

RAPPORTI TECNICI INGV

Progettazione e realizzazione di un sistema per l'acquisizione in continuo della permeabilità all'aria *in situ* dei suoli



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

438

Direttore Responsabile

Valeria DE PAOLA

Editorial Board

Luigi CUCCI - Editor in Chief (luigi.cucci@ingv.it)
Raffaele AZZARO (raffaele.azzaro@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Mario CASTELLANO (mario.castellano@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Rosa Anna CORSARO (rosanna.corsaro@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Mauro DI VITO (mauro.divito@ingv.it)
Marcello LIOTTA (marcello.liotta@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Milena MORETTI (milena.moretti@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Umberto SCIACCA (umberto.sciacca@ingv.it)
Alessandro SETTIMI (alessandro.settimi1@istruzione.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)

Segreteria di Redazione

Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI
Robert MIGLIAZZA
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONI
Patrizia PANTANI
Tel. +39 06 51860068
redazione@ingv.it

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO

© 2014 INGV Istituto Nazionale
di Geofisica e Vulcanologia
Rappresentante legale: Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

RAPPORTI TECNICI INGV

Progettazione e realizzazione di un sistema per l'acquisizione in continuo della permeabilità all'aria *in situ* dei suoli

Design and construction of a system for continuous acquisition of the in situ air permeability of soils

Vincenzo Prano, Marco Camarda e Santo Cappuzzo

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo

Accettato 6 agosto 2021 | Accepted 6 August 2021

Come citare | How to cite Prano V., Camarda M., Cappuzzo S., (2022). Progettazione e realizzazione di un sistema per l'acquisizione in continuo della permeabilità all'aria in situ dei suoli. Rapp. Tec. INGV, 438: 1-18, <https://doi.org/10.13127/rpt/438>

In copertina Scheda elettronica; elaborazione di B. Angioni | Cover Electronic board; processed by B. Angioni

438

INDICE

Riassunto	7
<i>Abstract</i>	7
Introduzione	7
1. Sistema per la misura indiretta della permeabilità <i>in situ</i>	8
2. Calibrazione del metodo	9
3. Sistema di acquisizione in continuo della permeabilità e del VWC	12
4. Conclusioni	14
Bibliografia	14

Riassunto

In questo rapporto tecnico viene illustrato un nuovo metodo indiretto per la stima della permeabilità all'aria dei suoli. Il nuovo metodo si basa semplicemente sulla misura della pressione (pressione di sonda), generata pompando un flusso costante d'aria all'interno di una speciale sonda inserita nel terreno. Per calibrare il metodo, sono state eseguite alcune misure di pressione di sonda in alcuni suoli dell'isola di Vulcano, caratterizzati da differenti valori di permeabilità all'aria. Inoltre vengono illustrati anche gli aspetti tecnici di un nuovo strumento per l'acquisizione in continuo della permeabilità dei suoli, basato sul nuovo metodo indiretto.

Abstract

A new indirect method of estimating in situ soil air permeability is presented in this technical report. The new method is simply based on the measurement of air pressure (probe pressure) generated by pumping a constant air flux inside a special designed probe inserted into the soil. To calibrate the method, some measurements of the probe pressure were performed in some soils of the island of Vulcano, characterized by different values of the air permeability. Furthermore, technical aspects of a new device for performing continuous acquisition of the air permeability based on the new indirect method, were also described.

Keywords Permeabilità all'aria dei suoli; Emissioni di gas dai suoli; Contenuto volumetrico d'acqua dei suoli | Soil air permeability; Soil gas emissions; Volumetric soil water content

Introduzione

La caratteristica principale che determina l'efficienza del trasporto dei gas attraverso un mezzo poroso è la permeabilità. La sua conoscenza è pertanto fondamentale, ad esempio, negli studi che riguardano il degassamento dei suoli [Camarda et al., 2017], il movimento di inquinanti tossici e radioattivi nei suoli e nelle relative valutazioni di pericolosità [Kemski et al., 2001; Szabó et al., 2014]. È quindi di enorme importanza ottenere delle informazioni sulle caratteristiche fondamentali dei mezzi che i fluidi attraversano, in modo da poter elaborare dei modelli di degassamento utili sia nel campo della ricerca che in ambito sociale, come ad esempio nelle stime del gas hazard [Hodgson et al., 1992; Jain et al., 2005]. La permeabilità all'aria ed in generale ai gas è una proprietà molto complessa dei suoli che dipende sia dalle caratteristiche intrinseche che dalle condizioni specifiche dei suoli, quali la porosità, la struttura, la tortuosità, la superficie specifica, ed il contenuto volumetrico d'acqua. Quest'ultimo parametro ha una grande importanza nel trasporto dei gas, in quanto regola lo spazio disponibile per il movimento dei gas nella struttura porosa. Mentre le proprietà intrinseche del suolo rimangono pressoché costanti nel tempo, il contenuto volumetrico d'acqua subisce delle variazioni significative nel corso dell'anno a causa principalmente dell'alternarsi di periodi piovosi e di siccità. Questo può determinare delle variazioni di permeabilità dei suoli che si riflettono sul flusso dei gas. In letteratura esistono dei modelli di filtrazione che permettono di legare la permeabilità dei suoli al loro contenuto d'acqua, uno di questi è quello elaborato da Millington e Quirk [1961]. Questo modello esprime la permeabilità del mezzo poroso in funzione del rapporto fra la porosità occupata dall'aria

(porosità effettiva) e la porosità totale del mezzo. La porosità effettiva, pertanto, è legata al grado di saturazione del mezzo poroso. Moldrup et al. [1998] hanno pubblicato i risultati di uno studio sulle relazioni fra la permeabilità e la porosità effettiva di suoli a differenti valori di porosità totale. Da questi risultati si evince che, ad una determinata porosità totale, la permeabilità aumenta al crescere della porosità effettiva e che tale aumento è più sensibile nei suoli con una maggiore porosità totale. I suoli molto permeabili, possono diventare poco permeabili al crescere del grado di saturazione in acqua.

Questo rapporto tecnico illustra lo sviluppo e la messa a punto di un metodo indiretto, di facile utilizzo, per la stima in continuo della permeabilità all'aria dei suoli. Questa metodologia è stata impiegata per mettere a punto un sistema per l'acquisizione in automatico ed in continuo di importanti caratteristiche dei suoli, in particolare la permeabilità, la temperatura ed il contenuto volumetrico d'acqua. Il nuovo sistema costituisce un'unità a sé stante in grado di monitorare le caratteristiche più importanti del suolo, che hanno una diretta influenza sul trasporto dei gas nei suoli e sui processi di produzione dell'anidride carbonica.

1. Sistema per la misura della permeabilità *in situ*

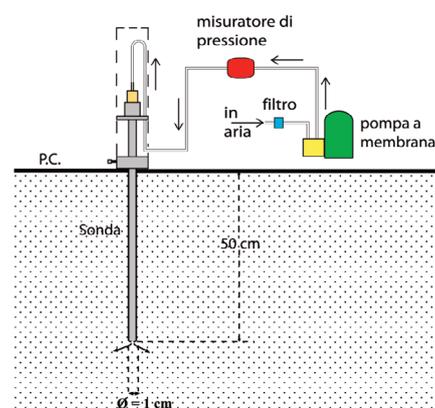
Il nuovo metodo di misura indiretta della permeabilità all'aria dei suoli, si basa sulla capacità di un mezzo poroso di lasciarsi attraversare da un flusso d'aria. Il metodo consiste nell'immettere all'interno del suolo un flusso costante d'aria, tramite una speciale sonda e nel misurare la pressione che si viene a creare all'interno di questa (Figura 1). Tale pressione infatti dipende strettamente, a parità di flusso di massa di gas immesso nel suolo, dalla capacità che esso ha di smaltire tale flusso, cioè dalla sua permeabilità. Per comprendere meglio questo concetto, si ricorda che il flusso di massa è pari al prodotto del flusso di gas (φ) per la sua densità (ρ).

$$\varphi_{M_{gas}} = \varphi_{gas} \cdot \rho_{gas}$$

questa si può anche scrivere come segue:

$$\varphi_{M_{gas}} = \varphi_{gas} \cdot P_{gas}$$

Figura 1 Schema del nuovo sistema per la misura della permeabilità all'aria dei suoli.
Figure 1 Schematic representation of the new system for measuring soil air permeability.



Il flusso di massa del gas che viene immesso nel suolo è sempre costante, mentre il flusso di gas che viene smaltito dal suolo varia al variare della sua permeabilità. Se la permeabilità del suolo è bassa, il gas viene smaltito con difficoltà; al contrario, se la permeabilità è elevata, il gas viene smaltito in maniera efficiente.

Poiché

$$\varphi_{M_{gas}} = \varphi_{gas} \cdot P_{gas} = cost \quad (1.1)$$

ne consegue che quando la permeabilità del suolo è alta (flusso di gas elevato) la pressione del gas all'interno della sonda è bassa mentre, quando essa è bassa (flusso di gas minore) la pressione del gas è maggiore. Da ciò si evince che esiste una relazione fra la pressione del gas all'interno della sonda e la permeabilità del suolo.

Per generare il flusso d'aria viene utilizzata una pompa a membrana, modello SP 620 EC-HR prodotta dalla Schwarzer Precision, che è in grado di generare un flusso d'aria libero di 4.5 L/m. Per disperdere il gas nel suolo si utilizza una speciale sonda di metallo di 60 cm di lunghezza munita di due fori (Figura 2): i) il foro superiore, del diametro di 2 cm, consente l'ingresso dell'aria all'interno della sonda; ii) il foro inferiore, della sezione di 1 cm, consente all'aria iniettata all'interno della sonda di disperdersi attraverso il suolo. Nel foro superiore della sonda viene innestato uno speciale tappo a tenuta ermetica che ha la funzione di collegare la sonda alla pompa ed a un trasduttore di pressione (Figura 1).

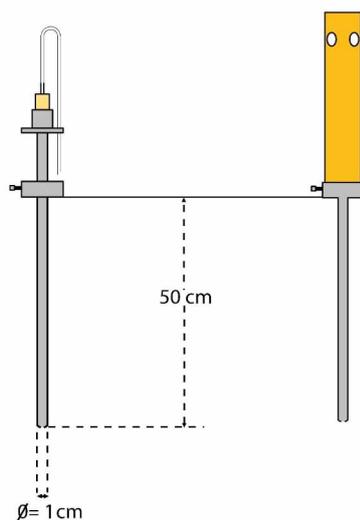


Figura 2 Sonda utilizzata per le misure di permeabilità.
Figure 2 Probe used for permeability measurements.

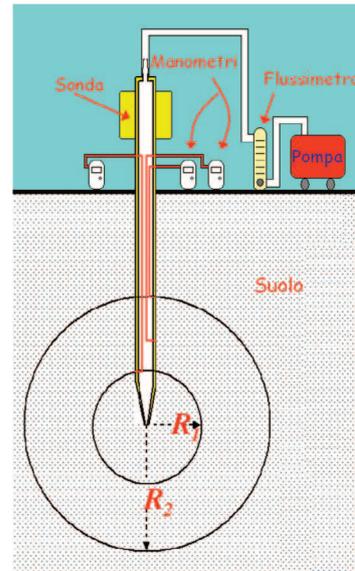
Una volta azionata la pompa, la pressione generata all'interno della sonda viene misurata attraverso il trasduttore di pressione, fornendo una misura della capacità del suolo di farsi attraversare dal flusso d'aria e quindi della permeabilità del suolo all'aria. Per infiggere la sonda nel suolo si inserisce al suo interno una speciale anima di acciaio estraibile, della stessa lunghezza della sonda. Quest'ultima ha lo scopo di prevenire l'occlusione del foro di emissione ed il danneggiamento della parte superiore della sonda, che deve garantire la tenuta ermetica all'aria. Una volta infissa la sonda (fino alla profondità di 50 cm) si estrae l'anima e si inserisce il tappo a tenuta ermetica e, dopo aver azionato la pompa, si procede con misura della pressione.

2. Calibrazione del metodo

Per poter ottenere il valore di permeabilità di un suolo attraverso la misura di pressione effettuata con il metodo indiretto illustrato in precedenza, è necessario conoscere la relazione che lega la pressione misurata e la permeabilità. A tale scopo il nuovo sistema per la stima in continuo della

permeabilità in situ è stato sottoposto ad una calibrazione in campo, effettuando misure di pressione di sonda in terreni a permeabilità differente e nota. Tale permeabilità è stata accuratamente misurata in ciascun sito con il metodo della convezione sferica [Camarda et al., 2006], che permette di ottenere delle misure assolute, direttamente in situ, della permeabilità dei suoli. Questo metodo si basa sulla teoria dell'advezione radiale dei gas attraverso i mezzi porosi isotropi. Gli stessi autori hanno effettuato test sul campo impiegando un'apparecchiatura capace di generare una sorgente puntiforme di gas all'interno del suolo attraverso una sonda provvista di manometri ad acqua situati a diversa profondità (Figura 3).

Figura 3 Dispositivo per la misura della permeabilità in situ all'aria dei suoli [Camarda et al., 2006].
Figure 3 Device for measuring the in situ air permeability of soils [Camarda et al., 2006].



L'ipotesi che sta alla base del modello dell'advezione radiale è che, considerando il suolo come un mezzo omogeneo rispetto alla permeabilità al gas ($k = \text{costante}$), il fluido rilasciato dalla sorgente puntiforme interna si propaga radialmente formando superfici isobare sferiche. In un sistema siffatto, la differenza di flusso di gas attraverso due superfici isobare contigue dipende dal flusso di gas della sorgente, dalla differenza di pressione tra le due superfici e dalla permeabilità (k) del mezzo attraversato. Conoscendo il flusso e misurando la differenza di pressione si può calcolare la permeabilità al gas. In termini matematici, l'equazione del flusso volumetrico di gas attraverso un guscio sferico di raggio R_1 , è data da:

$$k = \frac{\mu \varphi_r}{2\pi} \frac{R_1 - R_2}{R_1 R_2} \frac{P_1}{(P_2^2 - P_1^2)} \quad (1.2)$$

Dove k è la permeabilità del suolo, P_1 e P_2 sono le pressioni misurate in corrispondenza delle superfici sferiche di raggio R_1 e R_2 e μ è la viscosità del gas.

Per effettuare la taratura del metodo, si è scelta l'isola di Vulcano. Essa rappresenta per tutti gli studiosi di scienze della terra uno straordinario laboratorio naturale ove sperimentare metodi di misura e di campionamento e studiare diversi tipi di processi legati al vulcanismo. L'isola è caratterizzata dalla presenza di suoli giovani, costituiti principalmente da materiale piroclastico. Per la taratura, sono stati selezionati nove siti, sulla base delle conoscenze acquisite tramite un precedente studio [Camarda et al., 2006]. Per ogni sito è stata misurata la pressione con il nuovo sistema di misura, e contestualmente è stata determinata la permeabilità all'aria effettuando alcune misure con il metodo dell'advezione sferica.

La Tabella 1 riporta i valori di permeabilità misurati con il metodo dell'advezione sferica ed i corrispondenti valori di pressione ottenuti tramite il metodo indiretto da tarare.

Sito	Permeabilità con il Metodo della convezione sferica (Darcy)	Pressione misurata con il metodo indiretto (mbar)
P4	48.87	6.60
P6	62.84	3.20
P8	33.90	13.00
P12	10.19	35.1
P18	6.34	63.00
P30	10.47	34.70
P38	20.00	18.00
P40	9.46	38.00
P41	32.57	10.40
P43	6.94	67.00

Tabella 1 Valori sperimentali di permeabilità all'aria e valori di pressione misurati in alcuni suoli dell'isola di Vulcano.

Table 1 Experimental values of air permeability and pressure measured in some soil in the island of Vulcano.

Per poter conoscere la relazione che lega i valori di pressione e di permeabilità è stato costruito un grafico, in cui nelle ascisse sono stati riportati i valori di pressione e nelle ordinate, i corrispondenti valori di permeabilità ottenuti con il metodo della convezione sferica. Tale relazione è fornita dall'equazione di best fitting dei dati sperimentali di Figura 4. In tale caso è la curva di equazione:

$$k = 209,72 \cdot \Delta P^{-0,826} \tag{1.3}$$

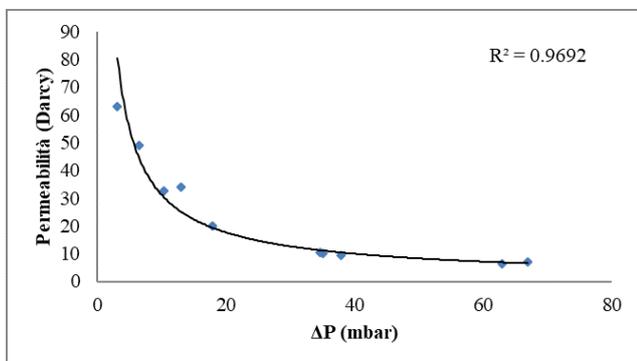


Figura 4 Grafico della relazione tra permeabilità espressa in Darcy e ΔP misurato con il metodo indiretto espresso in mbar.

Figure 4 Graph of the relationship between permeability expressed in Darcy and ΔP measured with the indirect method expressed in mbar.

Tale equazione evidenzia una relazione di tipo esponenziale tra la permeabilità ed il valore di pressione misurato all'interno della sonda. È importante tenere presente che l'equazione (1.3) è valida solo se le misure di pressione sono eseguite impiegando il medesimo sistema di misura

(in particolare la pompa a membrana e la sonda) utilizzato per ottenere la curva. Inoltre, è importante controllare periodicamente che la pompa in questione emetta sempre lo stesso flusso di gas e che la sonda sia sempre infissa alla stessa profondità.

Infatti, se la sonda è infissa ad una profondità inferiore a quella stabilita, lo spessore del pacco di sedimento compreso tra la superficie di campagna e la parete forata della sonda è più piccolo. In questo modo il gas sarà smaltito più facilmente e la permeabilità ottenuta tramite l'equazione (1.3) risulterà sovrastimata.

Rispetto al metodo dell'advezione sferica, il nuovo metodo ha il vantaggio di essere molto più pratico e di facile utilizzo, in quanto consente di stimare la permeabilità all'aria del suolo semplicemente misurando un valore di pressione, inoltre, vista la sua semplicità, si presta bene ad essere utilizzato per l'acquisizione in continuo della permeabilità all'aria in situ. Questo ultimo aspetto è di notevole importanza sia in campo agrario, che nello studio del movimento degli inquinanti attraverso i suoli ed in vulcanologia, in quanto consente di conoscere e stimare le variazioni temporali della permeabilità all'aria e la sua influenza sulle emissioni di anidride carbonica o di altri gas del suolo. Nel paragrafo successivo sarà illustrato un innovativo sistema per il monitoraggio in continuo della permeabilità all'aria dei suoli basato sul metodo indiretto descritto in precedenza.

3. Sistema di acquisizione per la misura della permeabilità e del VWC

Tutte le componenti descritte in precedenza (pompa a membrana e sensore di pressione) sono state alloggiare all'interno di una scatola a tenuta stagna (Figura 5).

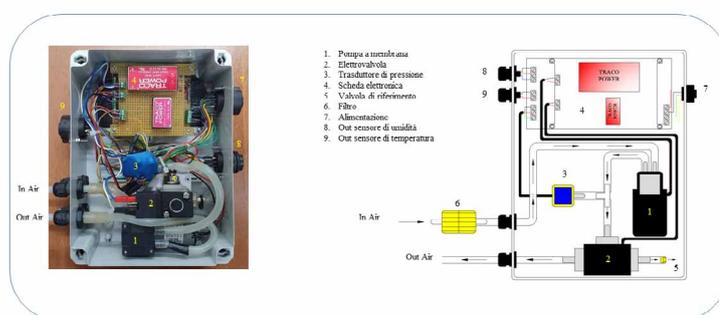


Figura 5 Foto e schema della scatola ermetica con il suo contenuto.
Figure 5 Photo and schematic diagram of the hermetic box with its contents.

Nel precedente paragrafo abbiamo sottolineato che per stimare la permeabilità dei suoli attraverso l'equazione (1.3) è strettamente necessario che le caratteristiche del sistema di misura, in particolare il flusso della pompa, rimangano costanti nel tempo. Per verificare che questa condizione sia soddisfatta, all'inizio di ogni ciclo di misura, il flusso d'aria generato dalla pompa viene fatto passare attraverso una valvola di riferimento. Infatti, se le caratteristiche della pompa rimangono costanti nel tempo (quindi la sua efficienza) il valore di pressione misurato quando il flusso d'aria passa attraverso la valvola di riferimento deve essere sempre uguale (o almeno all'interno dell'errore nella misura di pressione). Dopo aver effettuato questa misura di controllo (pressione di riferimento), il flusso d'aria viene automaticamente deviato, tramite un'elettrovalvola a tre vie, verso la sonda di misura infissa nel suolo e viene effettuata la misura della pressione, correlata alla permeabilità tramite l'equazione (1.3) (pressione di sonda).

Per misurare la pressione è stato utilizzato un sensore MPX2100AP della Freescale Semiconductor, che misura la pressione assoluta in un range da 0 a 100 kPa.

Oltre a misurare il valore di pressione di sonda e di riferimento, il sistema di misura in continuo è stato anche equipaggiato con altri due sensori che consentono di misurare la temperatura ed il contenuto volumetrico d'acqua (VWC), due importanti caratteristiche fisiche del suolo. In particolare, per misurare la temperatura si è adoperato un sensore del tipo AD592CN racchiuso all'interno di un cilindretto in acciaio inossidabile. Tale sensore consente di apprezzare variazioni di temperatura di 0.5° C nel range da -25 a 105° C. Per la misura del contenuto volumetrico d'acqua, si è utilizzato il sensore 10 HS Decagon Devices (Figura 6). In tal modo è possibile stimare il contenuto volumetrico di acqua (VWC) misurando la costante dielettrica del suolo tramite una tecnologia capacitiva. Lavorando alla frequenza di 70 MHz, il sensore riduce al minimo l'influenza della salinità e gli effetti strutturali, rendendolo preciso nella maggior parte dei terreni.

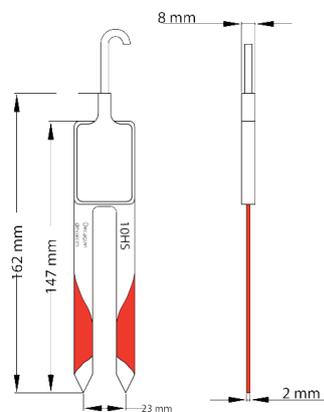


Figura 6 Sensore di umidità del suolo (10HS Decagon Devices).

Figure 6 Soil moisture sensor (10HS Decagon Devices).

Tutte le operazioni necessarie per l'acquisizione dei vari parametri fisici misurati nel suolo, vengono gestite da una scheda elettronica (Figura 7) appositamente progettata e realizzata in laboratorio, basata sul microprocessore ADuC845 (Analog Device), un microcontrollore che contiene al suo interno un convertitore ADC (convertitore analogico digitale) a 24bit, un'interfaccia hardware seriale ed una notevole quantità di memoria programma (64Kb) e dati (2Kb), sufficiente per poter implementare tutte le routine necessarie per l'elaborazione dei segnali analogici e per generare il protocollo di comunicazione MODBUS. Per rendere semplice il progetto costruttivo, l'elettronica è stata articolata in due schede, separando la parte di condizionamento dei sensori e gestione della potenza (scheda di potenza), dalla parte a microcontrollore e trasmissione seriale RS485. La scheda di potenza genera i livelli di tensione necessari per l'alimentazione dei sensori, per l'attivazione dell'elettrovalvola e della pompa, e per l'alimentazione pulsante necessaria per il funzionamento del sensore che misura il VWC.

I segnali elettrici generati dai sensori, vengono condizionati con opportuni circuiti elettronici analogici ed inviati al sistema di acquisizione a microcontrollore. Il firmware implementato nel microcontrollore, in linguaggio C, genera i segnali di comando necessari per la corretta sequenza di comando della scheda di potenza, gestisce il convertitore ADC, elabora i segnali digitali generati, applica le rette di calibrazione necessarie per convertire in valori numerici i segnali elettrici generati dai sensori ed impacchetta detti valori in una stringa di dati, compatibili con il protocollo MODBUS RTU. Infine il firmware gestisce la porta seriale hardware del microcontrollore e gestisce la comunicazione RS485, rendendo disponibile la stringa dei dati generata ad ogni richiesta della stazione di monitoraggio. I dati così trasmessi vengono immagazzinati nella memoria del datalogger presente all'interno della stazione di monitoraggio. I valori di pressione di sonda acquisiti dal sistema e trasmessi dalla stazione sono

successivamente convertiti in valori di permeabilità in accordo all'equazione (1.3) utilizzando un semplice foglio di calcolo Excel. Il sistema messo a punto costituisce quindi un'unità a sé stante in grado di monitorare le caratteristiche più importanti del suolo.

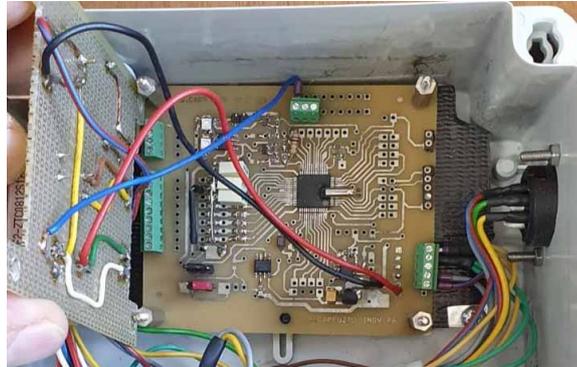


Figura 7 Foto della scheda elettronica.
Figure 7 Electronic board photo.

4. Conclusioni

Il metodo indiretto descritto in questo rapporto tecnico consente di eseguire veloci stime della permeabilità in situ dei suoli, semplicemente attraverso la misura di un valore di pressione acquisito tramite l'utilizzo di una strumentazione abbastanza semplice (pompa a membrana, trasduttore di pressione e sonda metallica con foro di emissione di 1cm di sezione). Il metodo è stato impiegato per costruire un sistema di acquisizione in continuo della permeabilità, della temperatura e del contenuto volumetrico d'acqua dei suoli, da accoppiare - per esempio - ad una stazione di monitoraggio del flusso di CO₂ emesso dai suoli. Il nuovo sistema costituisce un'unità a sé stante in grado di monitorare le caratteristiche più importanti del suolo che hanno una diretta influenza sul trasporto dei gas nei suoli e sui processi di produzione dell'anidride carbonica.

Bibliografia

- Camarda M., Gurrieri S. and Valenza M., (2006). In situ permeability measurements based on a radial gas advection model: relationships between soil permeability and diffuse CO₂ degassing in volcanic areas. *Pure and Applied Geophysics* 163(4), 897-914. <https://doi.org/10.1029/2005JB003898>
- Camarda M., Prano V., Cappuzzo S., Gurrieri S. and Valenza M., (2017). Temporal variations in air permeability and soil CO₂ flux in volcanic ash soils (island of Vulcano, Italy). *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 18, 3241–3253. <https://doi.org/10.1002/2017GC006857>
- Hodgson A.T., Garbesi K., Sextro R.G. and Daisey J.M., (1992). Soil-gas contamination and entry of volatile organic compounds into a house near a landfill. *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 42(3), 277–283. <https://doi.org/10.1080/10473289.1992.10466990>
- Jain P., Powell J., Townsend T. and Reinhart D., (2005). Air permeability of waste in a municipal solid waste landfill. *J. Environ. Eng.*, 131(11), 1565–1573. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1996\)122:9\(800\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1996)122:9(800))
- Kemski J., Siehl A., Stegemann R. and Valdivia-Manchego M., (2001). Mapping the geogenic

radon potential in Germany. *Sci. Total Environ.*, 272, 217–230.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00696-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00696-9)

Millington, R.J. and Quirk J.M., (1961). Permeability of porous solids. *Trans. Faraday Soc.* 57:1200-1207.

Moldrup P., Poulsen T.G., Schjonnig P., Olsen T. and Yamaguchi T., (1998). Gas permeability in undisturbed soils: measurement and predictive models. *Soil Science* vol. 163, n° 3.

Szabó, K.Z., Jordan G., Horváth Á. and Szabó C., (2014). Mapping the geogenic radon potential: Methodology and spatial analysis for central Hungary, *J. Environ. Radioact.*, 129, 107–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.12.009>

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/>

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/>

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651

http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale e impaginazione

Francesca DI STEFANO, Rossella CELI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico e impaginazione

Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

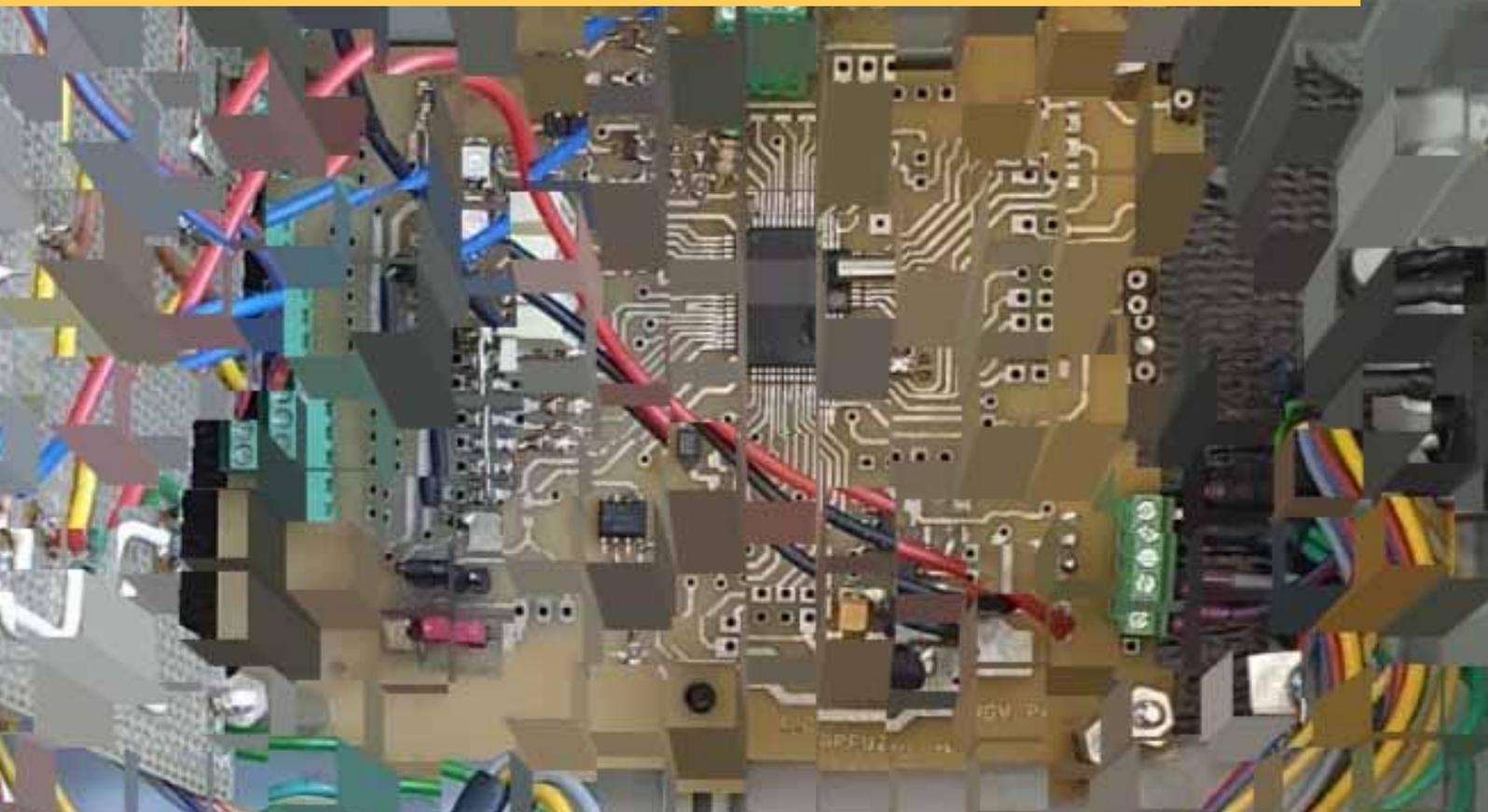
©2022

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it



Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

