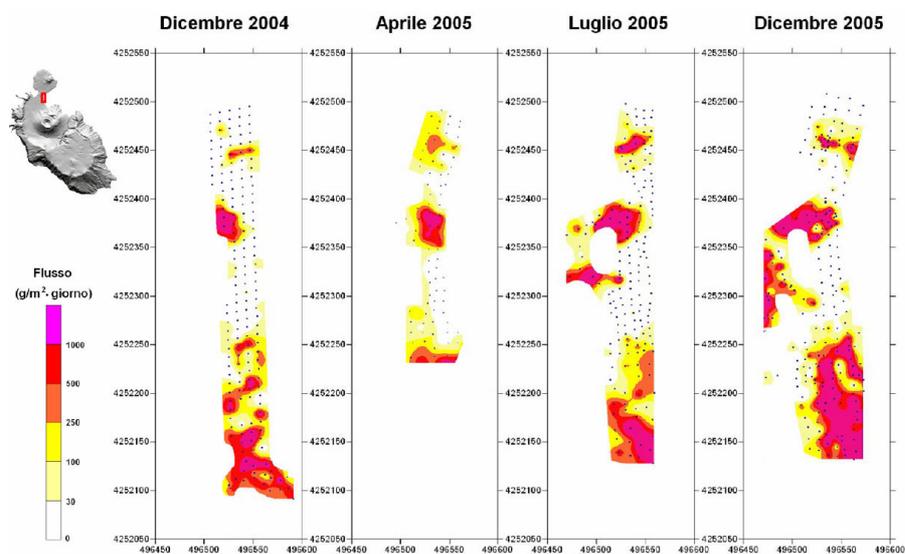


Fig. 7.11. Mappe del flusso diffuso di CO₂ dal suolo alla spiaggia di Levante misurato da dicembre 2004 a dicembre 2005.

Tab. 7.7. Variazioni del flusso totale di CO₂ misurato alla spiaggia di Levante nel periodo di crisi da dicembre 2004 a dicembre 2005, e nel maggio 2007.

Data	Area m ²	Flusso tot. ton/giorno	Mis
Dic.2004	15.800	5,2	175
Apr.2005	7900	1,6	84
Lug.2005	15.450	14	178
Dic.2005	19.850	21,1	226
Mag.2007	17.700	12,7	120

In Fig. 7.12 si mostrano le mappe del flusso di CO₂ e H₂S e della temperatura della spiaggia di Levante elaborate sulla base dei dati raccolti durante la campagna multidisciplinare di maggio 2007. Si vede come il settore meridionale, quello circostante il Faraglione, è la zona di più forte anomalia di degassamento e di temperatura che raggiunge anche i 100 °C. Questa zona corrisponde alla risalita di fluidi caldi che vi originano piccole fumarole.

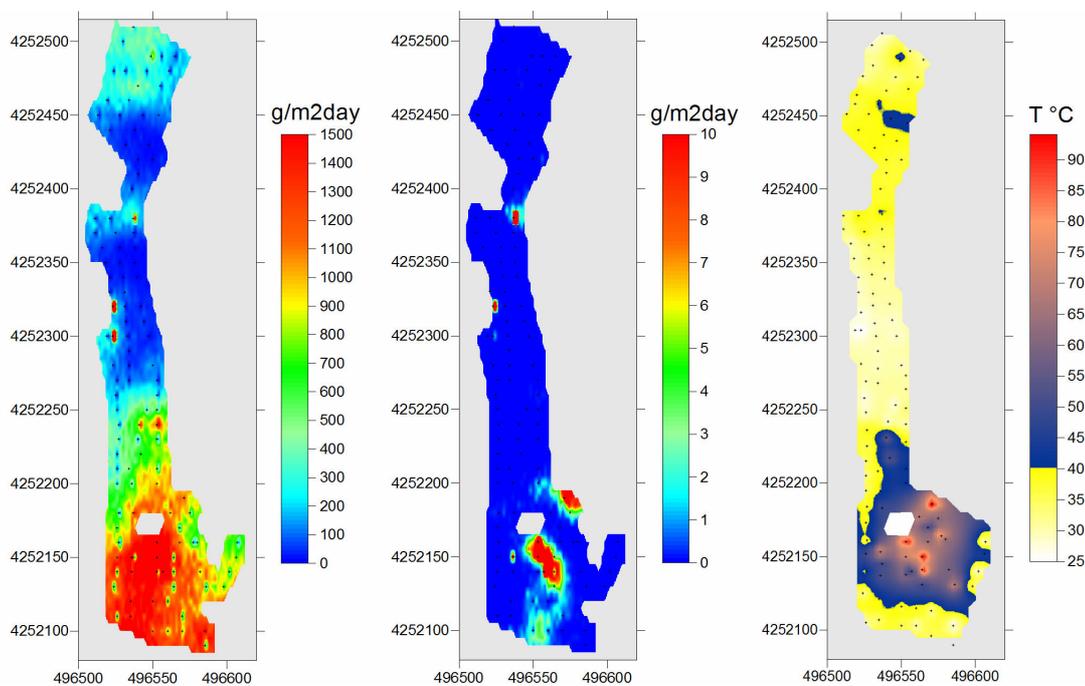


Fig. 7.12. Mappa del flusso diffuso di CO₂ (a sinistra) e di H₂S dal suolo (al centro) e della temperatura del suolo (a destra) misurati alla spiaggia di Levante nel maggio 2007. Rombo grigio: pozza per la fango-terapia.

Dalle misure eseguite è stato possibile calcolare un flusso diffuso totale di CO₂ pari a 12,7 ton/giorno ed un flusso di H₂S pari a 13,1 kg/giorno.

7.3.2. Le misure di flusso viscoso

Alla spiaggia di Levante sono presenti numerosi settori caratterizzati da emissione fumarolica di gas. Per la stima del flusso viscoso da questi punti, visibili come treni di

bolle di gas gorgoglianti dall'acqua, sono state eseguite sia sulla terraferma che a mare misure con la tecnica del contatore volumetrico (Fig. 7.13). Sono stati misurati i flussi di 20 punti di emissione trovando valori variabili da 0,4 a 32 l/min, con valore medio di 11 l/min e si è stimato un flusso totale di 0,95 ton/giorno di CO₂ e 16,5 kg/giorno di H₂S.



Fig. 7.13. Immagine del sistema di misura di flussi viscosi utilizzato a Vulcano nel maggio 2007.

Sommando i contributi del flusso diffuso e di quello viscoso misurati a maggio 2007, si ottiene per la spiaggia di Levante un flusso totale di CO₂ di 13,7 ton/giorno, e di H₂S di 29,5 kg/giorno.

7.3.3. Le misure di concentrazione in aria di CO₂ e H₂S con TDL

Le concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S sono state misurate lungo 6 profili con la tecnica del TDL: due nel settore del laghetto; due sopra la pozza della fango-terapia; due alla base del faraglione (Fig. 7.14), cioè in tutte quelle zone maggiormente frequentate da turisti che vi stazionano anche qualche ora.

In Tab. 7.2 sono mostrati i risultati principali ottenuti. Si può vedere come la concentrazione di CO₂ sia sempre prossima o poco superiore alla concentrazione media dell'atmosfera terrestre (330 ppm). L'H₂S invece raggiunge concentrazioni massime e medie al di sopra della soglia del TWA e dello STEL in tre dei sei profili alla spiaggia (profili 3,4 e 6 di Tab. 7.2; profilo3 in Fig. 7.14), ed in particolare in quelli dove la densità di turisti è particolarmente alta in estate cioè in prossimità della vasca di fango. Considerando che il TDL esegue una misura di concentrazione media su un percorso di parecchi metri (da 19 a 33 m nel caso dei profili suddetti), è chiaro che esistono porzioni

dove le concentrazioni di CO₂ e H₂S sono sicuramente ben più alte e possono quindi raggiungere condizioni di tossicità. Alla luce dei risultati ottenuti, sarebbe auspicabile dotare lo stabilimento termale di appositi rilevatori di gas CO₂ e H₂S in atmosfera e limitare la permanenza nella vasca di fango a pochi minuti.

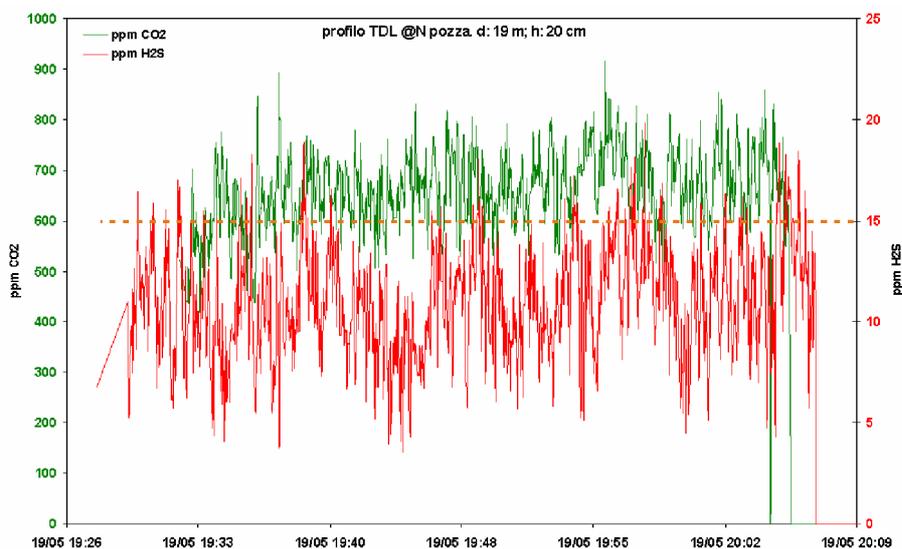


Fig. 7.14. Profilo TDL n. 3 di concentrazione in aria di CO₂ (linea verde; asse dei valori di sinistra) e di H₂S (linea rossa; asse di destra) alla spiaggia di Levante nel maggio 2007. Linea arancione a tratteggio: soglia STEL per l'H₂S.

7.4. Le misure geochimiche a Palizzi

A Palizzi (ubicato alla base del cratere della Fossa; Fig. 7.1), come al cratere e alla spiaggia di Levante, sono state ripetute campagne di misura del flusso di CO₂ dal suolo su un'area nota per l'emissione di gas freddi dal suolo, che ha talvolta causato la morte di piccoli animali, allo scopo di monitorare le variazioni nel tempo dell'emissione di gas in relazione allo stato di attività del vulcano durante le crisi del 2004 e 2005. Da dicembre 2004 a dicembre 2005 sono state eseguite quattro campagne di misura di flusso su aree sempre più ampie e con numero di misure via via maggiore, i cui risultati sono riportati in Tab. 7.8. Dal dicembre 2005 e nei successivi mesi fino ad aprile 2006, sono state condotte campagne di misura su una maglia regolare di punti (AT: Area Target) ubicati all'interno dell'area precedentemente investigata, allo scopo di ripetere misure sugli stessi punti in ogni prospezione evitando così i problemi connessi alle variazioni che si registrano nel flusso misurato anche a piccole distanze (Carapezza e Granieri, 2004), specialmente in aree caratterizzate da flussi elevati.

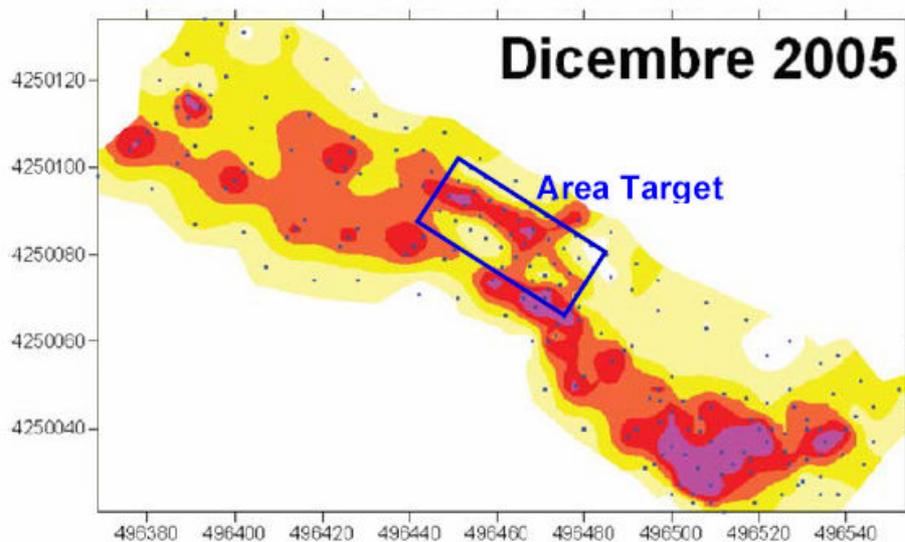


Fig. 7.15. Mappa della campagna più estesa di misura del flusso diffuso di CO₂ dal suolo di dicembre 2005 a Palizzi (da Ricci, 2007).

I flussi totali mostrati in Tab. 7.8 indicano che anche a Palizzi si sono verificati gli stessi andamenti come al cratere e alla spiaggia di Levante, con un periodo di più intenso degassamento nel dicembre 2005 (Fig. 7.15); la prospezione di dicembre 2004 è stata condotta su un'area più piccola ed il flusso calcolato risulta perciò non confrontabile. Le variazioni dei flussi di CO₂ dall'Area Target mostrano il ritorno a condizioni di normale degassamento dei periodi non di crisi.

Tab. 7.8. Variazioni del flusso di CO₂ dal suolo a Palizzi da dicembre 2004 a aprile 2006 (da Ricci, 2007).

	Area investigata m ²	Flusso totale t/giorno	Misure totali
Dicembre 2004	2.800	0,27	64
Maggio 2005	6.100	2,18	74
Luglio 2005	8.800	2,38	101
Dicembre 2005	8.700	2,72	217
Dicembre 2005 AT	432	0,212	40
Marzo 2006 AT	432	0,032	40
Aprile 2006 AT	432	0,017	40

AT: Area Target (vd. Fig. 7.5)

8. Conclusioni

I principali risultati ottenuti nelle ricerche geochimiche condotte nell'ambito di questa tesi sulle emissioni di gas endogeno dei Colli Albani e dell'Isola di Vulcano sono di seguito brevemente sintetizzati e ne vengono discusse sia le implicazioni scientifiche sia quelle relative alla loro pericolosità.

Colli Albani

La struttura profonda del complesso vulcanico dei Colli Albani è caratterizzata dalla presenza di un horst tagliato nelle rocce carbonatiche Mesozoiche, limitato da una serie di faglie dirette, lungo le quali si è sviluppata l'attività vulcanica più recente che ha prodotto una serie di crateri idromagmatici compresi quelli che ospitano i laghi di Albano e di Nemi. Evidenze stratigrafiche e geocronologiche (Funicello et al., 2002, 2003) hanno portato a ringiovanire l'attività del vulcano che, avendo prodotto eruzioni Oloceniche e fuoriuscite d'acqua dal lago Albano con generazione di lahar fino ad epoca Romana, deve essere considerato in uno stato quiescente. Questo è suggerito anche dai frequenti sciame di terremoti superficiali sotto il cratere Albano e da un recente sollevamento dell'edificio vulcanico (Chiarabba et al., 1997; Anzidei et al., 1998). Considerata la vicinanza di Roma, è ovviamente di grande importanza valutare il potenziale eruttivo del vulcano. I dati presentati in questa tesi e quelli pubblicati da Chiodini e Frondini (2001) e da Carapezza et al. (2003, 2005) mostrano che il complesso vulcanico dei Colli Albani è sede di un importante degassamento. La composizione isotopica indica che molto probabilmente si tratta di gas profondo di origine magmatica, considerato, in particolare, che i suoi valori $^3\text{He}/^4\text{He}$ sono uguali o perfino superiori a quelli misurati nelle inclusioni fluide dei fenocristalli delle vulcaniti albane. La geochimica dei gas fornisce quindi un ulteriore elemento a favore della presenza di un volume di magma degassante sotto i Colli Albani.

La mancanza di fumarole di alta temperatura e di sorgenti termali si può spiegare con l'assetto idrogeologico che favorisce una forte infiltrazione di acque meteoriche fredde che oscura ogni flusso di calore, conduttivo o convettivo, dal profondo. In effetti i gradienti geotermici misurati nella zona sono appena sopra il valore normale e lo slim-hole Falcognana 1, perforato nel 1990, ha trovato una temperatura di soli 41 °C a 610 m di profondità (ENEL, 1990).

Come avviene in alcune altre zone vulcaniche del Lazio, il tetto dei carbonati profondi è il sito preferenziale per l'accumulo di gas (Chiodini et al., 1995; Sabatelli & Mannari, 1999).

Da qui il gas (prevalentemente CO₂) sfugge verso la superficie lungo le faglie e durante la sua risalita si dissolve e si accumula fino alla saturazione in tutti gli acquiferi che incontra. La rassegna delle emissioni accidentali di gas da pozzi avvenute nell'area dei Colli Albani negli ultimi 20 anni, indica che questi acquiferi pressurizzati in gas si trovano a profondità diverse, da molto superficiali (10-15 m a Cava dei Selci, 27-30 m a Fiumicino, ~50 m a Valle Cupella e Via Vervio) fino a circa 200 m (pozzo 203) e sono ospitati sia in sedimenti superficiali (del delta del Tevere a Fiumicino), sia nella serie piroclastica (Cava dei Selci, Valle Cupella, Via Vervio) sia infine nella sottostante serie carbonatica. Questi incidenti e le emissioni di gas che avvengono in molte zone dei Colli Albani quando viene rimosso o attraversato da pozzi lo strato superficiale impermeabile, costituito quasi sempre da depositi da lahar recenti del Lago Albano, rivelano l'esistenza di una struttura degassante molto ampia che si estende fino alla costa tirrenica. Ne risulta una elevata pericolosità da gas connessa sia alle emissioni di CO₂ e H₂S da fratture, sia indotta da scavi e perforazioni. Prescrizioni tecniche preventive per ridurre il rischio da gas sono state suggerite alle autorità responsabili, ma gli incidenti avvenuti nel 2008 dimostrano che sono ancora poco applicate. Le emissioni principali di gas dell'area albana (Cava dei Selci, Solfiorata) sono state indagate per stimarne il flusso e valutarne la pericolosità. La manifestazione di gas più studiata è quella di Cava dei Selci, dove queste ricerche sono iniziate nel 2000 e sono continuate fino ad oggi (Carapezza et al., 2003, 2005, 2007; Carapezza & Tarchini, 2007). Lo scrivente ha partecipato a questi studi fin dalla sua tesi di laurea (2003). La ripetizione di misure del flusso di CO₂ dal suolo, sulla stessa maglia di punti fissi, ha permesso di accertare una forte diminuzione dell'emissione di CO₂ a Cava dei Selci (e anche a Santa Maria delle Mole) dal 2000 fino alla fine del 2004. È possibile che gli alti flussi di CO₂ misurati nel 2000 rappresentino la "coda" di un rilascio anomalo di gas, non quantificato, riportato nel 1995 a Cava dei Selci e in altre zone dei Colli Albani (Chiodini & Frondini, 2001) e messo in relazione con due eventi sismici avvenuti in aree vicine. Emissioni anomale di gas associate a terremoti sono riportate da molte cronache, recenti e antiche (Funicello et al., 2002). La diminuzione del flusso di CO₂ osservata dal 2000 al 2004 potrebbe riflettere una diminuzione della sovrappressione di gas nelle sorgenti profonde prodotta dal forte rilascio di gas causato dalla fratturazione sismica. O potrebbe riflettere, forse più probabilmente, un progressivo parziale sigillamento delle fratture per deposizione di calcite dalle acque circolanti, indotta da una diminuzione della P_{CO_2} in profondità. In questo caso, il nuovo aumento del flusso di CO₂ registrato a Cava dei Selci dalla fine del 2004 potrebbe riflettere un aumento della P_{CO_2} in profondità, favorito dal parziale

sigillamento della copertura. È interessante osservare che all'incirca nello stesso periodo di tempo (1997-2006) la quantità di CO₂ disciolta nelle acque profonde del Lago Albano si è ridotta di un ordine di grandezza (4187 contro 465 tonnellate). Questa riduzione può essere stata prodotta da almeno un rovesciamento delle acque del lago (Anzidei et al., 2008) ma potrebbe anche riflettere un processo di parziale sigillamento delle strutture degassanti presenti nel sottosuolo del lago. In ogni caso, nei sistemi vulcanici e geotermici agiscono spesso due fenomeni contrastanti che influenzano in maniera opposta il rilascio di gas: la sismicità che aumenta la permeabilità e quindi il flusso, e il self-sealing idrotermale delle fratture che ne riduce permeabilità e flusso (vedi Granieri et al., 2006 per considerazioni analoghe sul degassamento diffuso di CO₂ dalla Fossa a Vulcano).

Per controllare in continuo il tasso di emissione di CO₂ dal suolo di Cava dei Selci e per valutare le sue variazioni in relazione all'attività sismica dei Colli Albani, è in funzione dal 2003 una stazione automatica di misura in continuo del flusso di CO₂ e dei parametri ambientali che lo controllano. È stato mostrato come il processamento statistico dei dati consente di filtrare gli effetti delle variazioni ambientali e di riconoscere i valori di flusso dovuti all'emissione endogena del gas. Nessuna attività sismica di rilievo è avvenuta nel periodo di funzionamento della stazione che si spera verrà mantenuta in efficacia almeno fino al prossimo sciame sismico dei Colli Albani.

Un notevole passo avanti nella valutazione della pericolosità delle emissioni gassose dei Colli Albani (Cava dei Selci e Solforata) è stato compiuto nel 2007 misurando le concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S lungo profili, utilizzando una tecnica laser innovativa (TDL) mai impiegata prima in Italia. Il risultato più importante di queste misure è stata la scoperta che il gas più pericoloso che ha causato e causa la morte di animali di varia taglia nelle parti depresse delle strutture (anche di un uomo a Cava dei Selci) è l'H₂S e non la CO₂ come finora ritenuto. Gli studi confermano l'elevata pericolosità da gas delle due strutture che andrebbero meglio recintate per impedire l'accesso a persone e animali, anche apponendo opportuni cartelli di segnalazione del pericolo.

La zona di Cava dei Selci è quella che presenta il rischio più alto a causa della presenza di abitazioni vicine alla manifestazione, come dimostrano i risultati delle misure di concentrazione di CO₂ e H₂S indoor riportati in questa tesi. Un rischio minore, ma non da trascurare, è presente anche nel vicino complesso residenziale di Vigna Fiorita (Ciampino). Nel corso di questa tesi, uno sforzo importante di ricerca è stato fatto anche nello studio della geochimica del Lago Albano (e in misura minore di quello di Nemi) nel quale sono state realizzate varie campagne di misura dei parametri chimico-fisici, completate da

analisi dei campioni d'acqua prelevati a varie profondità. Una nuova batimetria di dettaglio ha mostrato che il lago è formato da vari crateri allineati NW-SE, coalescenti e in parte sovrapposti, il più recente e profondo (-165 m nel novembre 2005) dei quali è quello più meridionale (Anzidei et al., 2008). Il volume attuale del lago è di circa $447 \times 10^6 \text{ m}^3$, lontano dal volume necessario ($\sim 896 \times 10^6 \text{ m}^3$) per causare tracimazioni come quelle avvenute in epoca Romana, prima della realizzazione del tunnel di drenaggio (IV Sec. a.C.). In effetti il livello del lago è ben 79 m sotto il punto più basso del bordo craterico. La quantità totale di CO_2 disciolta nelle acque del lago è stata stimata nel maggio 2006 a 6846 tonnellate, molto lontana dalla saturazione. Una forte diminuzione (da 4187 a 465 tonnellate) nella CO_2 disciolta nelle acque del lago sotto -120 m, è stata osservata tra dicembre 1997 e maggio 2006 ed attribuita ad almeno un rovesciamento delle acque causato da piogge.

Vulcano

Si farà qui solo un breve riferimento alle campagne di misura del flusso diffuso di CO_2 dal suolo eseguite nell'area craterica della Fossa, essendo i principali risultati già stati pubblicati (Granieri et al., 2006). Per la prima volta, il degassamento diffuso di CO_2 dall'area craterica è stato indagato a cavallo di una delle ripetute "crisi" che episodicamente interessano il vulcano e che sono caratterizzate da aumenti della temperatura e del flusso delle fumarole crateriche e da cambiamenti nella composizione chimica e isotopica dei gas indicativi di un maggior apporto di fluidi magmatici. Le campagne hanno dimostrato che, durante queste crisi, alle consuete variazioni delle fumarole crateriche (aumento di T, CO_2 e He) si produce anche un forte aumento del degassamento diffuso di CO_2 che non può essere trascurato anche ai fini del rilascio totale di CO_2 . Il valore più alto di flusso di CO_2 , da un'area target di soli $500 \times 500 \text{ m}$, è stato trovato nel dicembre 2005 e ammontava a ben 700 ton/giorno.

Poiché in nessuna di queste crisi si è registrato alcun apprezzabile sollevamento del suolo, ma solo una debole sismicità, si è ritenuto che queste crisi non rappresentino episodi di unrest del vulcano. Cioè si pensa che il maggior degassamento non sia dovuto ad una risalita del magma verso la superficie, della quale non vi è alcuna evidenza, ma rifletta una depressurizzazione del magma causata dall'aumento di permeabilità per fratturazione sismica. La successiva diminuzione sarebbe invece causata da fenomeni di self-sealing delle fratture, per precipitazione di sublimati o minerali idrotermali (Granieri et al., 2006). Rimane da capire se la debole sismicità sotto il cratere è causata da ragioni tettoniche o da

una sovrappressione del gas accumulato in profondità. Da questa interpretazione consegue che le variazioni geochimiche riscontrate durante le crisi della Fossa non rappresentano precursori di una possibile eruzione imminente, ma sono l'espressione di variazioni di permeabilità con un sistema magmatico stazionario. Solo quando e se, a queste variazioni geochimiche si associasse un chiaro sollevamento dell'edificio, si potrà pensare a un degassamento per depressurizzazione di un magma in risalita e quindi a un vero fenomeno di unrest vulcanico.

Gli altri risultati, ancora inediti, ottenuti a Vulcano, riguardano la stima del degassamento diffuso e viscoso di CO₂ dall'area di Vulcano Porto e misure, outdoor e indoor, delle concentrazioni di CO₂ in aria.

Durante l'ultima crisi della Fossa nel 2005, un'estesa campagna di misura del flusso di CO₂ dal suolo è stata condotta sull'area alla base del vulcano che comprende l'abitato di Vulcano Porto. Il processamento dei dati ha dato un flusso totale di CO₂ di 97,5 ton/giorno da una superficie di 0,97 km². Si tratta di un valore notevole, considerato che si è lontani dalla zona craterica e che conferma il contributo significativo che il degassamento diffuso dà al rilascio di gas dai vulcani. Le zone di maggior emissione sono concentrate nell'abitato di Vulcano Porto che è quindi esposto a un pericolo da gas. Per valutare questa pericolosità sono state misurate con TDL le concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S lungo alcuni profili, eseguiti in particolare nelle zone più frequentemente visitate dai turisti (anche in area craterica). I risultati indicano che anche a Vulcano, come ai Colli Albani, almeno nelle zone ad aria aperta, il gas più pericoloso è l'H₂S che raggiunge più facilmente concentrazioni in aria dannose per la salute umana. È evidente da questi dati che alcune misure cautelative andrebbero prese almeno nella vasca di fango e nelle piccole fumarole vicine, dove i visitatori si trattengono spesso troppo a lungo. Anche in prossimità delle fumarole crateriche, la concentrazione in aria di H₂S è in alcuni punti pericolosa.

Concentrazioni pericolose di CO₂ in aria sono invece state trovate sia all'aperto che all'interno di numerosi locali a piano terra o scantinati di Vulcano Porto. Su 149 misure eseguite, il 5,76 % ha dato valori di concentrazione superiori alla soglia immediatamente mortale e ben il 27 % è risultato superiore alla soglia ammessa dalle norme internazionali (TWA). Si pone qui un delicato problema che dovrà essere affrontato dalla Protezione Civile, che è stata già informata di questi risultati.

In una delle zone di Vulcano Porto risultata più emissiva nella prospezione generale del 2005, è stata installata una stazione automatica di misura del flusso di CO₂ e dei parametri ambientali, che ha operato da gennaio 2006 a marzo 2007. Anche in questo caso il

processamento statistico dei dati ha consentito di riconoscere i flussi dovuti a degassamento endogeno filtrandoli dagli effetti delle variazioni meteorologiche e ambientali. Si sono registrate, nell'anno di funzionamento della stazione, forti variazioni del flusso endogeno di gas il cui significato non è chiaro. Si progetta di verificare nel prossimo futuro l'eventuale presenza di una correlazione tra flusso di CO₂ e sismicità.

A conclusione della tesi, ci sembra opportuno rimarcare la validità delle tecniche utilizzate: si conferma l'utilità delle camere d'accumulo sia portatili che automatiche per la misura del flusso di CO₂ dal suolo e l'importanza della raccolta dei dati ambientali e del loro processamento statistico insieme con i dati di flusso; gli strumenti TDL sono risultati preziosi per le misure delle concentrazioni in aria di CO₂ e H₂S, mentre per le misure indoor, anche per lunghi periodi continui, i Dräger X-am 7000 sono risultati molto affidabili; infine la sperimentazione di una grande camera d'accumulo galleggiante ha permesso di risolvere un problema finora trascurato, quello delle misure del flusso di gas da superfici d'acqua (vedi il laghetto della Solforata).

*“Dicono anzi che dappertutto c’è scritto; che loro leggono i fogli di roccia quando si sfalda, come un libro stampato: c’è scritta la storia del passare del tempo, e le lettere sono come depositate dal corso dei fiumi, delle alluvioni, delle lave dei grandi vulcani, dai millenni di vita delle foreste, dei deserti, dei mari. Loro dicono che è la cronaca di tutto quel che succede, e che tutto c’è scritto, anche se per chi non se ne intende non sembra scrittura. Ma a loro va proprio bene così.”**

Grazie a tutti coloro dai quali ho potuto imparare a “leggere”.

* E. Cavazzoni. Il poema dei lunatici. 2008 Ugo Guanda Editore S.p.A., Viale Solferino 28, Parma. Pag. 111.

BIBLIOGRAFIA

Acocella V., Funicello R., (2002) – *Transverse structures and volcanic activity along the Tyrrhenian margin of Central Italy*. Boll. Soc. Geol. It., Vol. spec. **1**, 739-747.

Allard P., Carbonelle J., Dajlevic D., Le Bronec J., Morel P., Robe M.C., Maurenas J.M., Faivre-Pierret R., Martin D., Sabroux J.C., Zettwoog P., (1991) – *Eruptive and diffuse emission of CO₂ from Mount Etna*. Nature, **351**, 387-391.

Amato A., Azzara R., Basili A., Chiarabba C., Cocco M., Di Bona M., Malagnini L., Scardella M., Selvaggi G., (1993) – *Lo sciame sismico dei Colli Albani del 1989-90*. Geol. Romana, **29**, 277-280.

Amato A., Chiarabba C., (1995a) – *Earthquake occurrence and crustal structure*. In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome*. 193-211.

Amato A., Chiarabba C., (1995b) – *Recent uplift of the Alban Hills Volcano (Italy): evidence for magmatic inflation?*. Geoph. Res. Letters, **22**, no.15, 1985-1988.

Amato A., Chiarabba C., Montone P., Buonasorte G., (1995) – *Active stress field in the geothermal areas of Latium and Tuscany*. World Geoth. Congress, 839-843.

Amato A., Chiarabba C., Cocco M., Di Bona M., Selvaggi G., (1994) – *The 1989-1990 seismic swarm in the Alban Hills volcanic area, central Italy*. J. Volc. Geoth. Res., **61**, 225-237.

Andretta D., Voltaggio M., (1988) – *La cronologia recente del vulcanismo dei Colli Albani*. Le Scienze, **41**, 26-36.

Anzidei, M., P. Baldi, G. Casula, A. Galvani, F. Riguzzi, A. Zanutta, (1998). *Evidence of active crustal deformation of the Colli Albani volcanic area (central Italy) by GPS surveys*. J. Volcanol. Geotherm. Res. **80**, 55-65.

Anzidei M., Carapezza M. L., Esposito A., Giordano G., Lelli M., Tarchini L., (2008). *The Albano Maar Lake high resolution bathymetry and dissolved CO₂ budget (Colli Albani volcano, Italy): constrains to hazard evaluation*. J. Volcanol. Geotherm Res., **171**, 258-268. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.11.024

Badalamenti B., Gurrieri S., Hauser S., Valenza M., (1988) – *Ground CO₂ output in the island of Vulcano during the period 1984-1988: gas hazard and volcanic activity surveillance implications*. Rend. Soc. It. Mineral. Petrol., Carapezza mem., vol. **43**, 893-899.

Baldi P., Ferrara G.C., (1974) – *Studio idrogeochimico delle manifestazioni dei Colli Albani*. Relazione T3/103-ENEL Centro di Ricerca Geotermica, pp. 25.

Barberi F., Carapezza M.L., (1994) – *Helium and CO₂ soil gas emission from Santorini (Greece)*. Bull. Volcan., **56**, 335-342.

Barberi F., Carapezza M. L., Ranaldi M., Tarchini L., (2007). *Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): induced hazard and evidence of deep CO₂ on the Thyrrhenian margin of Central Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **165**, 17-31, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.009.

Barberi F., Chelini G., Marinelli G., Martini M., (1993) – *The gas cloud of Lake Nyos (Cameroon, 1986): results of the Italian Technical Mission*. J. Volcan. Geoth. Res., **39**, 125-134.

Barberi F., Neri G., Valenza M., Villari L. (1991). *1987–1990 unrest at Vulcano*. Acta Vulcanol. **1**, 95–106.

Bartole R., Torelli L., Mattei G., Peis D., Brancolini G., (1991) – *Assetto stratigrafico-strutturale del Tirreno settentrionale: stato dell'arte*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1991/1, 115-140.

Baubron J.C., Mathieu R., Miele G., (1991) – *Measurements of gas flows from soils in volcanic areas: the accumulation method*. International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation, Napoli 1991. Abstract.

Baxter P., Tedesco D., Miele G., Baubron J.C., Cliff K., (1990) – *Health hazards of volcanic gases*. The Lancet, July 21, 176.

S.E. Beaubien, G. Ciotoli, S. Lombardi, (2003). *Carbon dioxide and radon gas hazard in the Alban Hills area (Central Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **123**, 63-80.

Bellotti, P., Milli S., Tortora P., Valeri P., (1995). *Physical stratigraphy and sedimentology of the Late Pleistocene-Holocene Tiber Delta depositional sequence*. Sedimentology **42**, 617-634.

Boni C., Bono P., Calderoni G., Lombardi S., Turi B., (1980) – *Indagine idrogeologica e geochemica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale della Pianura Pontina (Lazio meridionale)*. Geol. Appl. Idrogeol., **15**, 203-247.

Boni C., Bono P., Capelli G., Funicello R., Lombardi S., Parotto M., Rossi F.M., Ventura G., (1979) – *Lineamenti idrogeologici, idrologici e idrochimici della regione Albana: primi risultati della campagna 1977-1979*. Atti Seminario Informativo PFE-EG, CNR.

Boni C., Bono P., Lombardi S., Mastrorillo L., Percopo C., (1995) – *Hydrogeology, fluid geochemistry and thermalism*. In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome*. 221-242.

Capasso, G., Favara, R., Inguaggiato, S., (1997). *Chemical features and isotopic composition of gaseous manifestations on Vulcano Island (Aeolian Islands, Italy): an interpretative model of fluid circulation*. Geochim. Cosmochim. Acta **61**(16), 3425-3440.

Capelli G., Cecili A., De Rita D., Giordano G., Mazza R., (1998) – *La conoscenza idrogeologica del territorio quale presupposto alla gestione delle risorse idriche: il caso*

dei Colli Albani. Atti della giornata di studio “Uso e tutela delle acque sotterranee”, 109-162.

Capelli G., Mazza R., (2005) – *Water criticality in the Colli Albani (Rome, Italy)*. *Giorn. Geol. Appl.*, **1**, 261-271, doi: 10.1474/GGA.2005-01.0-26.0026.

Caputo C., Ciccacci S., D’Alessandro L., Davoli L., Fredi P., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Pugliese F., Raffi R., (1986). *Progetto “Lago Albano”. Indagini climatiche, geomorfologiche e sedimentologiche*. Provincia di Roma: 1-14.

Carapezza M.L., (1996) – *Soil gas investigation in volcanic areas*. In: Barberi F., Casale R. (eds) proceedings of the course: “*The mitigation of volcanic hazard*”. Vulcano, Italy, 12-18 June 1994, 403-438.

Carapezza M.L., Badalamenti B., Cavarra L., Scalzo A., (2003) – *Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani volcano (Cava de’ Selci, Roma)*. *J. Volc. Geoth. Res.*, **23**, 81-94.

Carapezza M.L., F. Barberi, L. Tarchini, L. Cavarra, D. Granieri (2005a). *Le emissioni gassose dell’area vulcanica dei Colli Albani*, in: *Ecosistema Roma*, Atti. Conv. Acc. Naz. Lincei, **218**, 229-242.

Carapezza M.L., Cavarra L., Scalzo A., (2000) – *Misura dell’emanazione gassosa in località Cava dei Selci*. Report to INGV and Dipartimento della Protezione Civile, pp 31.

Carapezza M. L., Cioni R., Guidi M., Lelli M., Tarchini L. (2005b). *Geochimica delle acque dei Laghi Albano e Nemi*, in: *Ecosistema Roma*, Atti. Conv. Acc. Naz. Lincei, **218**, 243-249.

Carapezza M.L., Granieri D., (2004) – *CO₂ soil flux at Vulcano (Italy): comparison between active and passive methods*. *Appl. Geochem.*, **19**, 73–88.

Carapezza M.L., Lelli M., Tarchini L., (2008a). *Geochemistry of the Albano and Nemi crater lakes in the volcanic district of Alban Hills (Rome, Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., (2008), doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.06.031

Carapezza M.L., Ricci T., Ranaldi M., Tarchini L., (2008b). *Active degassing structures of Stromboli and variation of the diffuse CO₂ output related to the volcanic activity*. J. Volcanol. Geotherm. Res., doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.08.006.

Carapezza M.L., Roscioni F.R., Tarchini L., (2007). *Diffuse degassing of carbon dioxide on the NW sector of Colli Albani volcanic complex (Rome, Italy)*. Water-Rock Interaction 12 Proc., Bullen and Wang eds., Rotterdam, Balkema.

Carapezza, M.L., Tarchini, L., (2007). *Geochemical evidence of huge magmatic degassing from the quiescent Alban Hills volcano (Rome, Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **165**, 5-16, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.04.008.

Castellarin A., Colacicchi R., Praturlon A., (1978) – *Fasi distensive, trascorrenze e sovrascorrimenti lungo la linea “Ancona-Anzio” dal Lias medio al Pliocene*. Geol. Rom., **17**, 161-189.

Chiarucci P., (1987). *Indagini sul Lago di Albano*. Documenta Albana, II Serie, **9**: 19-29.

Chiodini, G., Cardellini, C., Amato, A., Boschi, E., Caliro, S., Frondini, F., (2004). *Carbon dioxide Earth degassing and seismogenesis in Central and southern Italy*. Geophys. Res. Lett., **31**, doi: 10.1029/2004GL019480.

Chiodini G., Cioni R., Guidi M., Raco B., Marini L., (1998) – *Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas*. Appl. Geochem., **13**, 543-552.

Chiodini, G., Cioni M., Marini L., Panichi C. (1995). *Origin of the fumarolic fluids of Vulcano Island, Italy, and implications for the volcanic surveillance*, Bull. Volcanol., **57**, 99– 110.

Chiodini, G., Frondini, F., (2001). *Carbon dioxide degassing from the Albani Hills volcanic region, Central Italy*. Chem. Geol. **177**, 67–83.

Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Parello, F., Peruzzi, L., (2000). *Rate of diffuse carbon dioxide Earth degassing estimated from carbon balance of regional aquifers: the case of Central Apennine, Italy*. J. Geophys. Res. **105**, 8423-8434.

Chiodini, G., Frondini, F., Ponziani, F., (1995). *Deep structures and carbon dioxide degassing in Central Italy*. Geothermics, **24-1**, 81-94.

Chiodini, G., F. Frondini, and B. Raco (1996), *Diffuse emission of CO₂ from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy)*, Bull. Volcanol., **58**, 41– 50.

Cioni, R., M. Guidi, B. Raco, L. Marini, B. Gambardella, (2003). *Water chemistry of Lake Albano (Italy)*, J. Volcanol. Geotherm. Res. **120**, 179-195.

Chondrogianni C., Ariztegui D., Niessen F., Ohlendorf C., Lister G.S., (1996) – *Late Pleistocene and Holocene sedimentation in Lake Albano and Lake Nemi (Central Italy)*. Mem. Ist. di Idrobiologia, **55**, 23-38.

Clark I., (2001) – *Practical geostatistics*. Geostokos Ltd., Alloa Business Centre, Scotland.

Clements W.E., Wilkening M.H., (1974) – *Atmospheric pressure effects on ²²²Rn transport across the Earth-air interface*. J. Geophys. Res., **79**, 5025-5029.

Clocchiatti R., Gioncada A., Mosbah M., Sbrana A. (1994). *Possible deep origin of sulphur output at Vulcano (Southern Italy) in the light of melt inclusion studies*. Acta Vulcanol., **5**, 49– 53.

De Benedetti A.A., Funicello R., Giordano G., Diano G., Caprilli E., Paterne M. (2008). *Volcanology, history and myths of the Lake Albano maar (Colli Albani volcano, Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **176**, 387-406, doi:[10.1016/j.jvolgeores.2008.01.035](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.01.035).

De Jong E., Schappert H.J.V., (1972) – *Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profiles in the soil.* Sci., **113-5**, 328-333.

De Rita D., Bertagnini A., Carboni M.G., Ciccacci S., Di Filippo M., Faccenna C., Fredi P., Funciello R., Landi P., Sciacca P., Vannucci N., Zarlenga F., (1994)- *Geological-petrological evolution of the Ceriti mountains area (Latium, central Italy).* Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **49**, 291-322.

De Rita D., Faccenna C., Funciello R., Rosa C., (1995a) – *Stratigraphy and volcano-tectonics.* In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome.* 33-71.

De Rita D., Funciello R., Parotto M., (1988) – *Carta geologica del Complesso vulcanico dei Colli Albani.* CNR, Roma.

De Rita D., Giordano G., Esposito A., Fabbri M., Rodani S., (2002) – *Large volume phreatomagmatic ignimbrites from the Colli Albani volcano (Middle Pleistocene, Italy).* J. Volc. Geoth. Res., **118**, 77-98.

De Rita D., Giordano G., Rosa C., Sheridan R., (1995b) – *Volcanic hazard at the Alban Hills and computer simulation.* In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome.* 267-285.

De Rita D., Narcisi B.M., (1983). *I prodotti dell'attività esplosiva di Nemi (Colli Albani, Roma). I caratteri deposizionali dell'unità piroclastica intermedia.* Rend. Soc. Geol. It., **6**: 17-20.

Di Filippo M., Toro B., (1995) – *Gravity features.* In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome.* 213-219.

Edner, H., S. Ragnarson, S. Svanberg, E. Wallinder, R. Ferrera, R. Cioni, B. Raco, and G. Taddeucci, (1994). *Total fluxes of sulfur dioxide from the Italian Volcanoes Etna, Stromboli and Vulcano measured by differential absorption lidar and passive differential optical absorption spectroscopy,* J. Geophys. Res., **99**, 18,827– 18,838.

Ellam, R. M., Hawkesworth, C. J., Menzies, M. A., Rogers, N.W., (1989). *The volcanism of Southern Italy: role of subduction and relationship between potassic and sodic alkaline magmatism*. J. Geophys. Res. **94**, 4589-4601.

Elwood, N.T.W, Albertano, P., (2005). *A seasonal survey of the water quality and phytoplankton dynamics of Lake Albano*. In: Ecosistema Roma, Atti. Conv. Acc. Naz. Lincei, **218**, 243-249.

ENEL D.P.T., (1990). *Esplorazione geotermica nel P.R. Colli Albani*. Internal report, Pisa, pp. 54.

Faccenna C., Funicello R., Bruni A., Mattei M., Sagnotti L., (1994a) – *Evolution of a transfer-related basin: the Ardea basin (Latium, Central Italy)*. Basin Res., **6**, 35-46.

Faccenna C., Funicello R., Marra F., (1994b) – *Inquadramento geologico-strutturale dell'area romana*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **50**, 32-47.

Faccenna C., Funicello R., Montone P., Parotto M., Voltaggio M., (1994c) – *An example of Late Pleistocene strike-slip tectonics: the Acque Albule basin (Tivoli, Latium)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **49**, 37-50.

Federico, C., Aiuppa, A., Allard, P., Bellomo, S., Jean-Baptiste, P., Parello, F., Valenza, M., (2002). *Magma-derived gas influx and water-rock interactions in the volcanic aquifer of Mt. Vesuvius, Italy*. Geochim. Cosmochim. Acta **66-6**, 963–981.

Fornaseri M., Scherillo A., Ventriglia U., (1963) – *La regione vulcanica dei Colli Albani*. Vulcano Laziale, CNR, Roma.

Freda, C., M. Gaeta, D. Karner, F. Marra, P.R. Renne, J. Taddeucci, P. Scarlato, J.N. Christensen, L. Dallai, (2006). *Eruptive history and petrologic evolution of the Albano multiple maar (Alban Hills, Central Italy)*, Bull. Volcanol. **68**, 6, 567-591.

Funiciello R., Giordano G., De Rita D., (2003) – *The Albano maar lake (Colli Albani volcano, Italy): history of a pre-Roman age killer lake*. J. Volcanol. Geotherm. Res., **123**, 43-61.

Funiciello R., Locardi E., Parotto M., (1976) – *Lineamenti geologici dell'area sabatina orientale*. Boll. Soc. Geol. It., **95**, 831-849.

Funiciello R., Mattei M., Voltaggio M., (1992) – *Recent strike-slip faulting and problems of possible reactivation in Rome area*. In: Boschi E., Dragoni M. (Eds.), *Earthquake prediction*, 225-236.

Funiciello, R., Giordano, G., De Rita, D., Carapezza, M. L., Barberi, F., (2002). *L'attività recente del cratere del Lago Albano di Castelgandolfo*, Rend. Acc. Naz. Lincei 9-13 (2002) 113-143.

Galle, B., M. Edmonds, A. Geyer, and R. Herd, (2002). *A novel spectroscopic system for continuous measurements of volcanic SO₂ emissions with high time resolution, Montagne Pele'e 1902 – 2002*, paper presented at Explosive Volcanism in Subduction Zones, IAVCEI Conference, Saint Pierre, Martinique, 12– 16 May 2002.

Gambardella, B., Cardellini C., Chiodini, G., Frondini, F., Marini, L., Ottonello, G., Vetuschi Zoccolino, M., (2004). *Fluxes of deep CO₂ in the volcanic areas of central-southern Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res. **136**, 31-52.

Gasparini C., Funiciello R., Montone P., Parotto M., Salvini F., (1991) – *Il campo di fratturazione superficiale dei Colli Albani(Roma): implicazioni per un modello sismotettonico dell'area*. In: Aree sismogenetiche e rischio sismico in Italia- II, Il Cigno edizioni, 251-258.

Gasperini, D., Blichert-Toft, J., Bosch, D., Del Moro, A., Macera, P., Albarède, F., (2002). *Upwelling of deep mantle material through a plate window: evidence from the geochemistry of Italian basaltic volcanics*. J. Geophys. Res., **107**, 2367.

Gerlach T.M.J., Graeber E.J., (1985) – *Volatile budget of Kilauea volcano*. Nature, **313**, 273-277.

Giammanco S., Gurrieri S., Valenza M., (1998) – *Anomalous soil CO₂ degassing in relation to faults and eruptive fissures on Mount Etna (Sicily, Italy)*. Bull. Volcanol., **60**, 252-259.

Giggenbach, W.F., (1975). A simple method for the collection and analysis of volcanic gas samples. Bull. Volocanol. **39**, 132–145.

Giggenbach W.F., Minissale A.A., Scandiffio G., (1988) – *Isotopic and chemical assessment of geothermal potential of the Colli Albani area, Latium region, Italy*. Appl. Geochem., **3**, 475-486.

Gioncada A., Clocchiatti R., Sbrana A., Bottazzi P., Massare D. (1998). *A study of melt inclusions at Vulcano, Aeolian islands, Italy: Insight on the primitive magmas and on the volcanic feeding system*, Bull. Volcanol., **60**, 286– 306.

Gioncada A., Mazzuoli R., Bisson M., Pareschi M.T. (2003). *Petrology of volcanic products younger than 42 ka on the Lipari-Vulcano complex (Aeolian Islands, Italy): an example of volcanism controlled by tectonics*. J Volcanol Geotherm Res **122**:191-220.

Giordano, G., A. De Benedetti, A. Diana, G. Diano, F. Gaudioso, F. Marasco, M. Miceli, S. Mollo, R.A.F. Cas, R. Funiciello, (2006). *The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy): stratigraphy, structure and petrology*, J. Volcanol. Geotherm. Res. Sp. Iss. “Explosive mafic volcanism”, **155**, 49-80.

Giordano G., Mazza R., Cecili A., Capelli G., De Rita D., Bigi G., Rodani S., (2000) – *GIS for groundwater management in cities on volcanoes: example from the Colli Albani region ,Rome, Italy*. Journ. of Nepal Geol. Soc., **22**, 315-326.

Granieri, D., M. L. Carapezza, G. Chiodini, R. Avino, S. Caliro, M. Ranaldi, T. Ricci, L. Tarchini (2006). *Correlated increase in CO₂ fumarolic content and diffuse emission from La Fossa crater (Vulcano, Italy): Evidence of volcanic unrest or increasing gas release from a stationary deep magma body?.* Geophys. Res. Lett., **33**, L13316, doi:10.1029/2006GL026460.

Granieri, D., Chiodini, G., Marzocchi, W., Avino, R., (2003). *Continuous monitoring of CO₂ soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): influence of environmental and volcanic parameters*. Earth Planet. Sci. Lett. **212**, 167-179.

Gurrieri S., Valenza M., (1988) – *Gas transport in natural porous mediums: a method for measuring CO₂ flows from the ground in volcanic and geothermal areas*. Rend. Soc. Ital. Mineral. Petrol., **43**, 1151-1158.

Hooker, P.J., Bertrami, R., Lombardi, S., O’Nions, R.K., Oxbourgh, E.R., (1985). *Helium-3 anomalies and crust-mantle interaction in Italy*. Geochim. Cosmochim. Acta **49**, 2505-2513.

Iulius Obsequens – *Prodigiorum liber*.

Kucera C.D., Kirkham D.R., (1971) – *Soil respiration studies in tallgrass ...?.. in Missouri*. Ecology, **52**, 912-928.

Le Guern F., Tazieff H., Faivre-Pierret R., (1982) – *An example of health hazard: people killed by gas during a phreatic eruption; Dieng plateau, Java, February 20, 1979*. Bull. Volcanol., **45**, 153-156.

Mariani M., Prato R., (1988) – *I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismico-stratigrafico*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 519-533.

Mariucci, M.T., Pierdominici S., Pizzino L., Marra F., Montone P., (2008). *Looking into a volcanic area: An overview on the 350 m scientific drilling at Colli Albani (Rome, Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., doi: 10.1016/j.volgeores.2008.04.007.

Marra F., (2001) – *Strike-slip faulting and block-rotation: a possible triggering mechanism for lava flows in the Alban Hills?* Journ. of Struct. Geol. **23**, 127-141.

Martelli, M., Nuccio, P.M., Stuart, F.M., Burgess, R., Ellam, R.M., Italiano, F., (2004). *Helium-Strontium isotope constraints on mantle evolution beneath the Roman Comagmatic Province, Italy*. Earth Planet. Sci. Lett. **224**, 295-308.

Martini M., Giannini L., Prati F., Tassi F., Capaccioni B., Iozzelli P., (1994) – *Chemical characters of crater lakes in the Azores and Italy: the anomaly of Lake Albano*. Geoch. Journ., **28**, 173-184.

Mattei M., Funicello R., Kissel C., Laj C., (1991) – *Rotazione di blocchi cristallini neogenici nell'Appennino centrale: analisi paleomagnetica e di anisotropia della suscettività magnetica (AMS)*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1991/2, CROP 11, 221-229.

McGonigle, A. J. S., C. Oppenheimer, B. Galle, T. A. Mather, and D. M. Pyle, (2002). *Walking traverse and scanning DOAS measurements of volcanic gas emission rates*, Geophys. Res. Lett., **29**(20), 1985, doi:10.1029/2002GL015827.

Minissale, A., Evans, W.C., Magro, G., Vaselli, O., (1997). *Multiple source components in gas manifestations from north-central Italy*. Chem. Geol. **142**, 175-192.

Montone P., C., Amato A., Chiarabba Buonasorte G., Fiordelisi A., (1995) – *Evidence of active extension in Quaternary volcanoes of Central Italy from breakout analysis and seismicity*. Geoph. Res. Letters, **22**, no.14, 1909-1912.

Nehring N.L., Truesdell A.H., (1978) – *Hydrocarbon gases in some volcanic and geothermal systems*. Geoth. Resources Council Trans., **2**, 483-486.

Orosius – *Historiarum adversus paganum*.

Pan, V., Holloway, J.R., Hervig, R.L., (1991). *The pressure and temperature dependence of carbon dioxide solubility in tholeiitic basalt melts*. Geochim. Cosmochim. Acta **55**, 1587–1595.

Panichi C., Tongiorgi E., (1975) – *Carbon isotopic composition of CO₂ from springs, fumaroles, mofettes and travertines of Central and Southern Italy: a preliminary prospection method of geothermal areas*. 2nd UN Symp. on Devel. and Use Geoth. Res., San Francisco, 815-825.

Pannatier I., (1996). *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, The Netherlands.

Pantosti D., Velonà M., (1991) – *Parametri geologici di input per la microzonazione: i caratteri della fratturazione superficiale della città di Roma*. In: *Aree sismogenetiche e rischio sismico in Italia- II*, Il Cigno edizioni, 237-249.

Papale, P., Moretti, R., Barbato, D., (2006). *The compositional dependence of the multicomponent volatile saturation surface in silicate melts*. *Chem. Geol.*, **229**: 78-95.

Parello, F., Allard, P., D'Alessandro, W., Federico, C., Jean-Baptiste, P., Catani, O., (2000). *Isotope geochemistry of Pantelleria volcanic fluids, Sicily Channel rift: a mantle volatile end-member for volcanism in southern Europe*. *Earth Planet. Sci. Lett.* **180**, 325-339.

Parkinson K.J., (1981) – *An improved method for measuring soil respiration on the field*. *J. Appl. Ecol.*, **18**, 221-228.

Parotto M., Praturlon A., (1975) – *Geological summary of Central Apennines*. In: *Structural model of Italy*, *Quad. Ric. Sc.*, **90**, 257-331.

Peccerillo A., Federico M., Barbieri M., Buccianti A., Wu T. W., (2002) – *Geochemical and mineralogical effects of the interaction between ultrapotassic magmas and carbonate wall rocks in the Alban Hills volcano, Central Italy: mineral chemistry, geochemical and isotopic (Sr, Nd, O) evidence from ejecta*. In stampa, 29 pp., 12 figg., 4 tabb.

Peccerillo, A., Panza, G.F., (1999). *Upper mantle domains beneath Central-Southern Italy: petrological, geochemical and geophysical constraints*. *Pure Appl. Geophys.* **156**, 421-443.

Pizzino L., Galli G., Mancini M., Quattrocchi F., Scarlato P., (2002) – *Natural Gas Hazard (CO₂, ²²²Rn) within a quiescent volcanic region and its relation with tectonics: the case of the Ciampino-Marino area, Alban Hills volcano, Italy*. *Natural Hazard*, **00**, 1-35.

Plinius – *Naturalis historia*.

Quattrocchi F., Pizzino L., Guerra M., Scarlato P., (1998) – *Geochemical Hazard of the Colli Albani quiescent volcano: CO₂ and ²²²Rn surveillance in Ciampino-Marino-Rocca di Papa area*. Proc. Int. Symp. “*Cities on Volcanoes*”, Rome-Naples, 1998, pp. 114.

Quattrocchi F., Venanzi V., (1989) – *Sulla scelta di un sito per il monitoraggio di parametri idrogeochimici per lo studio di premonitori sismici nell’area dei Colli Albani*. Proc. VIII Convegno GNGTS 1989, CNR Roma, 259-266.

Reiners W.A., (1968) – *Carbon dioxide evolution from three Minnesota forests*. Ecology, **49**, 471-483.

Ricci T., (2007). *Studio del degassamento diffuso di CO₂ e indagini geofisiche a finalità idrogeologica nei vulcani attivi di Stromboli e de La Fossa di Vulcano: variazioni temporali e loro significato vulcanologico, implicazioni strutturali, per il monitoraggio geochimico e per la pericolosità da gas*. Tesi di Dottorato in Geodinamica XIX Ciclo, Università degli Studi Roma Tre, Roma.

Rice, A., (2000). *Rollover in volcanic crater lakes: a possible cause for Lake Nyos type disaster*, J. Volcanol. Geotherm. Res. **97**, 233-239.

Rogie, J.D., Kerrick, D.M., Sorey, M.L., Chiodini, G., Galloway, D.L., (2001). *Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California*. Earth Planet Sci Lett **188**, 535–541.

Sabatelli, F., Mannari, M., (1995). *Latera development update*. World Geotherm. Congress, Florence, Italy, 1785-789.

Sabatini V., (1900) – *I vulcani dell’Italia centrale e i loro prodotti. Parte prima: Vulcano Laziale*. Mem. Descr. Carta Geol. d’It., **10**, pp 392.

S. Salvi, S. Atzori, C. Tolomei, J. Allievi, A. Ferretti, F. Rocca, C. Prati, S. Stramondo, N. Feuillet, (2004). *Inflation rate of the Colli Albani volcanic complex retrieved by the permanent scatterers SAR interferometry technique*. Geophys. Res Lett., **31**, L12606, doi:10.1029/2004GL020253.

Salvini F., (1991) – *Tettonica a blocchi in settori crostali superficiali: modellizzazione ed esempi di dati strutturali in Appennino centrale*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1991/2, CROP 11, 237-247.

Serri G., Innocenti F., Manetti P., Tonarini S., Ferrara G., (1991) – *Il magmatismo neogenico-quadernario dell'area tosco-laziale-umbra: implicazioni sui modelli di evoluzione geodinamica dell'Appennino settentrionale*. Studi Geol. Camerti, Vol. Spec. 1991/2, CROP 11, 371-373.

Sicardi L. (1941). Il recente ciclo dell'attività fumarolica dell'isola di Vulcano. *Bull. Vulcanol.* 7, 85-140.

Sigvaldason G.E., (1989) – *International Conference on Lake Nyos disaster; Yaoundè, Cameroun 16-20 March, 1987: Conclusions and Recommendation*. J. Volcan. Geoth. Res., 39, 97-107.

Sinclair, A.J., (1974). *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*. J. Geochem. Expl., 3: 129 -149.

Soligo M., Tuccimei P., Giordano G., Funicello R., De Rita D., (2002) – *New U-series dating of a carbonate level underlying the Peperino Albano phreatomagmatic ignimbrite (Colli Albani, Italy)*. Il Quaternario (It. J. Quat. Sci.), in stampa.

Stoiber, R. E., L. L. Malinconico Jr., and S. N. Williams, (2002). *Use of the Correlation Spectrometer at volcanoes*, in *Forecasting volcanic events*, edited by H. Tazieff and J. C. Sabroux, Elsevier, Amsterdam, pp. 425–444.

Stolper E., Holloway J.R., (1988) – *Experimental determinations of the solubility of carbon dioxide in molten basalts at low pressures*. Earth Planet. Sci. Lett., 87, 397-408.

Tedesco D., (1997) – *Systematic variations in the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratio and Carbon of fumarolic fluids from active volcanic areas in Italy: evidence for radiogenic ^4He and crustal Carbon addition by the subducting African plate?* Earth Planet. Sci. Lett., 151, 255-269.

Tedesco, D., Allard, P., Sano, Y., Wakita, H., Pece, R., (1990). *Helium-3 in subaerial and submarine fumaroles of Campi Flegrei caldera, Italy*. *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 1105-1116.

Titus Livius – *Ab Urbe condita libri qui supersunt/ omnium librorum periochae*.

Tonani B., Miele G., (1991) – *Methods for measuring flow of carbon dioxide through soils in the volcanic settings*. International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation, Napoli 1991. Abstract.

Toro B., (1978) – *Anomalie residue di gravità e strutture profonde nelle aree vulcaniche del Lazio settentrionale*. *Geol. Rom.*, **17**, 35-44.

Trigila R., Agosta A., Currado C., De Benedetti A.A., Freda C., Gaeta M., Palladino D.M., Rosa C., (1995) – *Petrology*. In: Trigila R. (Ed.), *The volcano of the Alban Hills, Rome*. 95-165.

Trigila R., Gaeta M., Freda C., (1991) – *Indicazioni termodinamiche e petrologico-sperimentali sull'origine ed evoluzione dei magmi potassici dell'Italia centrale*. *Studi Geol. Camerti*, Vol. Spec. 1991/2, CROP11, 357-367.

Vandeginste, B.G.M., Massart, D.L., Buydens, L.M.C., De Jong, S., Lewi, P.J., Smeyers-Verbeke, J., (1998). *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics: Part B*. Elsevier, Amsterdam.

Ventriglia, U., (1990). *Idrogeologia della Provincia di Roma, III Volume: Regione Vulcanica dei Colli Albani*. *Amm. Prov. Roma*. Abete Grafica s.p.a., Roma, I, 639 pp.

Washington H.S., (1906) – *The Roman Comagmatic Region*. Carnegie Inst., Washington, Yb **56**, 206-214.

Weibring, P., H. Edner, S. Svanberg, G. Cecchi, L. Pantani, R. Ferrera, T. Caltabiano, (1998). *Monitoring of volcanic sulphur dioxide emissions using differential*

optical absorption lidar (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), and correlation spectroscopy (COSPEC), Appl. Phys. B, 67, 419–426.

West Systems S.r.l., (2002) – *Carbon dioxide flux meter handbook*. Release 4.00, May 01, 2002. www.westsystems.com.