

Rapporti tecnici INGV

**Una nuova stazione a Vulcano
per il monitoraggio del flusso di
calore dal suolo**

155



Direttore

Enzo Boschi

Editorial Board

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it



Rapporti tecnici INGV

UNA NUOVA STAZIONE A VULCANO PER IL MONITORAGGIO DEL FLUSSO DI CALORE DAL SUOLO

Iole Serena Diliberto, Marco Camarda, Santo Cappuzzo, Sofia De Gregorio, Gaetano Giudice,
Roberto Guida, Paolo Madonia, Luigi Foresta Martin

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo - Geochimica)

155

Indice

Introduzione	5
1. Principi operativi	6
2. Descrizione della sonda di misura	6
2.1. Sensori di temperatura	7
2.2. Calibrazione e test di laboratorio	7
3. Descrizione della stazione	9
4. Descrizione del sito	10
5. Discussione dei dati	11
Bibliografia	15

Introduzione

Una stazione per il monitoraggio delle variazioni del flusso di calore dal suolo è stata installata all'isola di Vulcano sul cono attivo di La Fossa, all'esterno del campo fumarolico di alta temperatura. La stazione misura i valori di temperatura del suolo a sei differenti profondità, lungo uno stesso profilo verticale. Le misure consentono di ottenere il gradiente di temperatura ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$) nel suolo ed il coefficiente di correlazione lineare (R^2) delle temperature registrate lungo il profilo. Tali parametri (R^2 e $^{\circ}\text{C}/\text{m}$) consentono di determinare il flusso di calore nei periodi in cui la componente conduttiva è la principale forma di trasporto del calore. La stazione è stata progettata ed assemblata nel laboratorio di elettronica della sezione di Palermo dell'INGV e utilizza un programma di acquisizione ed un sistema di trasmissione interamente progettati e sviluppati dallo stesso personale. Dopo un primo periodo di osservazione dei dati e di verifiche tecniche la stazione, denominata Bordosud, è entrata nel sistema di monitoraggio geochimico dell'attività di Vulcano gestito dalle Sezione di Palermo dell'INGV.

L'energia termica rilasciata da un sistema vulcanico è un parametro di primaria importanza per la sorveglianza dell'attività vulcanica. Durante i periodi intereruttivi, il calore rilasciato attraverso la circolazione dei fluidi idrotermali e l'energia termica associata all'emissione di vapore attraverso i campi fumarolici costituiscono una buona parte dell'energia totale rilasciata dal vulcano.

Per molti anni la stima della quantità di energia convettiva rilasciata a Vulcano è stata effettuata attraverso rilevamenti periodici della superficie interessata dalle fumarole, delle temperature esalanti e dei flussi di vapore in alcuni punti campione. Le prime misure di temperatura del suolo, dedicate alla stima del flusso di calore convettivo smaltito dal sistema idrotermale, sono state effettuate a Vulcano nel 1997 ed hanno interessato il fianco meridionale interno del cratere di La Fossa. In questo settore sono state rilevate alcune anomalie termiche, legate a sistemi di frattura del cono, parzialmente mascherate a causa della natura disomogenea dei sedimenti superficiali (bombe vulcaniche, argilla, limo), i quali ostacolano localmente la risalita del vapore e ne determinano la condensazione in situ. Nel 2004 sono stati acquisiti i primi set di dati in continuo e dal 2005 sono state installate 5 stazioni di monitoraggio. I dati in continuo dei cinque siti monitorati, posti in posizione distale rispetto al campo fumarolico, hanno evidenziato che la quantità di energia smaltita dal sistema vulcanico è di gran lunga maggiore di quella smaltita attraverso i campi fumarolici od il plume vulcanico; una porzione di energia non ancora determinata, seppure certamente non trascurabile, viene dispersa per diffusione attraverso il suolo. Il monitoraggio continuo ha messo in evidenza alcuni periodi anomali di emissione di calore, rispettivamente nel 1998, 2004, 2005, 2006 e 2007. In questi periodi, di durata variabile (da 10 giorni a 4 mesi), il flusso di calore, nella porzione meridionale del cono, è cresciuto fino a raggiungere un fattore 4 rispetto ai valori di background (40 Wm^{-2}). In alcuni casi la temperatura superficiale ha raggiunto i 100°C , passando da un regime termico prevalentemente conduttivo ad uno puramente convettivo nell'arco di poche ore. I principali episodi di riscaldamento del suolo e le correlazioni con la temperatura e il chimismo delle fumarole sono stati in parte discussi in alcuni lavori [Aubert et al., 2008, Diliberto et al., 2007]. Talvolta le anomalie sono state accompagnate dall'aumento dell'attività sismica locale [Badalamenti et al., 1986, Aubert and Alparone, 2000, Diliberto et al., 2002]. La causa del surriscaldamento del suolo è da attribuire alla risalita di vapore idrotermale nelle porzioni più superficiali. La condensazione di vapore, è un processo immediato e fortemente esotermico (un grammo di vapore condensato produce 2350 J) che lascia una traccia evidente nel record delle temperature e modifica le caratteristiche fisiche del suolo. In alcune occasioni il processo di risalita è stato più rilevante ed il vapore ha raggiunto il piano di campagna tamponando tutte le temperature del profilo di suolo al punto di ebollizione dell'acqua presente in forma dispersa fra i sedimenti.

Inoltre a distanza di oltre 10 anni, episodici aumenti di flusso di calore si sono verificati nelle stesse posizioni, ad indicare che la risalita avviene attraverso sistemi di fratture preesistenti e ben definiti.

Ne deriva l'ulteriore indicazione che a questa scala temporale i processi di *self-sealing*, l'attività sismica locale, ma anche fenomeni superficiali quali rimaneggiamento, disfacimento o alterazione, non hanno modificato i gradienti di permeabilità del suolo in modo drastico.

Le precedenti esperienze hanno altresì consentito di individuare i limiti di utilizzo del sistema di monitoraggio e di affrontare e risolvere alcuni problemi di manutenzione delle stazioni, determinati dalle condizioni ambientali a cui sono soggette, riducendo la probabilità di trattare dati di scarsa qualità, o di perdere set di dati.

1. Principi operativi

Il metodo di calcolo del flusso di calore a partire dal gradiente di temperatura nel suolo è stato descritto da Aubert et al., 2008, al quale si rimanda per l'impostazione teorica. Il flusso di calore (Φ) è calcolato dall'equazione:

$$\Phi = -\lambda \partial T / \partial Z$$

(conosciuta come legge di Fourier, che definisce il trasporto di calore conduttivo unidimensionale all'interno di un mezzo solido ed omogeneo. Incropera and De Witt, 2002)

dove λ è la conducibilità termica, $\partial T / \partial Z$ è il gradiente verticale di temperatura. In presenza di particolari condizioni di sito, di seguito elencate, tale flusso di calore è equivalente al flusso di calore proveniente dai livelli inferiori al profilo e trasmesso attraverso il trasporto convettivo e il processo di condensazione del vapore.

Le condizioni richieste per l'applicazione del metodo sono principalmente tre:

1. mezzo poroso omogeneo lungo il profilo monitorato (asse z);
2. flusso di calore unidirezionale (lungo l'asse z);
3. flusso di calore prevalentemente conduttivo lungo il profilo monitorato.

È possibile verificare la prima condizione richiesta per il calcolo del flusso attraverso l'ispezione visiva dello scavo, durante l'installazione dei sensori. Siti granulometricamente disomogenei, intercalazioni limose, o discontinuità laterali evidenti determinano irregolarità nel gradiente e deviazione dei vettori di flusso.

La seconda condizione è in parte legata alla prima ed è verificabile attraverso l'esecuzione di misure di temperatura nelle immediate vicinanze del sito selezionato, lungo sezioni ortogonali al profilo da monitorare che devono presentare gradienti orizzontali prossimi a zero o comunque inferiori per almeno un ordine di grandezza ai gradienti verticali.

L'ultima condizione richiesta è verificata dall'assenza di vapore in superficie, in particolare al momento dello scavo il suolo deve apparire secco. Le prime 2 condizioni, in assenza di variazioni geomorfologiche del sito, quali erosione da ruscellamento, smottamenti o apertura di fratture, generalmente non cambiano nel tempo, al contrario il regime di trasporto (conduttivo, convettivo) varia in relazione proprio al flusso di calore e i dati sperimentali indicano che la terza condizione non è soddisfatta quando il flusso di calore aumenta oltre i 180 Wm^{-2} [Aubert, 1999]; in tali circostanze la mancata valutazione della componente convettiva nel calcolo totale del flusso di calore ne determina una sottostima. In questi casi il profilo di temperatura permette di seguire comunque la durata dell'anomalia, ma la stima del flusso di calore deve essere dedotto attraverso la comparazione con altri parametri, quali il flusso di gas dal suolo ed il rapporto gas/vapore.

A tale scopo nella stazione Bordosud il monitoraggio del gradiente di temperatura è stato associato a quello del flusso diffuso di CO_2 . I dati flusso di CO_2 acquisiti sinora mostrano un accordo soddisfacente con i dati di flusso di calore. La valutazione del metodo comparativo per il ricalcolo del flusso di calore associato all'aumento del flusso di CO_2 , in regime prevalentemente convettivo, richiede ulteriori verifiche in situ e l'analisi di set di dati acquisiti durante periodi di anomalia esalativa.

2. Descrizione della sonda di misura

Nella sonda sono alloggiati 6 sensori per la misura della temperatura, posti secondo un profilo verticale di 90 cm con un'equidistanza tra i singoli punti di 15 cm (profondità pari a 15-30-45-60-75-90 cm). Le teste di lettura sono collocate nel suolo in orizzontale, all'interno di una struttura tubolare in PVC, la cui estremità è chiusa da un tappo metallico, sigillato con resina epossidica a base metallica. Tale struttura assicura il mantenimento della corretta posizione dei sensori anche in caso di piccoli movimenti di terra, e protegge i cavi dall'attacco delle soluzioni acide che si concentrano nel suolo sia in occasione della pioggia, che durante i periodi di anomalia esalativa, a seguito della risalita di specie solforate e anidride carbonica associate al vapore. La figura 1 mostra la struttura della sonda sin qui descritta, ma a differenza di quella installata a Bordosud, la sonda in fotografia è costituita da soli 5 sensori posti lungo un profilo di 75cm.

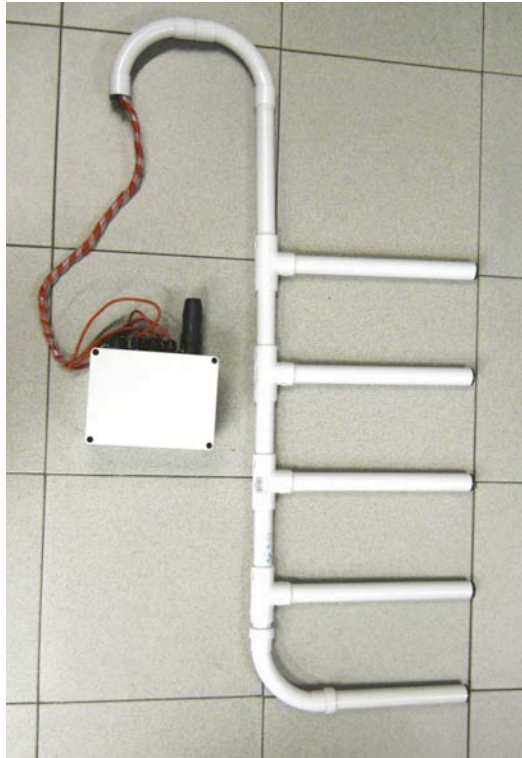


Figura 1. Fotografia di una sonda utilizzata per la misura del gradiente di temperatura nel suolo.

2.1. Sensori di temperatura

I sensori di temperatura utilizzati sono delle resistenze al platino, PT100 Classe B, 4 fili, alimentati in serie da un generatore di corrente di precisione che eroga una corrente costante di 400 μA . La tensione ai capi dei sensori è rilevata in maniera differenziale ed è proporzionale alla resistenza stessa del sensore. Detta tensione è resa unipolare dal circuito di condizionamento ed è amplificata, per renderla compatibile con il convertitore analogico digitale (ADC) presente a bordo di un microcontrollore, che gestisce solo segnali unipolari. Il convertitore è a 16 bit, con range 0-5V, e la risoluzione in temperatura ottenuta dopo il condizionamento è $< 0.004\text{ }^\circ\text{C}$.

I segnali analogici proporzionali alle temperature sono quindi convertiti in digitale; ogni dato rappresenta la mediana di nove misure eseguite in 100 ms. Ad ogni canale è anche associata una retta di calibrazione, i valori della conversione ADC vengono elaborati tenendo conto di tale retta ed al risultato viene applicata la seguente formula di conversione per ricavare la temperatura:

$$T = (-A + (A^2 - 4B(1-R/R_0))^{1/2})/2B \quad (1)$$

Dove R è il valore di resistenza misurato, R_0 è la resistenza a $0\text{ }^\circ\text{C}$ (100 Ω), A e B sono dei coefficienti di linearizzazione pari rispettivamente a $3.9083 \times 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $-5.775 \times 10^{-7}\text{ }^\circ\text{C}^{-2}$.

Tramite l'equazione (1) viene calcolato il valore della temperatura di ognuno dei sei sensori. Ogni valore viene memorizzato nel microcontrollore ed è reso disponibile in seguito ad una richiesta sulla linea RS485 in protocollo MODBUS da parte della stazione di acquisizione. Il firmware contenuto nel microcontrollore svolge tutte le funzioni sopra descritte.

2.2. Calibrazione e test di laboratorio

Test di laboratorio sono stati effettuati al fine di verificare la risposta elettrica di ciascun sensore e la correzione di eventuali errori. Per la taratura del sistema di conversione digitale ciascun sensore è stato sostituito da due resistenze di precisione (0.1%) del valore di 150 Ω e 75 Ω . I conteggi della conversione ADC (valori interi che possono variare nell'intervallo da 0 a 65535) forniscono due valori di conteggio, c1 e c2 che sono usati per definire la retta di calibrazione passante per i punti (c1, T1) e (c2, T2). In base alle specifiche delle PT100 (tabelle di corrispondenza resistenza-temperatura), i due punti ottenuti con le

resistenze di calibrazione corrispondono alle seguenti temperature fittizie: T1 (c1, 150 Ω) = 130.45 °C e T2 (c2, 75 Ω) = -63.33 °C. La retta di calibrazione viene quindi testata utilizzando una resistenza R = 100 Ω 0,1 %, a cui corrisponde una temperatura fittizia di 0°C, per verificare lo scarto rispetto alla misura attesa (fig. 2).

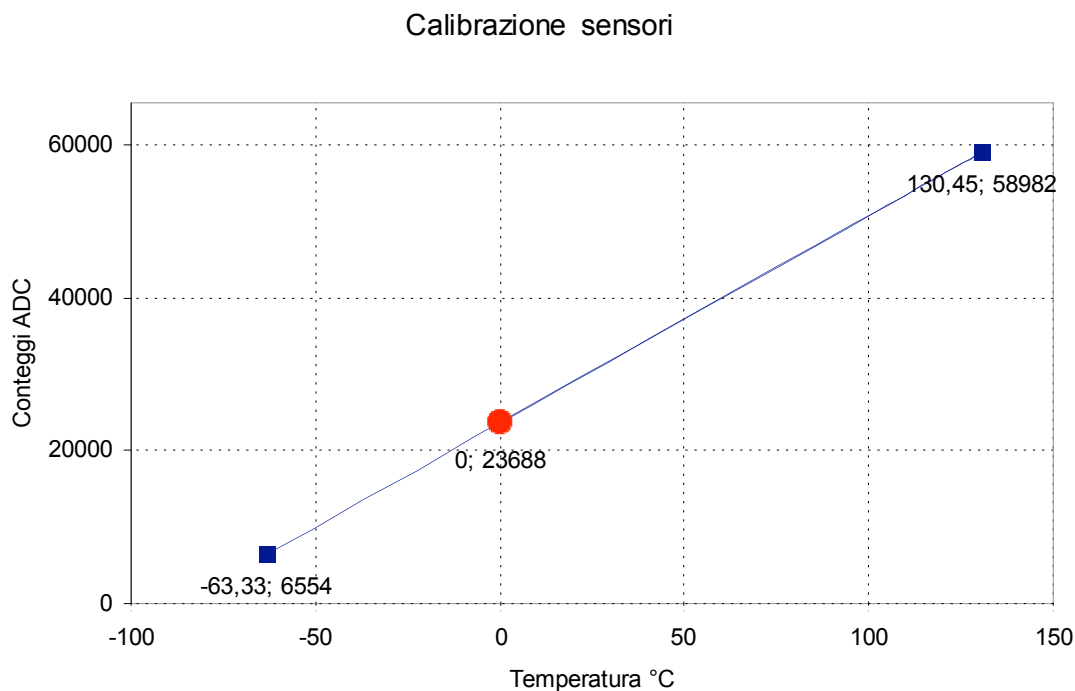


Figura 2. Retta di calibrazione delle resistenze di precisione.

Le sonde da calibrare sono state immerse in una soluzione a temperatura nota per verificare l'eventuale scarto dal valore atteso. I valori, corretti eventualmente da un offset, hanno definito una retta di calibrazione per ogni sensore, e sono stati memorizzati nel microcontrollore.

Per completare la taratura e per una intercomparazione tra i differenti sensori sono state simulate in laboratorio le condizioni termofisiche a cui il sistema di rilevamento può essere soggetto sul campo. Un campione di sabbia piroclastica, posto in un contenitore cilindrico in pirex (d = 20 cm, h = 14 cm), è stato sottoposto ad un ciclo di riscaldamento su un fornello elettrico. La porzione inferiore del campione è stata imbibita con acqua per tamponare la temperatura del provino a 100 °C ed ottenere rette di calibrazione per l'intervallo atteso in situ (10-100 °C). I sei sensori della stazione sono stati affiancati al centro del campione di sabbia ed immersi nella porzione asciutta del campione.

Il grafico di figura 3 mostra i valori di temperatura registrati ogni 15 minuti. Una divergenza piccola esiste tra i dati registrati ad alta temperatura. La calibrazione ha permesso di tarare la risposta dei sensori alle massime temperature.

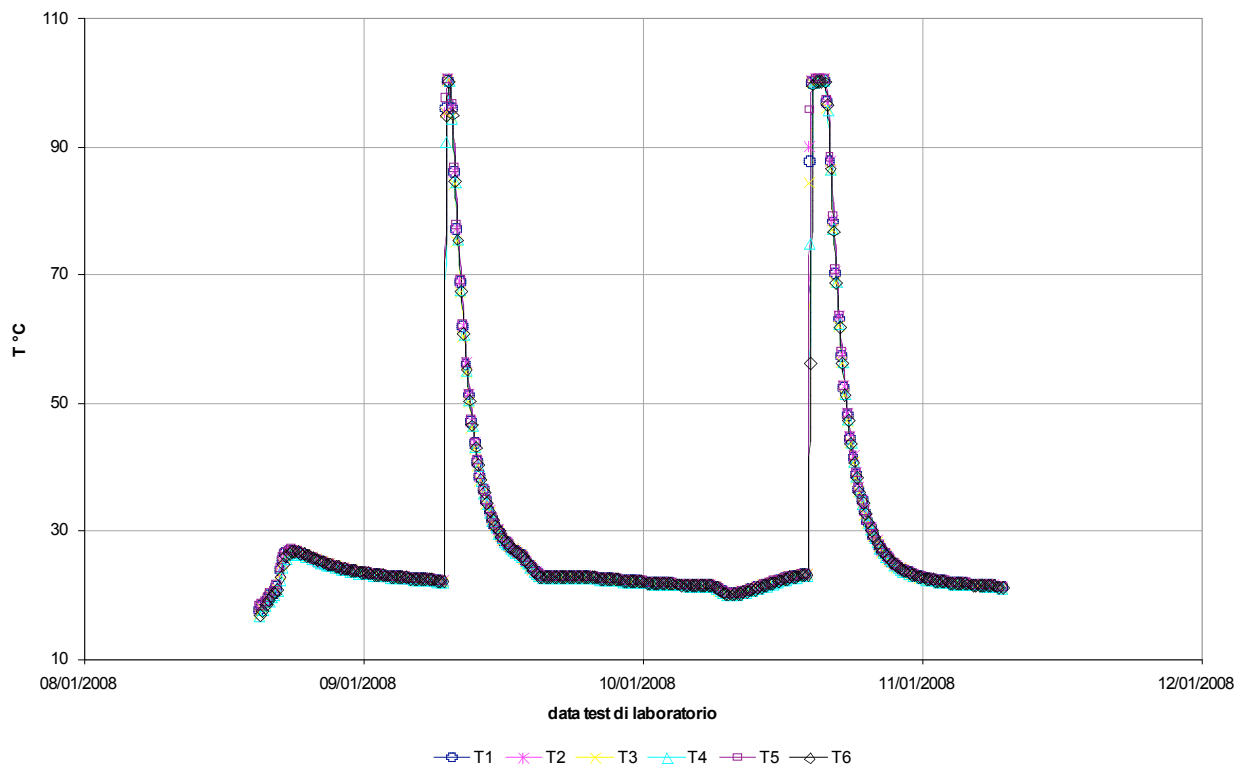


Figura 3. Andamento dei valori di temperatura durante due cicli di riscaldamento di un campione di suolo vulcanico. Tale risultati sono stati utilizzati per la taratura dei sensori.

3. Descrizione della stazione

Il funzionamento della stazione è schematizzato dal diagramma a blocchi riportato in figura 4. La stazione è alimentata (fig. 4, blocco ALIMENTAZIONE) da un sistema costituito da un pannello solare a 12V e 30W, un regolatore di carica e un accumulatore composto da 4 batterie al piombo-gel da 12V e 18Ah ciascuna. In questo modo, anche in assenza di energia solare, l'alimentazione della stazione è assicurata per un periodo di 3 settimane. Il datalogger (fig. 4, blocco DATALOGGER) gestisce il ciclo di acquisizione, memorizza i dati sulla sua memoria interna e li rende disponibili su richiesta, inoltre esso permette di minimizzare i consumi disattivando l'alimentazione alle periferiche negli intervalli di tempo in cui non devono effettuare misure o trasmettere i dati. Il datalogger è interfacciabile sia ai sensori con uscita analogica (8 canali), che ai sensori con uscita digitale attraverso il bus RS485 (Half Duplex) con protocollo MODBUS standard; inoltre il datalogger comunica attraverso il modem con un PC posto nella sala di monitoraggio dell'INGV - Sezione di Palermo tramite protocollo proprietario che viene interpretato dal software "Acquisition" in ambiente Linux. La trasmissione dei dati (fig. 4, blocco TRASMISSIONE DATI) avviene attraverso un modem GSM con ingresso RS232. Il sistema di rilevamento del gradiente (fig. 4, blocco SISTEMA DI RILEVAMENTO) è una periferica compatibile con tutti i dispositivi che supportano il bus RS485, il cui schema circuitale è riportato in figura 5. Un sistema di acquisizione a microcontrollore è interfacciato ai 6 sensori di temperatura tramite un circuito elettronico di alimentazione e condizionamento. Il microcontrollore campiona i segnali analogici, li elabora, li digitalizza e li rende disponibili sul bus RS485.

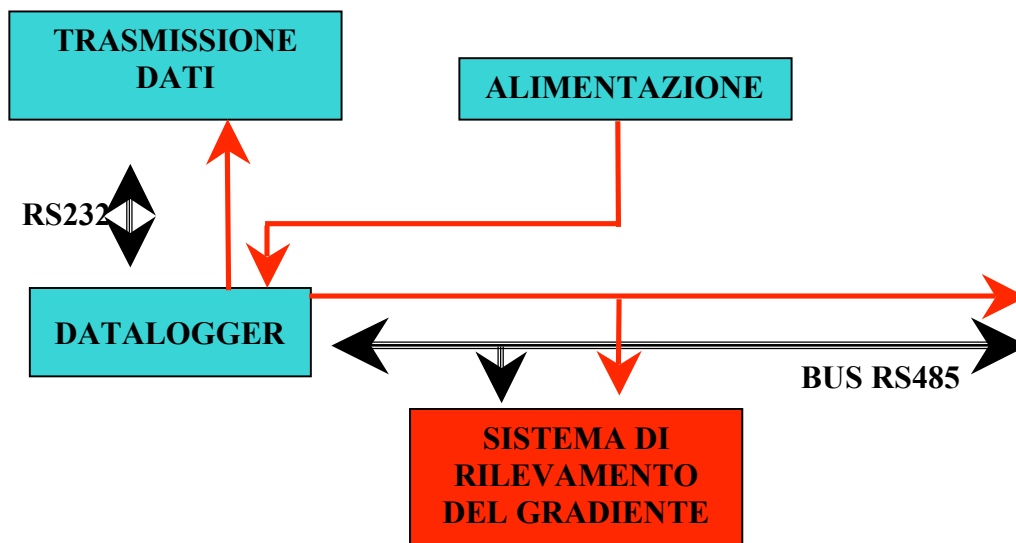


Figura 4. Diagramma a blocchi della stazione di monitoraggio.

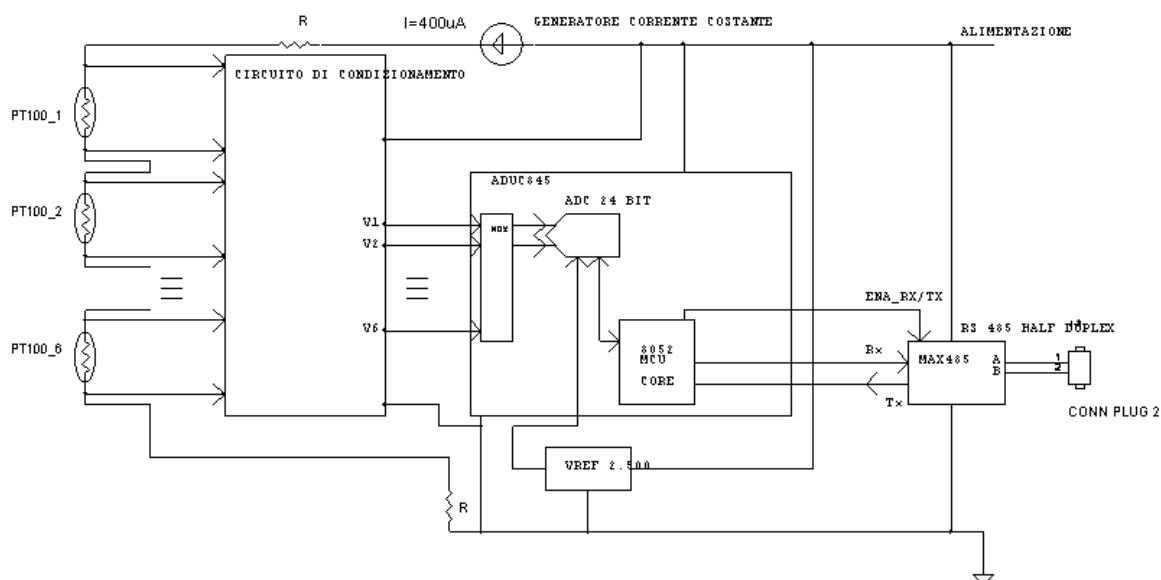


Figura 5. Schema circuitale del “SISTEMA DI RILEVAMENTO DEL GRADIENTE” di temperatura con bus RS485.

4. Descrizione del sito

La stazione Bordsud è stata installata nel bordo meridionale del cono di La Fossa (Lat: 38,401947 N Long: 14,963191 E), 500m a SE del campo fumarolico principale, il quale è ubicato nella porzione settentrionale dell’orlo craterico (fig. 6). Il sito di monitoraggio è posto su un alto strutturale e presenta elevata permeabilità del suolo, tali condizioni permettono alla pioggia di defluire velocemente dall’area di misura, minimizzando l’influenza delle precipitazioni sui parametri monitorati. Inoltre la stazione è stata interrata come mostrato nelle foto di figura 7 e figura 8, sia per diminuire l’impatto ambientale che per resistere alle particolari condizioni ostili di sito.

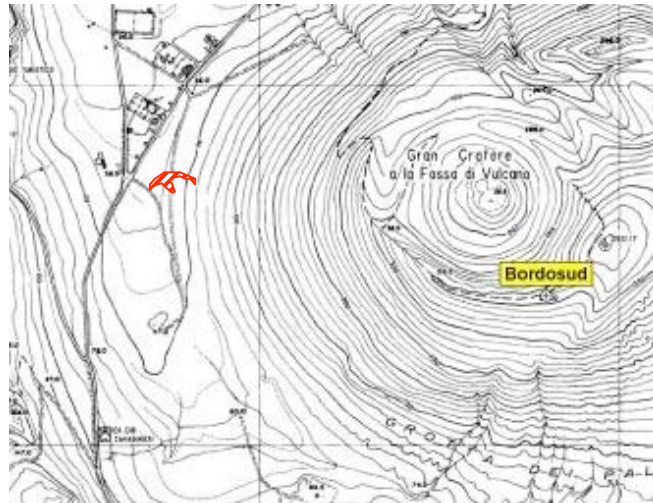


Figura 6. Stralcio di Tavoletta topografica (Foglio 244 II Lipari), con indicata l'ubicazione della stazione di misura (Bordosud) e del campo fumarolico di alta temperatura (area rossa tratteggiata).



Figura 7. Installazione della stazione in prossimità del sito monitorato.



Figura 8. Particolare della stazione di monitoraggio.

5. Discussione dei dati

Il profilo termico della stazione in condizioni di equilibrio è definito da un gradiente lineare medio di $60\text{ }^{\circ}\text{Cm}^{-1}$. Il grafico di figura 9 mostra due profili termici di riferimento per la stazione, relativi alle ore 16 (massima temperatura) ed alle ore 06 GMT (minima temperatura). Lo scostamento fra i valori di temperatura

per le 2 serie di valori corrisponde all'andamento del ciclo termico giorno-notte che si annulla in profondità. Il gradiente è stato calcolato fra 30 e 90 cm di profondità per rendere minimo l'effetto del ciclo solare giornaliero. Il profilo regolare conferma l'omogeneità dei parametri fisici del suolo e la retta di regressione presenta un coefficiente di correlazione $R^2 > 0.996$ (fig. 9), che conferma l'ipotesi di un trasporto di calore essenzialmente di tipo conduttivo, con sorgente di calore posta in basso e condensazione del vapore al di sotto del metro di profondità.

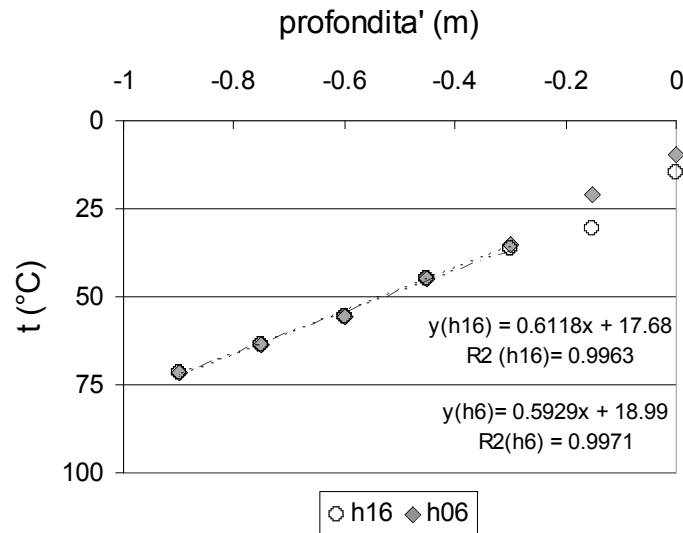


Figura 9. Misure di temperatura nel suolo lungo l'asse verticale registrate alle ore 06 ed alle ore 16 del 14-03-2008.

L'andamento delle curve di temperatura dei sensori più superficiali ha permesso di calcolare la diffusività termica del suolo dalla variabilità del ciclo giorno-notte, in condizioni stazionarie ed in assenza di pioggia. La relazione utilizzata per una curva di forma sinusoidale è:

$$\alpha = (\omega/2)[(Z_1-Z_2)/(\ln \Delta T_{Z_1} - \ln \Delta T_{Z_2})]^2 \quad [\text{Aubert et al., 2008}]$$

in cui ω è la frequenza dell'oscillazione considerata, Z è la profondità del sensore e ΔT è l'ampiezza del ciclo termico giorno-notte.

La conducibilità termica del sito, necessaria per calcolare il flusso di calore alla stazione è stata ricavata dalla formula $\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p = 0.64 \text{ Wm}^{-1}\text{°C}^{-1}$, in cui la diffusività ($\alpha = 4.72 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) è stata calcolata dal ciclo giorno-notte mostrato in figura 10, mentre i valori di densità ($\rho = 1500 \text{ kg m}^{-3}$) e calore specifico ($C_p = 900 \text{ J kg K}^{-1}$) del suolo sono stati ricavati da dati di letteratura [Tabbagh and Trezeguet, 1987].

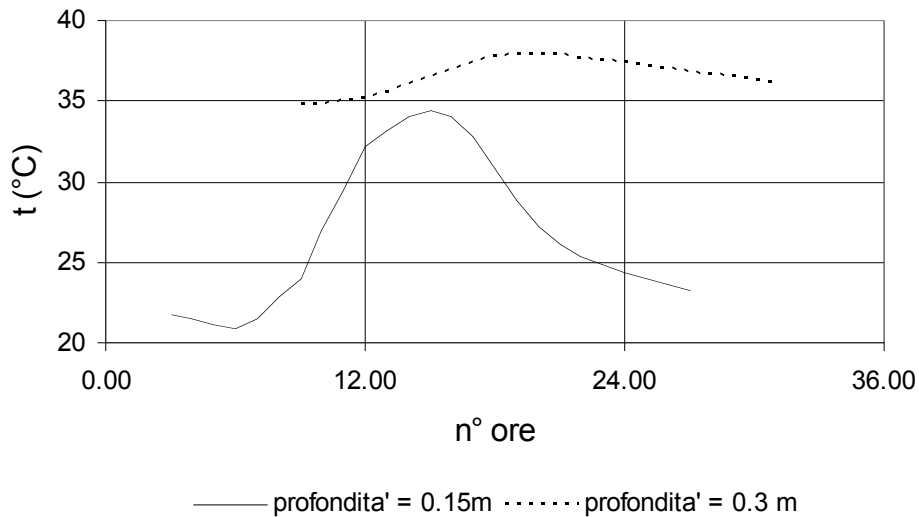


Figura 10. Andamento del ciclo termico giorno-notte registrato il 14-15 marzo 2008 nei livelli posti a 15 e 30 cm di profondità nella stazione Bordosud.

Ai fini della valutazione del flusso di calore superficiale, la serie temporale di dati è stata ricampionata, selezionando i dati registrati alle ore 12 di ogni giorno. In questo modo è stato annullato il disturbo causato dal ciclo solare giornaliero, filtrandone l'effetto sui livelli superficiali e migliorando la omogeneità dei dati lungo il profilo, senza alterare i valori di temperatura acquisiti.

I dati relativi al primo periodo di acquisizione (marzo-dicembre 2008) presentano un andamento stazionario, modulato dalle condizioni atmosferiche (fig. 11).

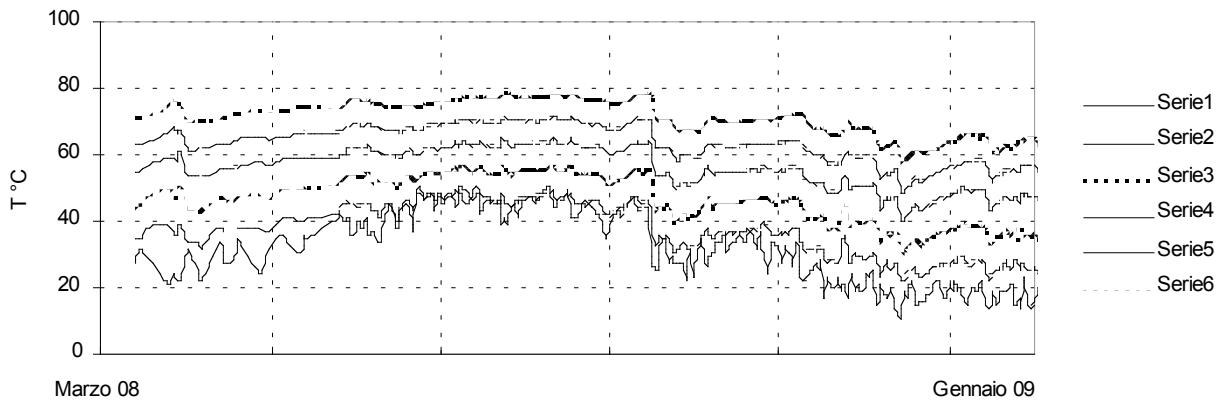


Figura 11. Temperature registrate a Bordosud lungo il profilo verticale di suolo, in legenda sono riportate le profondità dei sensori.

Il gradiente termico medio durante questo periodo è stato pari a circa $55 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1}$. Il coefficiente di regressione lineare è molto prossimo all'unità (fig. 12 asse destro), confermando l'omogeneità del profilo e la dominante conduttiva nel processo di trasporto del calore verso la superficie durante l'intero periodo di acquisizione. Il valore medio di flusso di calore superficiale è quindi $\Phi = \lambda \delta T / \delta Z = 0.64 \text{ Wm}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1} \cdot 55 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1} = 35.2 \text{ Wm}^{-2}$ con il massimo in inverno e il minimo in estate (fig. 12 asse sinistro). Considerando l'intero profilo del suolo gli scostamenti dalla media per il ciclo giorno-notte sarebbero minori del 10%.

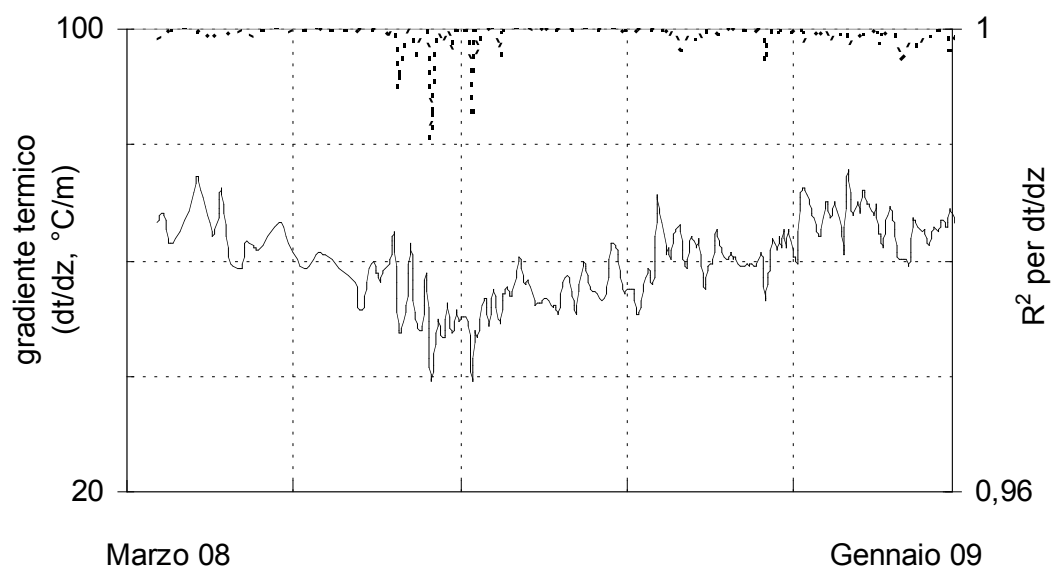


Figura 12. Gradiente termico ($^{\circ}\text{Cm}^{-1}$) calcolato fra 30 e 90 cm di profondità (asse sinistro del grafico); i valori di correlazione lineare calcolati lungo il profilo sono stati $> 0,99$ per l'intero periodo (asse destro). I valori minimi corrispondono ad eventi piovosi.

Bibliografia

Aubert, M., (1999). Practical evaluation of steady heat discharge from dormant active volcanoes: case study of Vulcarolo fissure (Mount Etna, Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 92, 413-429.

Aubert, M. and Alparone, S., (2000). Hydrothermal convective flux variation related to a seismo-tectonic crisis in the Fossa of Vulcano (Italy). *CR. Acad. Sc. Paris*, 330, 603-610

Aubert, M., Diliberto, I.S., Finizola, A, Chébli, Y., (2008). Double origin of hydrothermal convective flux variations in the Fossa of Vulcano (Italy). *Bull. Volcanol.*, Vol. 70, 743-751.

Badalamenti, B., Falsaperla, S., Neri, G., Nuccio, P.M., and Valenza, M., (1986). Confronto preliminare fra dati sismici e geochimici dell'area Lipari-Vulcano. *CNR-GNV Boll.* 1986, 37-47.

Diliberto, I.S., Alparone, S., Liotta, M., Madonia, P., (2007). Relationship between surface temperatures and seismic activity at Vulcano, Aeolian Island (Italy). *Geophysical Research Abstract*, vol. 9, 08553, 2007 SRef-ID:1607-7962

Diliberto, I.S., Gurrieri, S., Valenza, M., (2002). Relationships between diffuse CO₂ emissions and volcanic activity on the island of Vulcano (Aeolian Islands, Italy) during the period 1984-1994. *Bull. Volcanol.*, 64, 219-228.

Incropera, F.P, De Witt ,D.P., (2002). *Introduction to Heat Transfer*. John Wiley & Sons, Fifth edition, New York.

Tabbagh A., Trezeguet D., (1987). Determination of sensible heat flux in volcanic areas from ground temperature measurements along vertical profiles; the case study of Mount Etna (Sicily, Italy). *J. Geophys. Res.*, 92(B5), 3635-3644.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2010 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia