

Open File Report

N. 4 - 2001

La misura del flusso di CO₂ dal suolo di un'area vulcanica tramite Stazioni per l'Acquisizione di Parametri Geochimici (SAPG): un contributo al monitoraggio geochimico in continuo della Solfatara di Pozzuoli e del Vesuvio (Napoli, Italia)

Domenico Granieri

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA
Sezione di Napoli "Osservatorio Vesuviano"

Maggio 2001

INDICE

1.	Introduzione	3
2.	Stazioni per l'Acquisizione di Parametri Geochimici (SAPG) e siti di monitoraggio	4
3.	Filtraggio dei dati di flusso di CO₂	6
4.	Conclusioni	16
5.	References	17

La misura del flusso di CO₂ dal suolo di un'area vulcanica tramite Stazioni per l'Acquisizione di Parametri Geochimici (SAPG): un contributo al monitoraggio geochimico in continuo della Solfatara di Pozzuoli e del Vesuvio (Napoli, Italia)

Granieri Domenico

INGV - Osservatorio Vesuviano, Unità Funzionale Geochimica dei Fluidi, via Diocleziano, 328 - 80124 Napoli
granieri@ov.ingv.it

1. Introduzione

Il monitoraggio in continuo di parametri geochimici in aree di vulcanismo attivo è di primaria importanza per due ragioni principali: 1) prevedere l'evoluzione temporale dei sistemi vulcanici, in particolare l'inizio dell'attività eruttiva; 2) migliorare le conoscenze sui processi profondi che governano il degassamento.

Ai fini della previsione di un evento eruttivo, il controllo in continuo del degassamento dal suolo si è mostrato notevolmente utile in diverse zone vulcaniche attive; anomalie nel degassamento della CO₂ o di gas in tracce, per i quali la CO₂ agisce come carrier (i.e. Rn and He), sono stati osservati prima e/o durante episodi di "unrest" in diversi vulcani (i.e. Etna, Stromboli, Vulcano, Campi Flegrei, Allard et al.,1991; Badalamenti et al., 1988, 1991a, 1991b; Baubron et al.,1990; Carapezza et al.,1990; Chiodini 1996; Lombardi et al.,1984; Lombardi and Nappi, 1986).

E' stato inoltre accertato che la quantità di CO₂ rilasciata come emanazione diffusa da un suolo vulcanico è più elevata di quella emessa dalle manifestazioni fumaroliche. In alcuni casi questa quantità è confrontabile con i gas emessi da plumes di vulcani in eruzione (Allard et al.,1991; Baubron,1990; Baubron et al.,1991; Chiodini, 1996; Chiodini et al., 2000).

Il principale scopo del monitoraggio, indipendentemente da fini scientifici o di sorveglianza, è di misurare ed interpretare il segnale che arriva dal profondo. Sfortunatamente, la maggior parte delle misure registrate può essere influenzata da fattori esterni. E' stato empiricamente osservato, infatti, che la concentrazione di gas nel suolo, è legata ai fattori ambientali quali pioggia, pressione barometrica, temperatura e umidità del suolo e dell'aria, intensità e direzione del vento (Alm et al.,1999; Hinkle 1986,1994; Reimer 1980). Un recente lavoro di J.D. Rogie et al., ha messo in evidenza che anche il flusso di CO₂ dal suolo dipende dai fattori atmosferici, in particolare, per

l'area di Mammoth Mountain, dalla pressione atmosferica e dall'intensità del vento (Rogie J.D. et al., 2001).

Di conseguenza, per poter usare proficuamente l'informazione contenuta nei dati registrati, è necessario trovare la relazione tra i fattori esterni ed il flusso, quantificare e quindi rimuovere il "disturbo".

Oggetto del presente rapporto è l'esposizione dei risultati registrati negli ultimi due anni dalle Stazioni per l'Acquisizione di Parametri Geochimici (**SAPG**) che sono installate ai Campi Flegrei ed al Vesuvio.

Le SAPG misurano il flusso di CO₂ (ϕCO_2) dal suolo e, contemporaneamente, alcuni parametri ambientali che possono avere influenza sul processo di degassamento.

Sarà quindi esposta la trattazione matematico-statistica dei dati che ha lo scopo di quantificare ed eliminare l'aliquota di segnale imputabile a tali fattori esterni.

2. Stazioni per l'Acquisizione di Parametri Geochimici (SAPG) e siti di monitoraggio

Il prototipo originale di SAPG (costruito dalla West System di Pisa) è stato sviluppato dall'IGGI-PI e dall'Università di Perugia e testato a Santorini nel periodo novembre-dicembre 1995 nell'ambito del progetto UE "Santorini Volcano Laboratory".

L'attuale versione della stazione è basata sullo stesso principio ma ha consumi più bassi ed una migliore sensoristica.

Il ϕCO_2 è misurato col metodo 'time 0, depth 0' usando una camera d'accumulo (Parkinson,1981; Tonani and Miele,1991; Baubron et al.,1990, 1991; Chiodini et al.,1996, 1998). L'accuratezza delle misure è di circa il 10% per valori di ϕCO_2 tipici di aree vulcaniche (Chiodini et al.,1996, 1998). Il metodo della camera di accumulo permette una misura diretta del flusso di CO₂, indipendentemente dal regime di trasporto operante (diffusivo, diffusivo Knudsen, viscoso, slip) e senza alcun fattore correttivo dipendente dalle proprietà fisiche del suolo, come richiesto, per esempio, dal metodo della "concentrazione dinamica" (Gurrieri and Valenza, 1988). Ogni misura richiede un tempo di esecuzione breve (da pochi secondi a 1-2 minuti in relazione all'entità del flusso)

Due SAPG (FLXOV1 e FLXOV3) sono state operative ai Campi Flegrei ed una (FLXOV4) al Vesuvio durante il periodo 1998-2000.

Le SAPG trasmettono i dati al Centro Ricezione ed Elaborazioni Dati (**CRED**) provvisoriamente posto alla sede storica di Ercolano (fig. 1).

Ai Campi Flegrei le 2 SAPG sono situate all'interno del cratere della Solfatara, il sito più attivo della caldera. Il cratere della Solfatara e l'area circostante rilasciano grandi quantità di fluidi di origine profonda attraverso attività fumarolica e degassamento diffuso dal suolo. L'area interessata dal degassamento anomalo (chiamata DDS, Diffuse Degassing Structures) è di circa 0.5 Km². Essa rilascia una quantità di energia termica pari a circa 10¹³ J/d attraverso il processo di degassamento diffuso (circa 1.500 t/d di CO₂) ed attraverso la condensazione di vapore originariamente associato alla CO₂ (Chiodini et al., 2001a).

Le SAPG sono localizzate dentro la DDS, in zone dove la CO₂ è rilasciata da un sistema idrotermale (Cioni et al., 1984). L'origine del gas da sorgenti profonde è confermato dai valori di ϕ_{CO_2} che a FLXOV1 e FLXOV3 (ved tab.1 di pagina 6) sono di diversi ordini di grandezza superiori ai valori del locale background biologico (<30 gm⁻²d⁻¹, Chiodini et al., 2001a). Al Vesuvio la SAPG FLXOV4 è localizzata all'interno del cratere vicino alle emissioni fumaroliche. Anche nel caso della FLXOV4 la principale sorgente di CO₂ è un sistema idrotermale che, al momento, è contenuto nel condotto vulcanico del Vesuvio (Chiodini et al., 2001b).

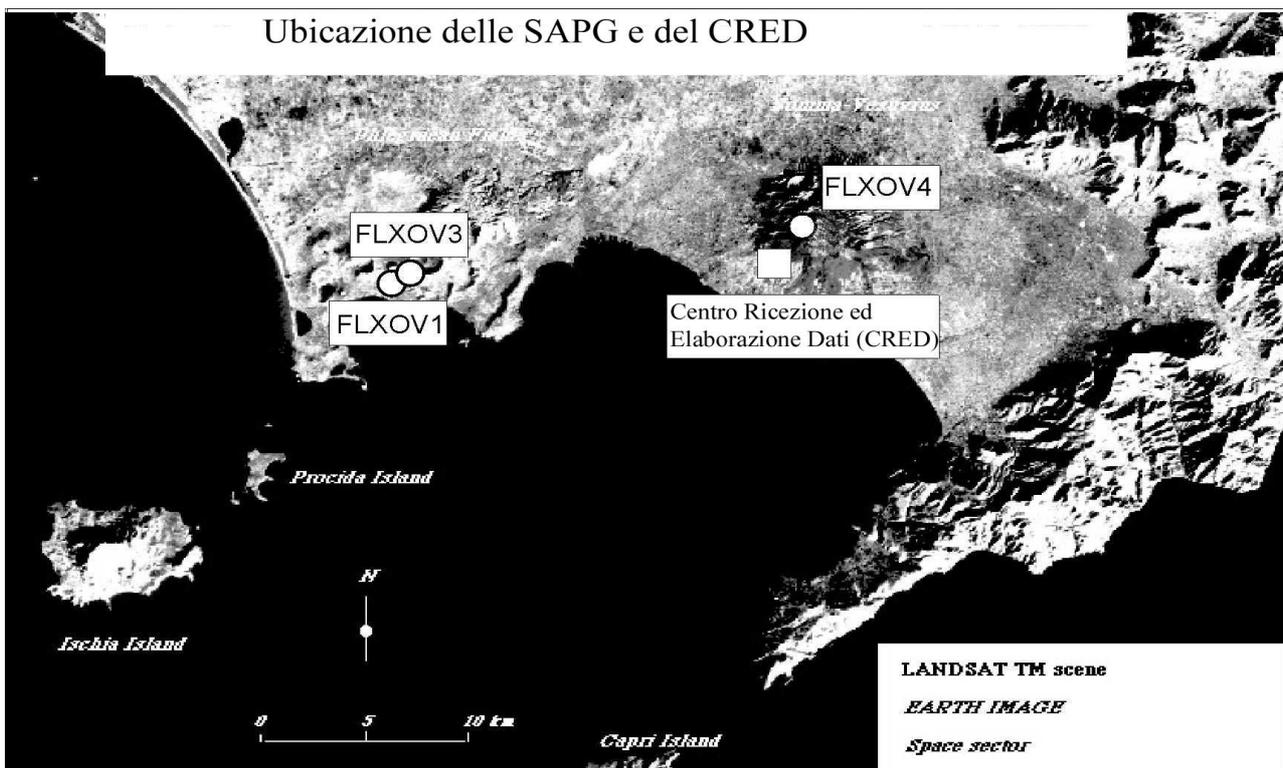


Fig.1 – Stazioni geochimiche in continuo nell'area napoletana

Di seguito sono riportati alcuni dettagli sui periodi di funzionamento e sull'equipaggiamento sensoristico delle SAPG.

La **SAPG FLXOVI** è stata resa operativa il 26/11/97 è tuttora attiva ed ha fornito fino all'aprile del 2001 più di 111.000 dati validi (14.597 misure di flusso) ad intervalli di 1 o 2 ore. E' costituita da una camera d'accumulo automatica per le misure del flusso di CO₂, da n.2 sensori di temperatura (del suolo e dell'aria), da n.2 sensori per la misura dell'umidità del suolo e dell'aria, da un barometro e da un anemometro. Altri sensori dedicati servono a monitorare lo stato di funzionamento della stazione. Dalle registrazioni pluviometriche sono stati estratti i valori della piovosità per i periodi di interesse.

La **SAPG FLXOV3** è stata operativa nel periodo 14/10/98-21/06/2000, non in maniera continuativa. La sua posizione severa (prossima alla fumarola Bocca Grande) ha richiesto periodici interventi di manutenzione e la disinstallazione nel giugno 2000 per una revisione completa. Ha fornito circa 30.000 dati (6.424 misure di flusso di CO₂). La SAPG è costituita da una camera di accumulo automatica per misure flussi CO₂, n.6 sensori per la temperatura (n.2 temperature del suolo, temperatura delle fumarole Bocca Grande e Bocca Nuova, temperatura aria, temperatura interna della stazione), un sensore per la concentrazione di CO₂ in aria. Altri parametri atmosferici sono ottenibili dalla SAPG FLXOV1 distante circa 200m.

La **SAPG FLXOV4** è stata resa operativa nel mese di novembre 1998 è tuttora attiva ed ha fornito, fino all'aprile 2001, circa 16.500 dati (4.074 misure di flusso di CO₂). Il sito di campionamento è raggiunto con difficoltà dalla luce solare e, malgrado è stato impostato un tempo di campionamento di 4 ore per minimizzare i consumi, nei mesi invernali la stazione non è alimentata correttamente.

Il sistema acquisisce il flusso di CO₂ dal suolo, la pressione atmosferica, la temperatura dell'aria e del suolo. Un sensore di temperatura è stato posto alla vicina fumarola (fumarola FC5) ed ha funzionato per un periodo limitato.

3. Filtraggio dei dati di flusso di CO₂

Come detto prima, il flusso di CO₂ può dipendere da fattori esterni. Per rimuovere questo disturbo in maniera soddisfacente sono necessarie due condizioni:

1. un intervallo di misura (più lungo possibile) in cui si possa escludere il contributo significativo di fattori endogeni. E' interessante notare che, nei casi considerati, questa condizione è complicata dall'attività persistente del Vesuvio e della Solfatara.
2. misure simultanee di parametri che potenzialmente possono influenzare il degassamento di CO₂, quali, per esempio, temperatura dell'aria, pressione barometrica, umidità del suolo, temperatura del suolo, velocità del vento.

Per la stazione FLXOV1 questi requisiti sono soddisfatti nell'intervallo 27 nov. 1998-26 novembre 1999 (un anno), dove le misure di flusso di CO₂ sono corredate dalle misure di temperatura dell'aria *T_a*, pressione barometrica *P_a*, velocità del vento *V_w*, piovosità *R*, umidità relativa del suolo *H_s* e dell'aria *H_a*. Tutti i dati sono regolarmente campionati ogni due ore. In questo periodo la deformazione del suolo e la sismicità non mostrano evidenza di fenomeni interni.

Per le altre due stazioni, FLXOV3 e FLXOV4, la disponibilità di dati è più ridotta. In particolare, per la FLXOV3 un campionamento regolare è disponibile solo per l'intervallo 13 ottobre 1999-gennaio 2000, con pochi dati mancanti. Alcuni fattori esterni misurati sono gli stessi di quelli riportati per FLXOV1. Per la stazione FLXOV4, è stato considerato l'intervallo 14 novembre 1998-13 novembre 1999. In questo ultimo caso, l'intervallo di tempo è lungo sufficientemente ma i parametri esterni misurati sono solo la temperatura dell'aria e del suolo e la pressione barometrica. I valori statistici delle registrazioni di ogni SAPG ed i periodi di registrazione scelti per la trattazione che segue sono riportati in tab.1.

		Flxov1 Nov. 1998-Oct. 2000	Flxov3 Oct.1999-Jun.2000*	Flxov4 Nov. 1998 - Oct. 2000*
Parameter				
CO ₂ flux (g*m ⁻² *d ⁻¹)	Range	396 - 4724	583 - 76171	130 - 11810
	Mean	879	46106	2157
	Observations n°	8290	2424	2343
Air RH (%)	Range	17.3 - 97.6	17.3 - 97.6	
	Mean	76,5	78,5	
	Observations n°	8290	2445 from Flxov1	
Air T (°C)	Range	-1.4 - 38.2	4.9 - 32	-8.3 - 17.8
	Mean	16,8	16,8	5,8
	Observations n°	8290	1205	2393
Bar.Pressure (mbar)	Range	980 - 1023	980 - 1022	884 - 919
	Mean	1004	1005	906
	Observations n°	8290	2445 from Flxov1	2417
Soil RH (%)	Range	37 - 71.7	38.5 - 67.5	
	Mean	48	50,6	
	Observations n°	8290	2445 from Flxov1	
Soil T (°C)	Range	37.6 - 68.6	42 - 65	33.7 - 89.3
	Mean	52	51,5	71
	Observations n°	7531	2445 from Flxov1	2417
Wind Speed (m*s ⁻¹)	Range	0 - 7.46	0 - 7.46	
	Mean	0,94	0,97	
	Observations n°	8290	2445 from Flxov1	

Tab. 1 – Valori registrati ai tre siti di campionamento (* periodo non completo)

In fig.2 sono riportate le registrazioni alla SAPG FLXOV1 per il periodo d'analisi.

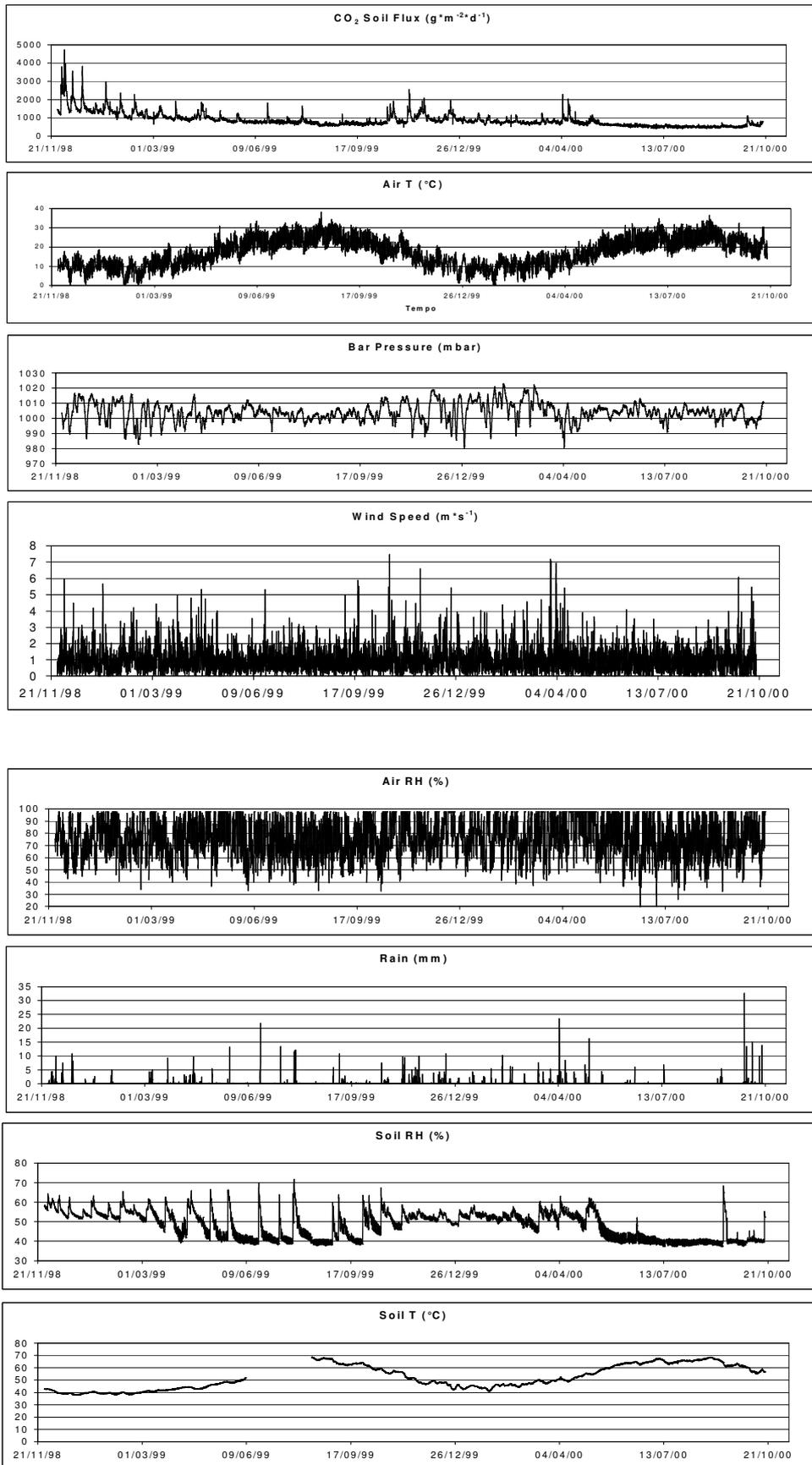


Fig. 2 – Regrazioni in continuo alla stazione FLXOVI

La modellizzazione degli effetti dei fattori esterni dai dati di flusso di CO₂ è ottenuta mediante una analisi di regressione multipla multivariata (Draper and Smith, 1981). Un simile tipo di analisi può presentare potenzialmente alcuni problemi: per esempio un falso effetto (bias) su una variabile visibile può essere causato da una variabile “latente” non misurata, oppure la variabile è compresa in un range di valori non rilevati dal sensore ed è interpretata come non significativa, oppure ancora tra la variabile dipendente ed una (o più) indipendente può esserci una relazione non lineare. Questi effetti sono descritti in Box (1966).

Il primo passo dell’analisi di filtraggio è consistito nella scelta di un modello lineare in cui la variabile dipendente è il logaritmo naturale del flusso di CO₂ e le variabili indipendenti sono i fattori esterni misurati alla stazione considerata. La scelta del logaritmo del valore di ϕ_{CO_2} è giustificata dal carattere schiettamente log-normale dei dati di ϕ_{CO_2} . E’ stata usata poi una procedura definita “Best Subset Search”, descritta da Garside (1971), per scegliere il numero minimo di parametri da inserire nel modello per spiegare la variabilità del flusso di CO₂.

La procedura richiede il fitting della registrazione (serie osservata) con tutte le possibili equazioni di regressione ottenute combinando le variabili indipendenti. Si sceglie quindi il caso migliore sulla base di un criterio prestabilito. Il criterio adottato qui è basato sul valore del coefficiente R². In altre parole, si riporta il caso con più alto R² usando una sola variabile indipendente, poi due variabili, poi tre e così di seguito fino a comprenderle tutte. La migliore regressione è quella per cui un ulteriore guadagno in R² è trascurabile.

Con questa procedura, per FLXOV1, si ottiene:

N. di variabili	Equazione	Best R ² %
1	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs)$	57.8 %
2	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs, Ta)$	67.9 %
3	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs, Ta, Vw)$	68.4 %
4	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs, Ta, Vw, R)$	68.8 %
5	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs, Ta, Vw, R, Pa)$	69.0 %
6	$\ln(\phi_{CO_2})=f(Hs, Ta, Vw, R, Pa, Ha)$	69.0 %

Pertanto la migliore regressione risulta la seconda, con *Hs* e *Ta* come variabili indipendenti. Infatti l’ulteriore aggiunta di altre quattro variabili porta ad un guadagno in R² solo dell’1.1%.

Il modello lineare di filtraggio è, per FLXOV1:

$$\ln(\phi_{CO_2}) = (5.88 \pm 0.03) - (1.81 \pm 0.05)10^{-2}Ta + (2.64 \pm 0.05)10^{-2}Hs$$

La validità del modello è provata dall'analisi dei residui (Draper e Smith, 1981). Se il modello scelto è appropriato, i residui sono uniformemente distribuiti intorno alla linea dello zero. I residui del modello per FLXOV1 sono riportati in fig.3. La loro dispersione è maggiore per valori alti del flusso di CO₂.

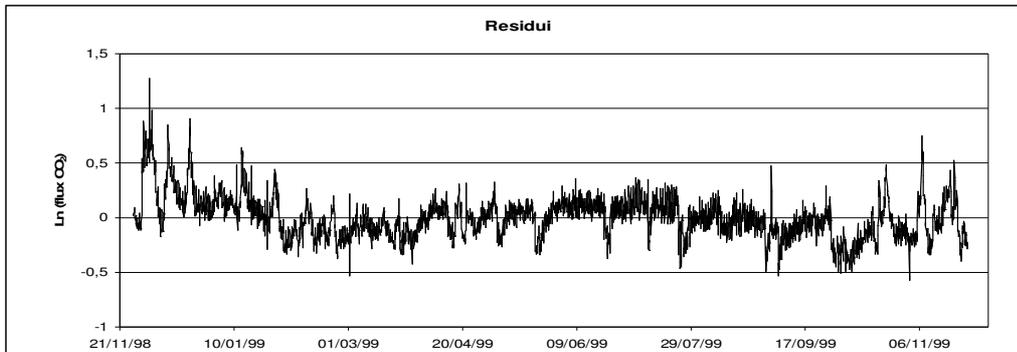


Fig. 3 – Residui dalla regressione multipla lineare

Per questa ragione sono stati ricalcolati i coefficienti del modello lineare pesando i dati di flusso con una funzione $\omega_i = 1/[\ln^2(\phi\text{CO}_2)]_i$.

La regressione multivariata pesata è:

$$\ln(\phi\text{CO}_2) = (5.95 \pm 0.03) - (1.83 \pm 0.05)10^{-2}Ta + (2.49 \pm 0.05)10^{-2}Hs$$

l'equazione non cambia sostanzialmente ed il valore di R² passa da 67.9% a 68.3%.

Come si può vedere dalla fig.4 la dispersione dei residui per questo modello si è sensibilmente ridotta (notare la diversa scala delle ordinate in fig.4 ed in fig.3).

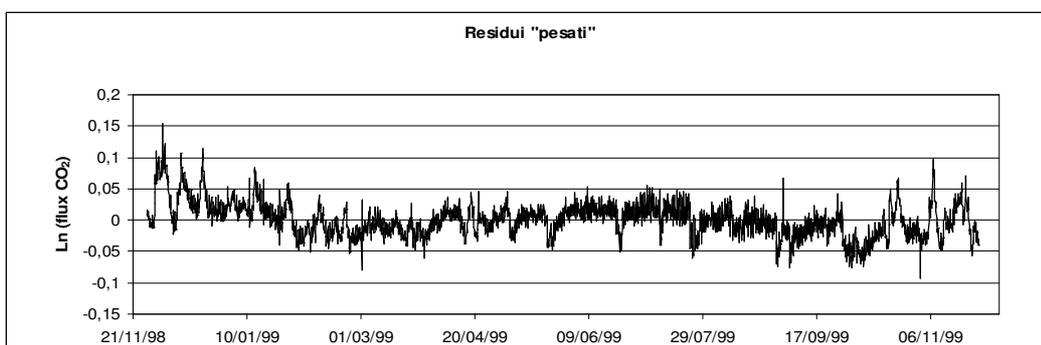


Fig. 4 – Residui dalla regressione multipla lineare dopo aver assegnato un peso ai dati

Operando ancora con il “Best Subset Search” per la stazione FLXOV3 si ottiene:

N. variabili	Equazione	Best R ² %
1	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Ta)$	32.3 %
2	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Ta, Hs)$	37.4 %
3	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Ta, Hs, Pa)$	37.4 %
4	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Ta, Hs, Pa, Ha)$	37.4 %
5	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Ta, Hs, Pa, Ha, Vw)$	37.4 %

Anche in questo caso la regressione migliore è la seconda con Ta e Hs come variabili indipendenti:

$$\ln(\varphi\text{CO}_2) = (10.0 \pm 0.1) - (3.4 \pm 0.1)10^{-2}Ta + (2.4 \pm 0.2)10^{-2}Hs$$

I residui del modello sono riportati in fig.5. Essi non sono uniformemente distribuiti intorno allo zero. Questo effetto potrebbe essere dovuto ad una sottostima del flusso di CO_2 in alcuni cicli di misura. Infatti i valori elevati del sito potrebbero indicare il raggiungimento del fondo scala del sensore durante la misura stessa.

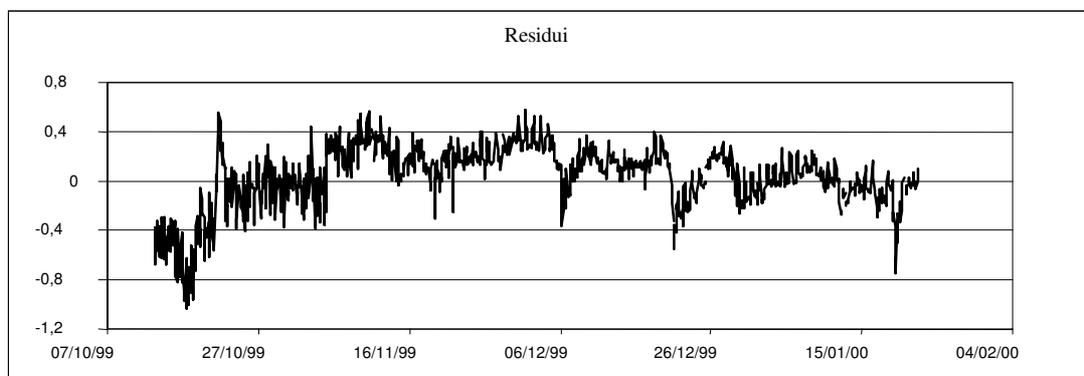


Fig. 5 – Residui dalla regressione multipla lineare a FLXOV3

Infine, per la stazione FLXOV4, si ottiene:

N. variabili	Equazione	Best R ² %
1	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Pa)$	28.2 %
2	$\ln(\varphi\text{CO}_2)=f(Pa, Ta)$	29.1 %

La migliore regressione è pertanto quella con la sola pressione atmosferica come variabile indipendente.

$$\ln(\varphi CO_2) = (50 \pm 2) - (4.7 \pm 0.3)10^{-2} Pa$$

Dai risultati riportati sopra, si può osservare che:

1. il caso migliore è offerto dalla SAPG FLXOV1 dove il record di dati è più lungo, più regolare e più denso;
2. i parametri influenti sono uno o due tra quelli misurati;
3. i parametri influenti sono diversi da sito a sito.

La bontà dei modelli è inoltre verificata usando le equazioni proposte su un set di dati indipendenti. Per FLXOV1 è stato considerato l'intervallo di tempo 27 novembre 1999-18 ottobre 2000. Per la stazione FLXOV3 è stato considerato l'intervallo febbraio 2000 – giugno 2000. Infine per la stazione FLXOV4 è stato considerato l'intervallo 14 novembre 1999-18 ottobre 2000. Nella trattazione che segue, si indicherà come LD (Learning Dataset) i dati riferiti al primo periodo sulla base dei quali è stato costruito il modello e CD (Control Dataset) il secondo intervallo di tempo costituito da dati indipendenti.

I risultati sono riportati in fig.6a-c.

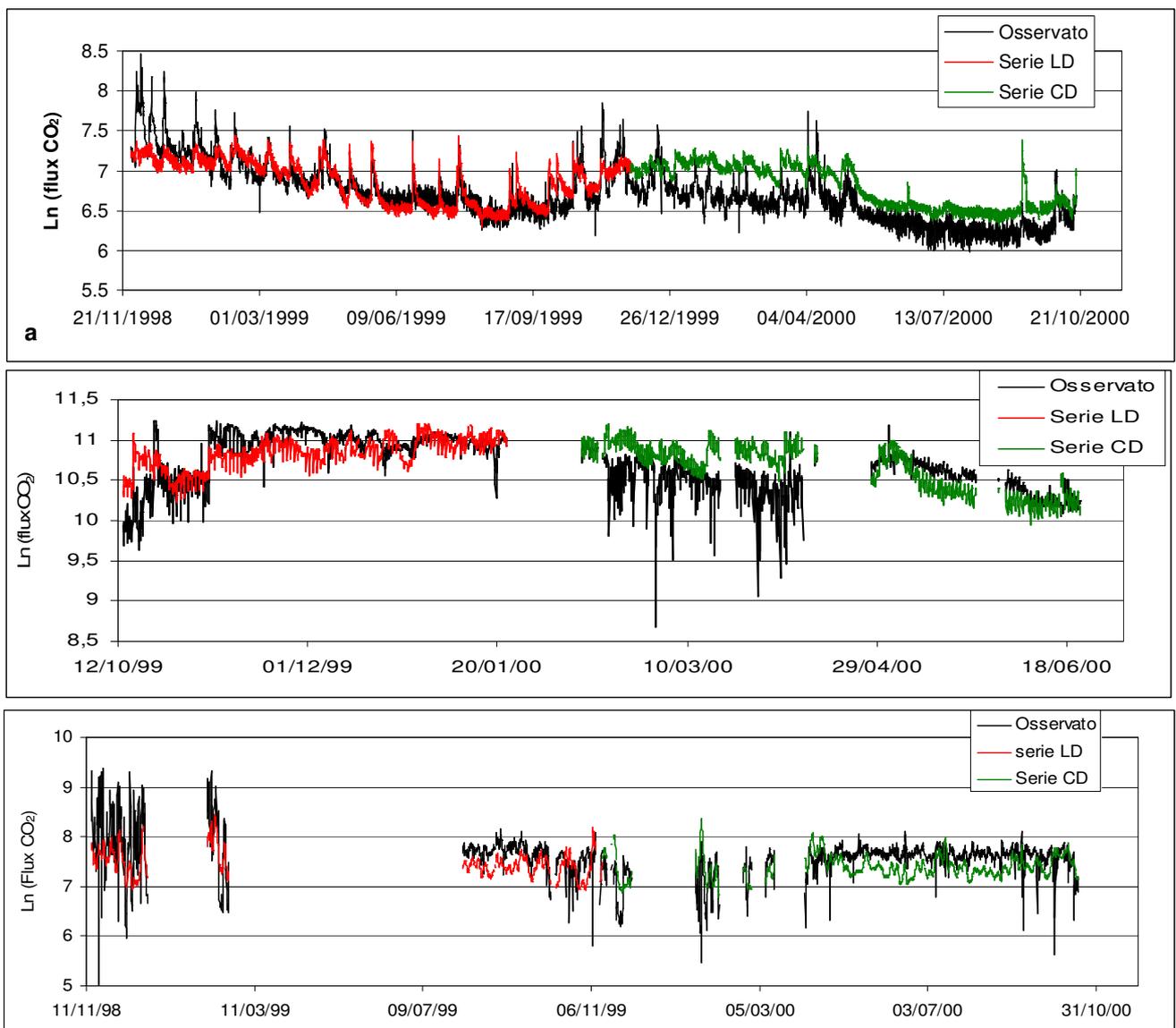


Fig. 6 – Serie dei valori di flusso di CO₂ (in scala Log-naturale) osservati e serie di Learning Dataset (serie LD) e Control Dataset (serie CD) per la stazione FLXOV1 (6a), FLXOV3 (6b) e FLXOV4 (6c).

Per ogni set di dati è stato calcolato il coefficiente di correlazione di Pearson (r^2) che può essere usato come indicatore del grado di somiglianza tra le serie temporali osservate e quelle predette.

I valori del coefficiente di Pearson per LD e CD di FLXOV1 sono comparabili ($r^2=0.82$ per LD e $r^2=0.83$ per CD) e questo è una chiara indicazione della bontà del modello. Un aspetto veramente interessante del modello è la differenza nel trend a lungo termine degli osservati e dei predetti del Φ_{CO_2} , particolarmente evidente in CD. Questa discrepanza è legata, probabilmente, a fattori endogeni. I coefficienti di correlazione r^2 ottenuti per FLXOV3 ($r^2=0.61$ per LD e $r^2=0.26$ per CD) e FLXOV4 ($r^2=0.53$ per LD e $r^2=0.23$ per CD), invece, sono diversi per i due sets di dati LD e CD, e pertanto il modello non è soddisfacente. Questa inconsistenza potrebbe essere dovuta a differenti fattori: limitata estensione temporale del primo set di dati (LD), problemi di saturazione in FLXOV3 durante il ciclo di misura, limitato numero di variabili esterne.

Osservando l'andamento dei residui per FLXOV1 (fig.3 e fig.4) si può notare un generale trend decrescente, in altre parole una loro dipendenza temporale. La dipendenza temporale dei residui di una regressione, qui chiamati Z_t , può essere decomposta in tre termini:

$$Z_t = X_t + S_t + \varepsilon_t$$

dove X_t è la componente non-periodica a lungo termine, S_t è la componente periodica e ε_t è il disturbo random. Il componente X_t può essere stimato tramite la procedura ARIMA (Integrated AutoRegressive Moving Average; vedi Box and Jenkins, 1976) di basso ordine ARIMA (1,1,1):

$$BX_t = \theta + a_1 X_{t-1} + \eta_t - b_1 \eta_{t-1}$$

dove θ è la costante di calibrazione, a_1 è il parametro del processo autoregressivo, b_1 è il parametro legato alla media mobile η_t è il processo residuo, e B è l'operatore backward shift definito come $BX_t = X_t - X_{t-1}$ (Box and Jenkins, 1976; Priestley, 1981).

Qui non è fittato un processo ARIMA (k,p,l) generale ma solo quello di più basso ordine, usando $p=1$ e $k, l \leq 1$. Questa scelta garantisce usualmente un fit soddisfacente della dipendenza temporale nonperiodica delle serie temporali. I parametri del modello θ , a_1 , b_1 e la varianza del processo residuale η_t sono stimati attraverso la tecnica dei minimi quadrati (Box and Jenkins, 1976; Priestley,

1981). Il valore corretto di k e l (0 o 1) è scelto attraverso il criterio AIC (Akaike, 1978). Analizzando i residui relativi a LD, si ottiene:

$$BX_t = (0.44 \pm 0.03)X_{t-1} + \eta_t - (0.77 \pm 0.02)\eta_{t-1}$$

Nell'equazione precedente, η_t rappresenta la serie temporale dei "nuovi" residui ulteriormente filtrati per la dipendenza temporale non periodica. Ciò significa che mentre l'analisi di regressione multivariata eseguita all'inizio rimuove gli effetti dei fattori esterni dalla registrazione del flusso di CO₂, il filtraggio ARIMA elimina gli effetti non-periodici a lungo termine. La Fig.7 riporta i residui del filtraggio ARIMA.

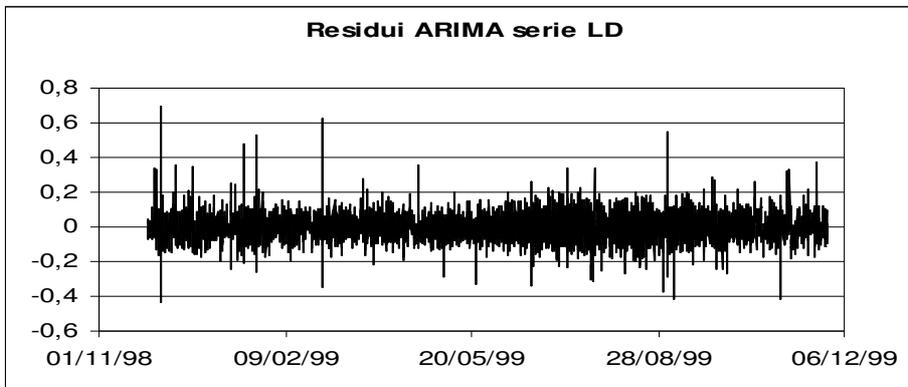


Fig. 7 – Residui del filtraggio per il set LD

Nel caso di assenza della componente periodica ($S_t=0$) la serie temporale dei residui, η_t , dovrebbe dare uno spettro bianco. L'analisi spettrale (Fuller, 1976; Priestley, 1981) su questi residuali mostra, invece, una periodicità marcata a 12 ore, ed una meno significativa a 24 ore (fig.8). Questi cicli indicano che esiste la componente S_t e che essa è caratterizzata da periodicità diurna e semi-diurna.

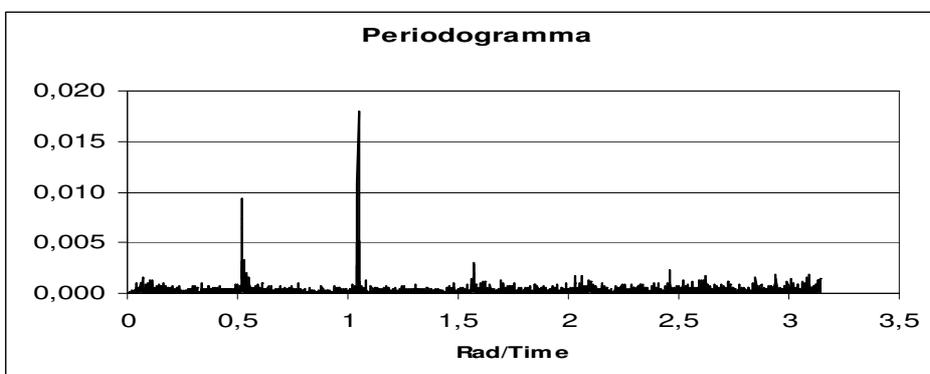


Fig. 8 – Periodogramma dei residui della serie LD, il picco maggiore corrisponde a 12h, quello più basso a 24h

Applicando la stessa procedura ARIMA con gli stessi parametri per la serie CD, si ottengono i residui riportati in fig.9. I residui non sono uniformi come per LD, ma la loro dispersione cresce improvvisamente alla fine di marzo 2000 (il cambiamento è segnato con una freccia in fig.9).

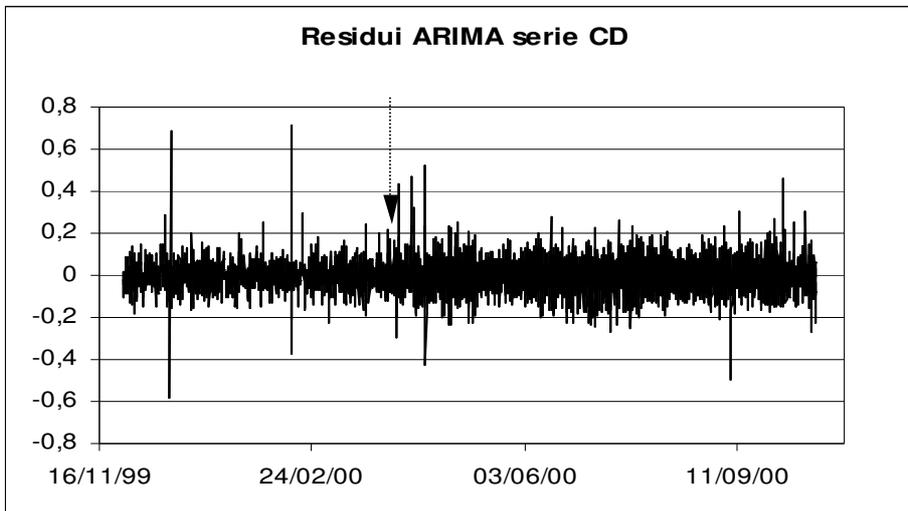


Fig. 9 – Residui del filtraggio per il set CD, la dispersione è maggiore dalla fine marzo 2000

Questa differenza è dovuta al fatto che i due sets di dati, LD e CD, non hanno lo stesso trend a lungo termine (fig.6a). Ciò che si nota nel grafico 9 è confermato dall'analisi Change Point (CP), procedura statistica per individuare se e dove esiste un punto di cambiamento in una serie temporale. La posizione del CP è valutata usando una potente procedura non parametrica sviluppata da Mulargia e Tinti (1985) basata sul test a doppio campione Kolmogorov-Smirnov. Questo approccio dà una soddisfacente risposta quando 1) il numero di regimi (patterns temporali distinti) è sconosciuto; 2) i regimi seguono differenti distribuzioni statistiche; 3) i regimi comprendono un campione di piccole dimensioni. Il metodo è indicato per serie temporali stazionarie ma è efficiente anche per serie con variazioni piccole (Mulargia *et al.*, 1987). La procedura di change point per la serie CD trova un cambiamento al campione 1494 (31 marzo 2000) mentre per la serie LD non trova alcuna disuniformità nel periodo novembre 1998-novembre 1999.

4. Conclusioni

Il monitoraggio del flusso di CO₂ dal suolo tramite delle stazioni in continuo è un approccio utile ai fini della sorveglianza vulcanica in quanto consente di apprezzarne le variazioni temporali.

Poiché il principale scopo nel misurare il flusso di CO₂ dal suolo, come per ogni altro parametro geofisico, deve essere quello di rilevare il segnale che arriva dal profondo, è stato tentato di modellizzare e rimuovere l'influenza dei parametri esterni tramite tecniche statistiche. I risultati del filtraggio, facendo uso della regressione multivariata, mostrano un legame tra il flusso di CO₂ ed i parametri ambientali; il loro peso dipende strettamente dal sito di misura. Per l'esperienza condotta alla Solfatarina si trova una dipendenza del flusso dall'umidità del suolo e dalla temperatura dell'aria. Al Vesuvio, invece, la pressione atmosferica è molto più importante della temperatura dell'aria, soprattutto nei periodi non piovosi.

Il modello di filtraggio usato per le tre stazioni considerate è soddisfacente solo per la stazione FLXOV1 dove la serie di dati è più completa e più estesa.

A FLXOV3, invece, l'analisi mette in evidenza alcune discrepanze probabilmente legate ad effetti di saturazione del detector. A FLXOV4 il modello non è buono probabilmente perché si dispone di soli due parametri atmosferici.

Per FLXOV1, i residui del filtraggio mostrano una dipendenza temporale consistente di un termine a lungo tempo e di un termine a periodicità diurna e semi-diurna. E' probabile che i cicli di 12 e 24 ore siano ancora legati a fattori esterni, poiché i processi endogeni hanno, di regola, periodi più lunghi. In particolare ciò potrebbe essere dovuto a uno o più fattori esterni non misurati, oppure ad effetti non lineari tra le variabili incluse nel modello. Escludo un possibile contributo delle maree che sono caratterizzate da un periodo differente (12.42 ore). Più interessante è il trend a lungo termine che può essere spiegato da fattori endogeni. In particolare, è stato trovato un significativo cambiamento nel trend a lungo termine alla fine di marzo 2000. In concomitanza, ai Campi Flegrei, è stata registrata una inversione nella deformazione del suolo, passata dalla subsidenza al sollevamento. L'evento deformativo è culminato in una crisi sismica nell'agosto dello stesso anno.

5. References

- Akaike H. (1978)** - A Bayesian analysis of the minimum AIC procedure. *Ann. Inst. Statist. Math.*, 30A, 9-14.
- Allard P., Carbonelle J.M., Faivre-Peirret R., Martin D., Sabroux J.C., Zettwoog P. (1991)** – Eruptive and diffusive emissions of CO₂ from Mt. Etna. *Nature*, Vol.351, 387-391
- Alm J., Saanio S., Nykanen H., Silvola J., Martikainen J. (1999)** - Winter CO₂, CH₄, N₂, O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeochemistry (Dordrecht)* 44, 163-186.
- Badalamenti B., Gurrieri S., Hauser S., Valenza M., (1988)** - Soil CO₂ output in the Island of Vulcano during the period 1984-1988: surveillance of gas hazard and volcanic activity. *S.I.M.P. Carapezza memorial vol.43*, 893-899
- Badalamenti B., Gurrieri S., Nuccio P.M., Valenza M., (1991)** - Gas hazard on Vulcano Island. *Nature*, 350, 26-27
- Badalamenti B., Gurrieri S., Hauser S., Parello F., Valenza M., (1991)** - Change in the soil CO₂ output at Vulcano during the summer 1998. *Acta Vulcanologica*, Vol.1, 219-221
- Baubron J.C., Allard P., Toutain J.P. (1990)** – Diffuse volcanic emission of carbon dioxide from Vulcano Island, Italy. *Nature*, Vol. 344, 51-53
- Baubron J.C., Allard P., Sabroux J.C., Tedesco D. and Toutain J.P. (1991)** - Soil gas emanations as precursory indicators of volcanic eruptions. *J. Geol. Soc. Lond.* 148: 571-576.
- Box G.E.P. (1966)** - Use and abuse of regression. *Technometrics*, 8, 625-629.
- Box G.E.P., and G.M. Jenkins (1976)**. Time Series Analysis: Forecasting and Control, *Holden-Day, Merrifield, Va.*
- Carapezza M.L., Giammanco S., Gurrieri S., Hauser S., Nuccio P.M., Parello F., Valenza M., (1990)** – Soil gas geochemistry: CO₂ in: “Mt. Etna the 1989 eruption”. F. Barberi, A. Bertagnini & P. Landi (Editors)

Chiodini G., Cardellini C., Frondini F., Granieri D., Marini L., Ventura G. (2001a) – CO₂ degassing and energy release at Solfatara Volcano, Campi Flegrei, Italy. *J. Geophys. Res.* (in press)

Chiodini G., Marini L., Russo M. (2001b) – Geochemical evidence for the existence of high-temperature hydrothermal brines at Vesuvio volcano, Italy. *Geoch. Cosmoch. Acta* vol.65 n°14, 1-19.

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

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

Fuller W. A. (1976). Introduction to Statistical Time Series, *John Wiley, New York.*

Garside M.J. (1971). Best subset search. *Applied statistics*, 20, 112-115.

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. *Rendiconti della SIMP* 43, 1151-1158.

Hinkle M.E. (1986) - Using volatile constituents of soils and soil gases to determine the presence of copper-zone ore bodies at Johnson Camp, Arizona. *J. of Geoph. Res.* 91b, 3115-3121.

Hinkle M.E. (1994) – Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases. *Appl. Geochem.* 9, 53-63.

Lombardi S., Di Filippo M., Zantederchi L., (1984) - Helium in Plegrean Fields. *Bull. Volcanol.* 47, 259-265.

Lombardi S., Nappi G. (1986) - Helium in soil gas at Lipari and Stromboli Volcanoes. *Per. Mineral.* 55, 165-176.

Mulargia F., and S. Tinti (1985). Seismic sample areas defined from incomplete catalogues: an application to the Italian territory. *Phys. Earth and Planet. Int.*, 40, 273-300.

Mulargia F., P. Gasperini, and S. Tinti (1987). Identifying different regimes in eruptive activity: an application to Etna volcano. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 34, 89-106.

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

Priestley M.B. (1981) - Spectral Analysis and Time Series, *vol. 1. Academic, San Diego, Calif.*

Reimer G.M. (1980) – Use of soil-gas helium concentrations for earthquake prediction. Limitations imposed by diurnal variations. *J. Geophys.Res.* 85b, 3107-3114

Rogie J.D., Kerrick D.M., Sorey M.L. (2001) - Dynamics of Carbon Dioxide emission at Mammoth Mountain, California (*in prep.*)

Tonani F., Miele G. (1991) - Methods for measuring flow of carbon dioxide through soils in the volcanic setting. Napoli '91. *International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation. Napoli. 27 August - 1 September 1991.*