

che rappresentano una soluzione interessante per la climatizzazione, soprattutto negli edifici di nuova realizzazione. Si rende però necessaria l'emanazione di una legislazione chiara e, preferibilmente, a livello nazionale. Nei contesti urbani è inoltre necessaria una pianificazione territoriale, soprattutto per gli impianti open loop, il cui disturbo termico in falda può estendersi per centinaia di metri a valle dell'impianto.

Bibliografia

- Al-Khoury, R., Köbel, T., e Schramedei, R., 2010. Efficient numerical modeling of borehole heat exchangers. *Computers and Geosciences*, 36(10), pp. 1301-1315.
- Banks, D., 2009a. An introduction to 'thermogeology' and the exploitation of ground source heat. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, pp. 283-293.
- Banks, D., 2009b. Thermogeological assessment of open-loop well-doublet schemes: a review and synthesis of analytical approaches. *Hydrogeology Journal*, 17(5), pp. 1149-1155.
- Bauer, D., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H., e Diersch, H. J. G., 2011. Thermal resistance and capacity models for borehole heat exchangers. *International Journal of Energy Research*, 35(4), pp. 312-320.
- Brielmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., e Lueders, T., 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology*, 68(3), pp. 273-286.
- Caleffi, M., Guidetti, F., Casarino, S., Crimella, A., Doninelli, M., Doninelli, M., Mazzetti, D., Planca, R., Soldarini, A., Tadini, C., Tadini, M., e Tomasoni, M., 2010. Impianti a pompe di calore geotermiche. Idrraulica Caleffi, Poligrafica Moderna S.r.l. Novara, Novara.
- Delaleux, F., Py, X., Olives, R., e Dominguez, A., 2012. Enhancement of geothermal borehole heat exchangers performances by improvement of bentonite grouts conductivity. *Applied Thermal Engineering*, 33-34(1), pp. 92-99.
- Deng, Z., Rees, S. J., e Spitler, J. D., 2005. A model for annual simulation of standing column well ground heat exchangers. *HVAC and R Research*, 11(4), pp. 637-655.
- DHI-WASY, 2002. FEFLOW User Manual, DHI-Wasy, Berlin.
- Di Molfetta, A., e Sethi, R., 2012. Ingegneria degli acquiferi, Springer-Verlag Italia, Milano.
- EIA, U. S., 2009. US Energy Information Administration - International Energy Statistics.
- Eskilson, P., 1987. Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Lund University (Sweden).
- EurObserver, 2011. 11th EurObserver Report - The state of renewable energies in Europe.
- Ferguson, G., e Woodbury, A. D., 2006. Observed thermal pollution and post-development simulations of low-temperature geothermal systems in Winnipeg, Canada. *Hydrogeology Journal*, 14(7), pp. 1206-1215.
- Fry, V. A., 2009. Lessons from London: regulation of open-loop ground source heat pumps in central London. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 42, pp. 325-334.
- Gehlin, S., 2002. Thermal Response Test - Method Development and Evaluation, Lulea University of Technology, Lulea (Sweden).
- Gustafsson, A. M., e Westerlund, L., 2011. Heat extraction thermal response test in groundwater-filled borehole heat exchanger - Investigation of the borehole thermal resistance. *Renewable Energy*, 36(9), pp. 2388-2394.
- Haehnlein, S., Bayer, P., e Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), pp. 2611-2625.
- Hecht-Mendez, J., Molina-Giraldo, N., Blum, P., e Bayer, P., 2010. Evaluating MT3DMS for Heat Transport Simulation of Closed Geothermal Systems. *Ground Water*, 48(5), pp. 741-756.
- Hellstrom, G., e Sanner, B., 2000. Earth Energy Designer, User Manual Version 2.0.
- Holm, A., Blodgett, L., Jennejohn, D., e Gawell, K., 2010. Geothermal energy; international market update. Geothermal energy association.
- Klotzbücher, T., Kappler, A., Straub, K. L., e Haderlein, S. B., 2007. Biodegradability and groundwater pollutant potential of organic anti-freeze liquids used in borehole heat exchangers. *Geothermics*, 36(4), pp. 348-361.
- Lamarche, L., Kaji, S., e Beauchamp, B., 2010. A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. *Geothermics*, 39(2), pp. 187-200.
- Lo Russo, S., Boffa, C., e Civita, M. V., 2009. Low-enthalpy geothermal energy: An opportunity to meet increasing energy needs and reduce CO₂ and atmospheric pollutant emissions in Piemonte, Italy. *Geothermics*, 38(2), pp. 254-262.
- Lund, J. W., 2004. Geothermal energy use compared to other renewables. *Geo-Heat Center Quarterly Bulletin*, 28(4), pp. 10-12.
- Orio, C. D., Johnson, C. N., Rees, S. J., Chiasson, A., Deng, Z., e Spitler, J. D., 2005. A Survey of Standing Column Well Installations in North America. *ASHRAE Transactions*, 111(2), pp. 109-121.
- Pahud, D., e Hubbuch, M., 2007. "Measured Thermal Performances of the Energy Pile System of the Dock Midfield at Zurich Airport." *European Geothermal Congress, Unterhaching (Germany)*, pp. 7.
- Saner, D., Juraske, R., Kübert, M., Blum, P., Hellweg, S., e Bayer, P., 2010. Is it only CO₂ that matters? A life cycle perspective on shallow geothermal systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), pp. 1798-1813.
- Sethi, R., e Di Molfetta, A., 2007. Heat transport modeling in an aquifer downgradient a municipal solid waste landfill in Italy. *American Journal of Environmental Sciences*, 3(3), pp. 106-110.
- Spitler, J. D., 2000. "GLHEPRO - A design tool for commercial building ground loop heat exchangers." 4th International Heat Pumps in Cold Climates Conference, Aylmer, Quebec, pp. 16.
- USGS, 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, USGS.
- USGS, 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density, USGS.
- VDI, 2000. VDI 4640 - Thermal use of underground. Blatt 1-4.

Modellizzazione analogica e numerica di un flusso termico in un mezzo poroso in laboratorio attraverso scatola termica

In questo articolo sono riportati i risultati preliminari di prove di laboratorio e relativi modelli numerici su flussi di calore generati in una scatola termica.

I test sperimentali sono stati condotti in una scatola di dimensioni pari a 1,0 x 0,4 x 0,4 m riempita di un mezzo poroso noto all'interno della quale sono stati indotti flussi di calore tramite differenti tipi di sorgente e monitorati per mezzo di sensori di temperatura e di umidità posizionati a ben definite distanze dalla sorgente di calore. Le numerose prove sono state condotte sia in riscaldamento che in raffreddamento, mantenendo costante il grado di saturazione del mezzo poroso ad ogni test. Ogni prova condotta ha permesso di acquisire un cospicuo numero di dati, tramite l'elaborazione dei quali è stato possibile definire il comportamento dei flussi di calore in condizioni secche, parzialmente sature, sature e riproducendo un flusso idrico all'interno del mezzo.

I modelli estrapolati dalle prove di laboratorio mostrano come la propagazione del calore aumenti in modo considerevole con il contenuto d'acqua. Inoltre, generando un flusso idrico con l'applicazione di una differenza di carico idraulico ai lati della scatola, la propagazione del calore aumenta ancora più sensibilmente, registrando un aumento pari ad un ordine di grandezza dei gradienti di temperatura misurati ai vari sensori.

Infine, si è costruito un modello numerico calibrato sui dati sperimentali, per mezzo del quale è stato possibile ottenere in back-analysis i valori di conduttività termica e capacità calorica volumetrica del mezzo poroso esaminato.

Parole chiave: geotermia, flusso termico, mezzo poroso, modellizzazione, resistività elettrica.

Thermal box: analogical and numerical modeling of thermal flow in saturated and unsaturated conditions. In this note the results of experimental tests and related numerical simulation of thermal flows in an analogic thermal box are presented.

Experimental tests have been conducted in a box (sized 1.0 x 0.4 x 0.4 m) full of a known porous medium: a thermal flow is generated with different heat sources and is monitored by means of 4 thermometers located at definite distances from the source. Many tests have been conducted both in warming and in cooling conditions, with controlled soil's saturation degree. Each experiment allows to collect many data, that were processed to realize different analogical models of thermal flow into dry, at different stages of soil moisture and simulating a water table.

Data processing shows that heat induced in soil medium propagates faster from dry to wet conditions while is less dependent on soil's saturation degree. Moreover, introducing a water table effect, propagation of thermal flow improves significantly, with special reference to time of spread (increasing of temperature gradient measured about an order of magnitude).

Finally, numerical model of thermal box, calibrate on physics model obtained, enable to conduct a back-analysis process to assign correct thermal conductivity and specific heat capacity values to soil medium examined.

Keywords: geothermal energy, thermal flux, porous medium, modelling, electric resistivity.

Boîte Thermique: modélisation analogique et numérique d'un flux thermique dans un milieu poreux. Le présent article prend en analyse les résultats des épreuves de laboratoire et des concernés modèles numériques sur flux de chaleur produits dans une boîte thermique.

Les tests expérimentaux ont été conduits dans une boîte de 1,0 x 0,4 x 0,4 m avec un milieu poreux connu dans laquelle ont été produits flux thermiques à partir de différents genre de source et ils ont été supervisés avec 4 thermomètres situés à différents distances de la source de chaleur.

Nicolò Giordano*
 Enrico Bima*
 Caterina Caviglia*
 Cesare Comina*
 Giuseppe Mandrone*
 Mauro Passarella*

* Dipartimento di Scienze della Terra -
 Università degli Studi di Torino
 ** AG3 srl, Spin Off Company dell'Uni-
 versità degli Studi di Torino
 *** Somiter srl

1. Introduzione

La propagazione del calore nei mezzi porosi gioca un ruolo molto importante in molte applicazioni geologiche ed ingegneristiche, nell'ambito della geotermia a bassa entalpia (quali la progettazione di sistemi di pompe di calore a ciclo aperto, a ciclo chiuso e lo stoccaggio del calore nel sottosuolo), nonché in altri processi ingegneristici quali, ad esempio, i tempi di maturazione del cemento in opere di fondazione. Nei mezzi geologici, essa avviene attraverso due processi fisici fondamentali: la conduzione (o diffusione) e la convezione (o avvezione). La conduzione si suddivide nei due fenomeni di dispersione molecolare (Leggi di Fick) e meccanica, per cui, con modalità assimilabili alla propagazione degli inquinanti nei mezzi porosi, il calore si distribuisce all'interno di un mezzo migrando in direzione concentrica dalla sorgente, essenzialmente a causa di gradienti di temperatura. La convezione, dal canto suo, è il più importante processo fisico che interviene sulla propagazione del calore ed è relativamente più veloce; essa segue la legge di Darcy e "permette" all'acqua, o a qualunque altro mezzo termovettore, di trasportare fisicamente il calore.

Le proprietà termiche dei terreni, in quanto strettamente connesse a

Les nombreuses éprouves ont été conduites aussi bien avec l'apport que avec la soustraction de chaleur en gardant constant le degré de saturation du milieu poreux dans chaque test. Chaque éprouve a permis d'obtenir nombreux résultats, qui ont été élaborés pour définir le comportement des flux thermiques en conditions sèches, partiellement saturées, et saturées avec l'imposition d'un flux hydraulique.

Les modèles extrapolés montrent comment la propagation de chaleur procède avec rapidité croissant à partir de conditions sèches vers celles partiellement saturées, indépendamment du degré de saturation. En outre, en ajoutant un flux hydraulique dans le milieu, la propagation de chaleur s'améliore sensiblement, en enregistrant une augmentation d'un ordre de grandeur des gradients de température mesurés.

À la fin on a construit un modèle numérique calibré sur les résultats expérimentaux, avec lequel obtenir en back-analysis les valeurs de conductivité thermique et capacité thermique du milieu poreux pris en analyse.

Mots-clés: géothermie, flux thermique, milieu poreux, modélisation, résistivité électrique.

tali processi, sono pertanto di grande interesse e la loro conoscenza risulta fondamentale per una corretta comprensione dei fenomeni e conseguentemente un'adeguata progettazione dei sistemi che sfruttano tali fenomeni fisici. La conduttività termica (λ), la capacità calorica volumetrica (C) e, strettamente connessa a quest'ultime, la diffusività termica (Dh) sono indubbiamente le proprietà termiche più importanti di un mezzo poroso e dipendono da numerosi fattori quali il grado di saturazione (S_r), il contenuto d'aria (n_a), la temperatura (T), la porosità (θ), la granulometria, la composizione mineralogica, il contenuto di materia organica e la concentrazione salina nella fase fluida.

In generale, ad un aumento di S_r corrisponde un aumento di λ , ma non si tratta di un processo lineare. In un grafico λ - S_r , che descrive il comportamento di una sabbia parzialmente satura, i dati si distribuiscono su una curva caratterizzata da 2 (Horton e Wierenga, 1984; Hopmans e Dane, 1986; Bristow, 1998; Lu et al., 2007; Chen, 2008) o 3 (Smits et al., 2010) settori con pendenze differenti: in ogni caso, tutti questi autori sottolineano il fatto che al di sotto di un valore critico di S_r ($S_{r(c)}$), λ aumenta in modo netto, mentre per valori di $S_r > S_{r(c)}$ la curva si attesta su una pendenza moderata. Il valore di $S_{r(c)}$, pertanto, risulta di notevole importanza e assume valori pari circa al contenuto d'acqua residuo $S_{r(r)}$, in quanto

sembra dipendere dalla frazione di argilla presente nel mezzo poroso (Tarnawski e Leong, 2000).

Ochsner et al. (2001) mostrano come il contenuto d'aria, comunemente trascurato in letteratura, abbia un'influenza dominante su λ e C ; in particolare, le loro ricerche rivelano che le proprietà termiche di mezzi sabbiosi e siltosi a temperatura ambiente possono essere descritte come una funzione lineare decrescente di n_a . La conduttività termica dei mezzi porosi, a sua volta, aumenta considerevolmente con la temperatura (De Vries, 1963; Sepaskhah e Boersma, 1979; Hopmans e Dane, 1986) facendo registrare valori fino a cinque volte più alti rispetto a quelli conosciuti a temperatura ambiente (Campbell et al., 1994).

Anche la porosità ha un notevole controllo su λ : è stato dimostrato come λ aumenti con una diminuzione di θ ed in maggior misura in suoli sabbiosi parzialmente saturi (Abu-Hamdeh e Reeder, 2000; Chen, 2008). È anche stato osservato come un aumento di S_r generi una risalita nei valori di λ , più rapida nei mezzi porosi con minor θ . La granulometria non influenza la conduttività termica se i granuli di limo, sabbia e ghiaia hanno analoghe proprietà mineralogiche (De Vries, 1963), ma altri autori sostengono il contrario. Al Nakshabandi e Kohnke (1965) e Tavman (1996) hanno trovato un rapporto di proporzionalità diretta tra λ e la granulometria. Midttømme e Roaldset

(1998) dimostrano come la granulometria giochi un ruolo molto importante nel controllo di λ e che la sua influenza sia molto maggiore nei mezzi fini rispetto a quelli grossolani. La dipendenza di λ da questa proprietà potrebbe essere legata al rapporto tra la superficie di contatto tra i granuli e la lunghezza dei flussi termici; un'ampia superficie di contatto, come si ha nei mezzi fini, offre maggiore resistenza al passaggio di calore e conseguentemente la conduttività termica assume valori minori (Griffiths et al., 1992).

Infine, prove di laboratorio di Abu-Hamdeh e Reeder (2000) mostrano che, in mezzi sabbiosi ed argillosi, λ decresca con un aumento della concentrazione salina a grado di saturazione costante, con valori maggiori nei mezzi sabbiosi a parità di contenuto salino della fase fluida. Tali autori sottolineano, inoltre, come un aumento della componente organica generi una diminuzione, sebbene piccola, della conduttività termica all'interno di mezzi argillosi.

Completato questo quadro sulla letteratura a riguardo delle proprietà termiche, non certo esaustivo, ma utile ad inquadrare meglio dal punto di vista teorico i fenomeni fisici che abbiamo voluto sperimentare in laboratorio, andiamo a presentare nei paragrafi seguenti il lavoro svolto. L'obiettivo principale dello studio è stato quello di valutare le differenze nella propagazione del calore all'interno di un mezzo ghiaioso-sabbioso prettamente da un punto di vista qualitativo, variando le condizioni di saturazione (dal campione secco fino a simulare l'effetto di una falda idrica), il numero e la disposizione delle sorgenti di calore.

In ultimo, sono stati elaborati dei modelli numerici per mezzo dei quali, tramite un processo di *back-analysis*, sono state valutate le proprietà termiche specifiche del mezzo analizzato e, indirettamente, la bontà del modello stesso.

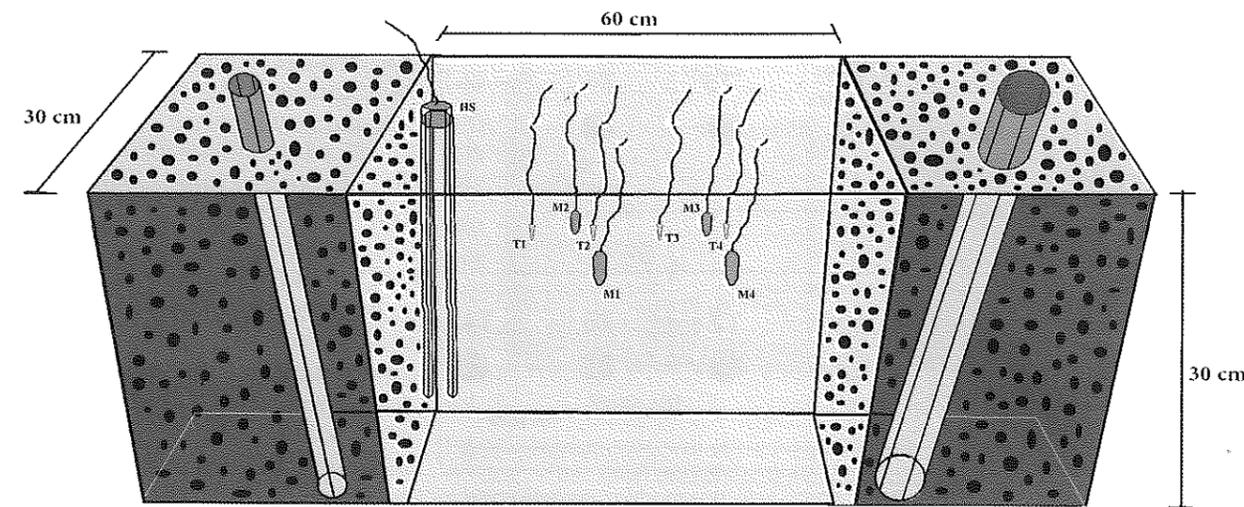


Fig. 1. Schematizzazione della scatola termica costruita in laboratorio; con HS è indicata la sorgente di calore (resistenza elettrica), con T i sensori di temperatura, con M i sensori di umidità.

Sketch of thermal box for the lab tests, where HS is the heat source (electrical resistance), T the temperature sensors and M the moisture sensors.

2. Scatola termica e modalità di esecuzione delle prove

Una scatola in plastica di dimensioni pari a 1,0 x 0,4 x 0,4 m, isolata sul fondo e sulle pareti, riempita di un materiale ghiaioso-sabbioso ($\theta = 0,35$, $k = 10^{-1}$ m/s) è stata impiegata per simulare la propagazione di un flusso termico all'interno di un mezzo poroso. Sono stati predisposti tre settori, separati da membrane permeabili, in modo da sfruttare i due esterni (riempiti di argilla espansa) per generare un flusso idrico costante e omogeneamente distribuito. Il settore centrale (0,6 x 0,4 x 0,3 m) è stato appositamente preparato per la generazione ed il monitoraggio della propagazione del calore e strumentato pertanto con sorgenti di calore, sensori di temperatura ed umidità (Fig. 1).

Come sorgenti di calore sono state utilizzate delle resistenze elettriche controllate con termometri e termostati. I sensori di temperatura (n. 4 Pt 100) sono stati disposti lungo l'asse maggiore della scatola in posizione centrale ed allineati con la sorgente di calore; i sensori di umidità, preventivamente calibrati, sono

stati posizionati tra l'allineamento sorgente-termometri e i bordi della scatola (2 da un lato e due dall'altro). Per registrare i dati acquisiti da tutta la strumentazione predisposta, si è provveduto ad un collegamento *wireless* a *notebook* per la registrazione in continuo dei dati di temperatura e umidità.

Una prima serie di test ha previsto l'utilizzo di una sola resistenza elettrica come sorgente di calore. La sorgente è stata posta nel punto mediano del lato corto della scatola termica (settore centrale, a circa 3,5 cm dal setto permeabile), i sensori di temperatura allineati a 10, 20, 30 e 40 cm da essa ed i sensori di umidità a 20 e 40 cm, vicino ai bordi esterni della scatola; tutti i sensori sono stati posti a circa 10 cm di profondità. Le prove sono state eseguite prima ad alta temperatura ($> 90^\circ\text{C}$), da condizioni secche a sature, e successivamente a media temperatura ($50-60^\circ\text{C}$), da condizioni secche a sature ed in ultimo con l'impostazione di un flusso idrico con portata pari a circa $6,0 \cdot 10^{-3}$ l/s.

Una seconda serie di misure è stata eseguita solo in presenza di flusso idrico con due sorgenti di calore posizionate in due diverse modalità (Fig. 2). Nel primo caso le resisten-

ze sono state disposte "in parallelo" rispetto alle linee di flusso, a monte dello stendimento di sensori di temperatura e distanziate tra loro di 8 cm circa, in modo da simulare una sorgente di calore lineare. Successivamente, le resistenze sono state posizionate "in serie" rispetto al flusso dell'acqua, allineate analogamente allo stendimento delle Pt100 con una disposizione del tipo "S1 - T1 - S2 - T2 - T3 - T4" spaziate l'un l'altro di 10 cm.

Tali prove hanno permesso di valutare differenze quali-quantitative nella distribuzione del calore e nella risposta termica del mezzo poroso al variare della disposizione geometrica delle sorgenti di calore.

3. Risultati sperimentali

Da qui in avanti andremo ad analizzare i risultati delle prove eseguite, provando a dare un'interpretazione di quanto ottenuto e cercando di definire quali applicazioni pratiche possano trarre beneficio da questo e futuri studi in quest'ambito. Per non dilungarci eccessivamente presentando un elenco dettagliato dei valori registrati ad ogni prova, cer-

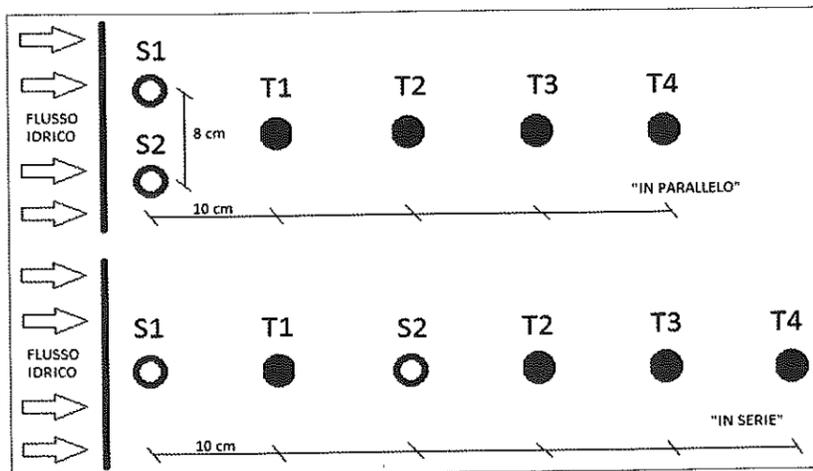


Fig. 2. Schema della posizione di sorgenti e sensori nelle due modalità in parallelo ed in serie, nelle prove effettuate con due sorgenti; con S sono indicate le sorgenti di calore, con T i sensori di temperatura.
Sketch of the source and the sensor position, in parallel and series mode, where S are the heat sources and T are the temperature sensors.

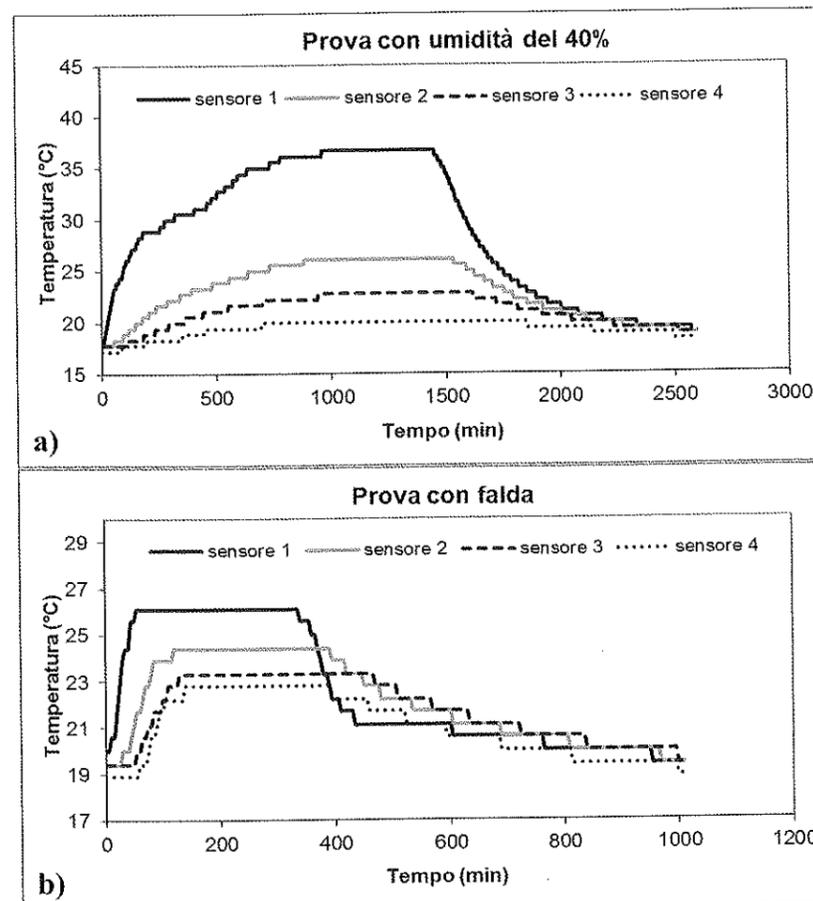


Fig. 3. Risultati sperimentali: propagazione del calore a $S_r = 40\%$ (a) e $S_r = 100\%$ con flusso idrico imposto (b); distanze dalla sorgente dei sensori: 10 cm (1), 20 cm (2), 30 cm (3) e 40 cm (4).
Experimental results: tests performed at $S_r = 40\%$ (a) and $S_r = 100\%$ with water flux (b); T-sensor distances from the source: 10 cm (1), 20 cm (2), 30 cm (3) and 40 cm (4).

cheremo di riportare sinteticamente solamente le maggiori evidenze risultanti dallo studio.

3.1. Prove con una sorgente di calore

Qualitativamente, l'andamento delle curve tempo-temperatura è simile in tutte le prove (Fig. 3), mostrando un aumento di temperatura più o meno rapido a seconda delle condizioni di saturazione imposte, maggiore in corrispondenza del sensore più vicino alla fonte di calore e via via minore nei sensori più distanti. In tutte le prove eseguite si è atteso il raggiungimento di un regime di equilibrio almeno in corrispondenza del primo sensore di temperatura, e si è sempre monitorata anche la fase di raffreddamento (ritorno alle condizioni iniziali), la quale inizia sempre con un leggero ritardo rispetto allo spegnimento della sorgente di calore.

Entrando nel dettaglio dell'analisi delle curve registrate, valutando i tempi di raggiungimento dei picchi di temperatura e i valori stessi dei picchi raggiunti dai sensori in ogni prova condotta (Fig. 4), si notano rilevanti differenze a seconda del contenuto d'acqua nel mezzo poroso. I dati più attendibili sono quelli raccolti nelle prove a media temperatura (in cui l'effetto evaporazione è meno importante): dalle condizioni secche alle condizioni sature con simulazione della falda, il tempo di raggiungimento del picco di temperatura diminuisce in modo abbastanza regolare da 21 a 2 ore; il massimo valore di temperatura è ottenuto nelle prove con condizioni secche ed esso diminuisce piuttosto regolarmente nelle prove parzialmente sature e sature, per poi crollare nettamente nelle prove con il flusso idrico imposto, registrando una diminuzione assoluta del 25% circa dalle condizioni sature al flusso (Fig. 4).

Tali risultati confermano, pertanto, come il contenuto d'acqua nei

mezzi porosi giochi un ruolo fondamentale nella propagazione del calore, migliorando il passaggio dei flussi termici in termini di tempo e tendendo ad equilibrare i valori di temperatura registrati dai sensori. Se a questo si aggiunge una differenza di carico idraulico ai lati del mezzo in esame, simulando così un flusso idrico pressoché costante ed omogeneo, la propagazione termica migliora sensibilmente.

3.2. Prove con due sorgenti di calore

La seconda serie di test eseguita, condotta, come scritto, con l'aggiunta di una seconda sorgente di calore e analizzando unicamente le condizioni con flusso idrico imposto, risulta particolarmente interessante. In Fig. 5 sono riportate le curve tempo-temperatura registrate nelle due differenti disposizioni.

Confrontando i dati della prova con falda registrati con una resistenza (Fig. 3b) e con due sorgenti di calore disposte in parallelo (Fig. 5a), risulta subito evidente come la differenza principale si riscontri nei valori di temperatura raggiunti durante l'arco del test. Nella prova con due resistenze il calore fornito è più distribuito (simulazione di sorgente lineare) e pertanto maggiore, per cui i picchi di temperatura risultano più alti in corrispondenza di ogni sensore di temperatura.

Per quanto tale considerazione fosse attesa e pertanto quasi ovvia, per contro, quanto rilevato nei test eseguiti con una disposizione delle sorgenti di calore "in serie", allineate cioè nella direzione del flusso, è di sicuro interesse (Fig. 5b).

I dati sperimentali dimostrano come il sensore T1, posizionato a metà tra le due sorgenti, non solo non è quello che raggiunge il picco maggiore, ma risulta addirittura l'ultimo, con T2, T3 e T4 che registrano picchi di temperatura superiori. È facilmente intuibile pertanto come

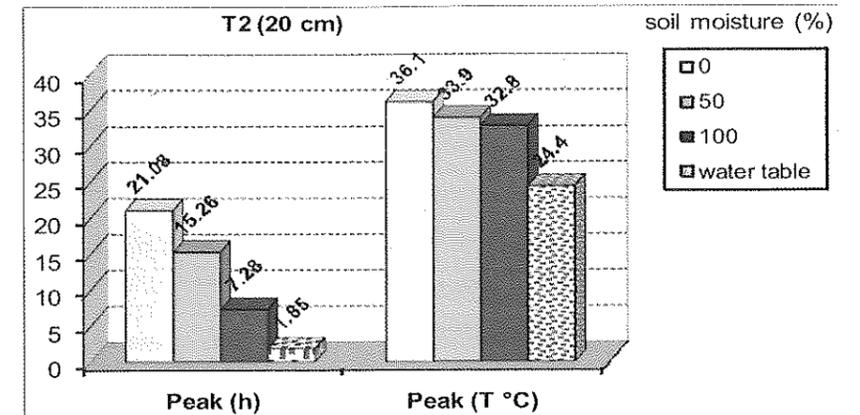


Fig. 4. Differenze nei tempi di raggiungimento dei picchi (valori medi delle prove effettuate) e nei valori massimi di temperatura raggiunti nelle differenti condizioni di umidità del mezzo poroso. Valori registrati al sensore T2 (a 20 cm dalla sorgente) nelle prove eseguite a $T = 50-60^\circ\text{C}$.
Differences in time of reaching peak (mean values among all the tests) and temperature peak values reached at different saturation degrees. Values registered at 20 cm from the source in tests performed at $T = 50-60^\circ\text{C}$.

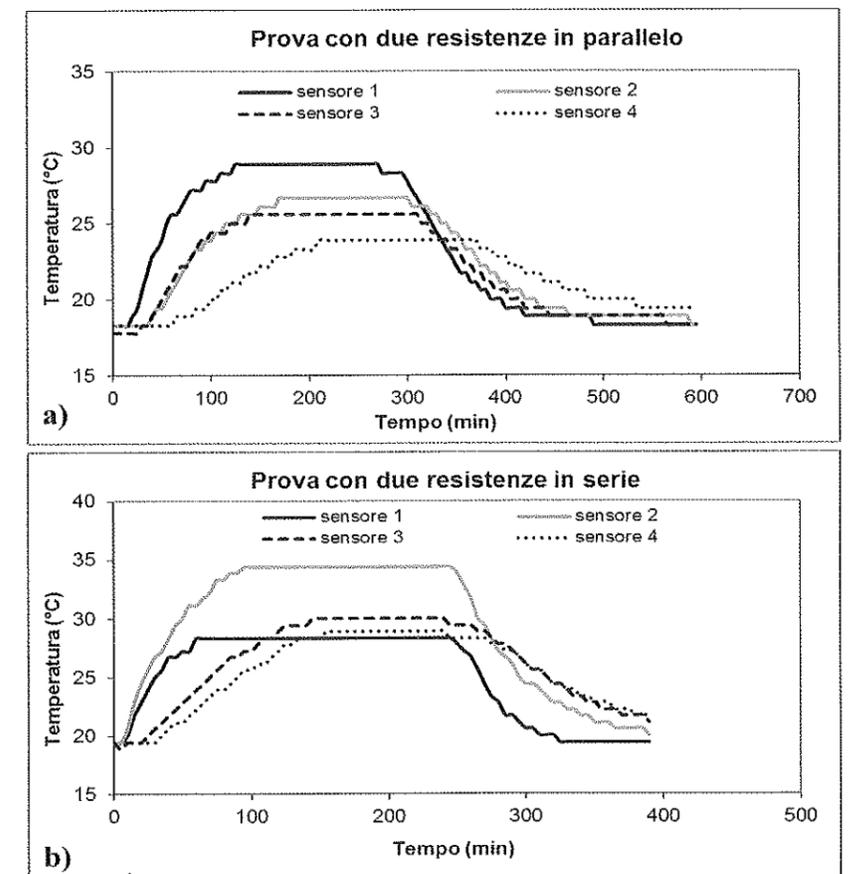


Fig. 5. Risultati sperimentali: propagazione del calore nelle prove con resistenze in parallelo (a) ed in serie (b), entrambe con flusso idrico imposto; distanze dalla sorgente dei sensori: 10 cm (1), 20 cm (2), 30 cm (3) e 40 cm (4).
Experimental results: tests performed in parallel (a) and series mode (b), both with water flux induced T-sensor distances from the source: 10 cm (1), 20 cm (2), 30 cm (3) and 40 cm (4).

il flusso di calore sia influenzato in gran misura del flusso idrico imposto e i sensori "a valle" della seconda sorgente ricevano, a differenza di T1, il calore di due sorgenti.

4. Modellazione numerica

Per validare i dati sperimentali e per testare alcuni dei numerosi software in commercio che simulano tali processi, si è deciso di costruire dei modelli numerici, calibrati sui dati ottenuti in laboratorio, in modo da assegnare valori di λ e C caratteristici del mezzo studiato attraverso un processo di analisi a ritroso.

Per modellizzare la scatola termica sono stati utilizzati due software, uno per la simulazione delle prove a secco e con diverse percentuali di umidità, uno per la modellazione delle prove con il flusso idrico. Per le prime prove è stata impiegata la versione educational del software TEMP/W (Geostudio2012 sviluppato da Geo-Slope International), codice di calcolo agli elementi finiti capace di descrivere le variazioni di temperatura indotte da una serie di condizioni al contorno arbitrariamente definite, all'interno di un volume con specifiche proprietà termiche. Il calcolo avviene grazie ad una discretizzazione più o meno regolare del volume considerato e all'applicazione delle equazioni di trasporto del calore in ogni elemento in cui è stato suddiviso il volume.

Le prove eseguite con la simulazione della falda freatica sono state modellizzate tramite il programma SEAWAT (Guo e Langevin 2002; Langevin e Guo 2006), che simula il flusso idrico e il trasporto a densità variabile nel mezzo saturo. Questo programma viene utilizzato accoppiato a MODFLOW, il codice di calcolo alle differenze finite sviluppato dall'USGS per simulare il flusso idrico negli acquiferi (McDonald e Harbaugh, 1988; Masciopinto e Palmiotta, 2011). La modellizzazione

con MODFLOW prevede la discretizzazione dell'acquifero in celle di dimensioni regolari, la definizione dei limiti idrogeologici (condizioni al contorno), dei parametri idrogeologici che lo caratterizzano, e della presenza di prelievi o sorgenti d'acqua. Sebbene SEAWAT non sia specificatamente designato per simulare il trasporto di calore, la temperatura può essere simulata come una delle specie saline presenti, inserendo opportuni coefficienti di trasporto: il processo di conduzione termica è matematicamente analogo alla diffusione di Fick. Il trasporto di calore per conduzione viene rappresentato in SEAWAT attribuendo alla temperatura un coefficiente di diffusività termica (anziché il coefficiente di diffusione molecolare che viene attribuito alle specie in soluzione). Il trasferimento di calore con la matrice solida viene trattato utilizzando il processo matematico equivalente dell'adsorbimento di un soluto (Thorne et al., 2006; Langevin et al., 2007; Vandenbohede et al., 2011; Masciopinto e Palmiotta, 2011).

4.1. Simulazione in condizioni statiche (TEMP-W)

Le prove di laboratorio eseguite in condizioni secche, parzialmente sature e sature sono state modellizzate con TEMP/W, sfruttando la sua capacità di simulare variazioni di tem-

peratura all'interno di un volume di terreno inserendo un limitato numero di parametri di input e potendo ottenere in uscita risultati affidabili sia dal punto di vista numerico sia per quel che riguarda la visualizzazione.

In Tab. 1 sono riportati i parametri di input assegnati al software per le prove simulate. Per la discretizzazione del volume di materiale si è scelta una mesh regolare quadrata con dimensioni delle singole celle pari a 0,03 x 0,03 m. Per le condizioni secche si è simulata la prova eseguita ad alta temperatura con sorgente a 150°C, mentre per le condizioni umide sono state simulate le prove a media temperatura che hanno fornito i migliori risultati anche in termini di stabilità delle condizioni al contorno imposte. In Fig. 6 è riportato un esempio di output delle simulazioni eseguite con TEMP/W relativo ad una delle prove in condizioni parzialmente sature, e le risposte registrate ai punti di controllo messi nella stessa posizione dei sensori di temperatura. Interessante è l'opzione che permette di inserire dei punti di controllo grazie ai quali le operazioni di taratura del modello si semplificano notevolmente.

Riproducendo i vari test, si è riusciti a simulare efficacemente il miglioramento nella propagazione del calore da $S_r = 0\%$ a $S_r = 100\%$, che si esplica in un raggiungimento più rapido dei sensori di temperatura da parte dei flussi termici.

Tab. 1. Dati di input per la modellazione delle tre prove con TEMP/W. Input data for the TEMP/W simulation.

Parametro	Prova secca	Prova con $S_r = 40\%$	Prova satura
Porosità totale	0,35	0,35	0,35
Contenuto d'acqua (m^3/m^3)	0,00	0,14	0,35
Temp. iniziale del mezzo ($^{\circ}C$)	20,6	17,8	18,3
Temp. ambiente ($^{\circ}C$)	22,7	21,0	21,0
Temp. sorgente ($^{\circ}C$)	150	55,0	55,0
Conduttività termica λ ($W/m.^{\circ}C$)	0,3	0,8	2,1
Capacità calorica volumetrica C ($kJ/m^3.^{\circ}C$)	1.800	2.200	2.400

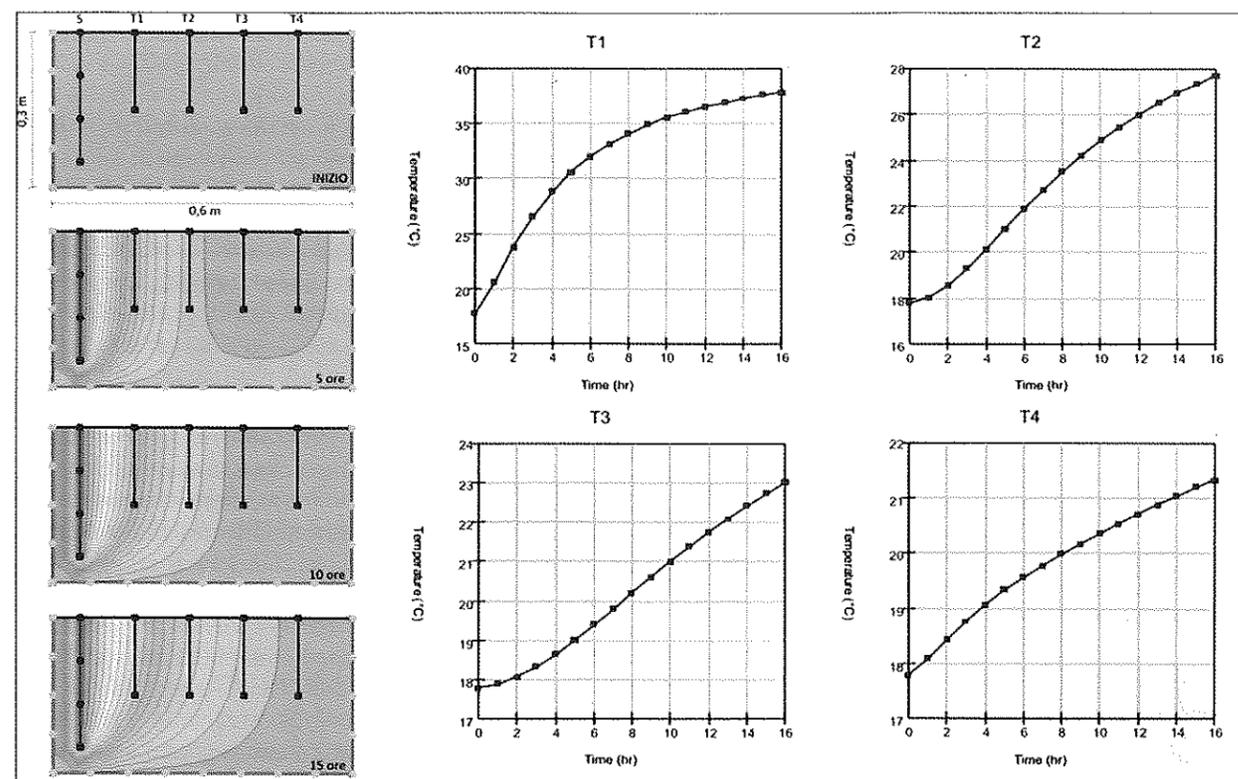


Fig. 6. Prova in condizioni parzialmente sature ($S_r = 40\%$) modellizzata con TEMP/W: a) passaggio del calore in 4 steps differenti, dall'inizio al termine della prova (vista in sezione); b) grafici tempo-temperatura in corrispondenza dei quattro sensori di temperatura predisposti.

Test in wet conditions ($S_r = 40\%$) simulated by TEMP/W: a) temperature distribution for 4 different steps, from the beginning to the end (section view), b) time-temperature curves registered by each T-sensor.

4.2. Simulazione in condizioni dinamiche (SEAWAT - MODFLOW)

Il flusso di calore nella scatola termica in condizioni sature con flusso idrico imposto è stato simulato con SEAWAT e MODFLOW. Nella prova è stata impostata una portata di

$6 \cdot 10^{-6} m^3/s$, assegnando un carico costante all'inizio e alla fine della scatola. In base alla legge di Darcy, si ottiene una differenza di carico idraulico Δi pari a $5,3 \cdot 10^{-2} m$.

La scatola termica è stata discretizzata, secondo il modello alle differenze finite, in celle di dimensioni pari a 0,03 x 0,03 m. Sono stati utilizzati come parametri caratterizzanti il mezzo saturo quelli misurati nella

Tab. 2. Parametri fisici del mezzo poroso in esame nella modellizzazione con SEAWAT - MODFLOW.

Porous medium physical parameters in the SEAWAT - MODFLOW simulation.

Parametro	Valore
K_x (m/s)	10^{-1}
K_y (m/s)	10^{-1}
K_z (m/s)	10^{-1}
Porosità eff.	0,25
Porosità tot.	0,35
Bulk density (kg/m^3)	1.300
Di (m)	0,03

Tab. 3. Condizioni iniziali e proprietà termiche del mezzo poroso nella modellizzazione con SEAWAT - MODFLOW.

Porous medium initial conditions and thermal properties in the SEAWAT - MODFLOW simulation.

Parametro	Valore
Kd (l/mg/L)	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Temp. iniziale ($^{\circ}C$)	18
Temp. sorgente ($^{\circ}C$)	40
Coeff. diff. molec. (m^2/h)	$3,6 \cdot 10^{-8}$

prova di laboratorio, cioè conducibilità idraulica, porosità efficace, porosità totale e dispersione longitudinale (riportati in Tab. 2). I parametri relativi alla temperatura utilizzati in questo studio sono riportati in Tab. 3.

In Fig. 7 si può notare come, in accordo con i dati sperimentali, il modello sia riuscito a ricostruire le variazioni di temperatura in corrispondenza di tutti i sensori di temperatura, sia in termini di temperatura che di intervalli di tempo impiegati.

5. Discussione dei risultati

Le evidenze sperimentali registrate in queste prove mettono a confronto i due principali processi (tralasciando l'irraggiamento) che permettono il passaggio del calore da un mezzo geologico ad un altro, cioè la conduzio-

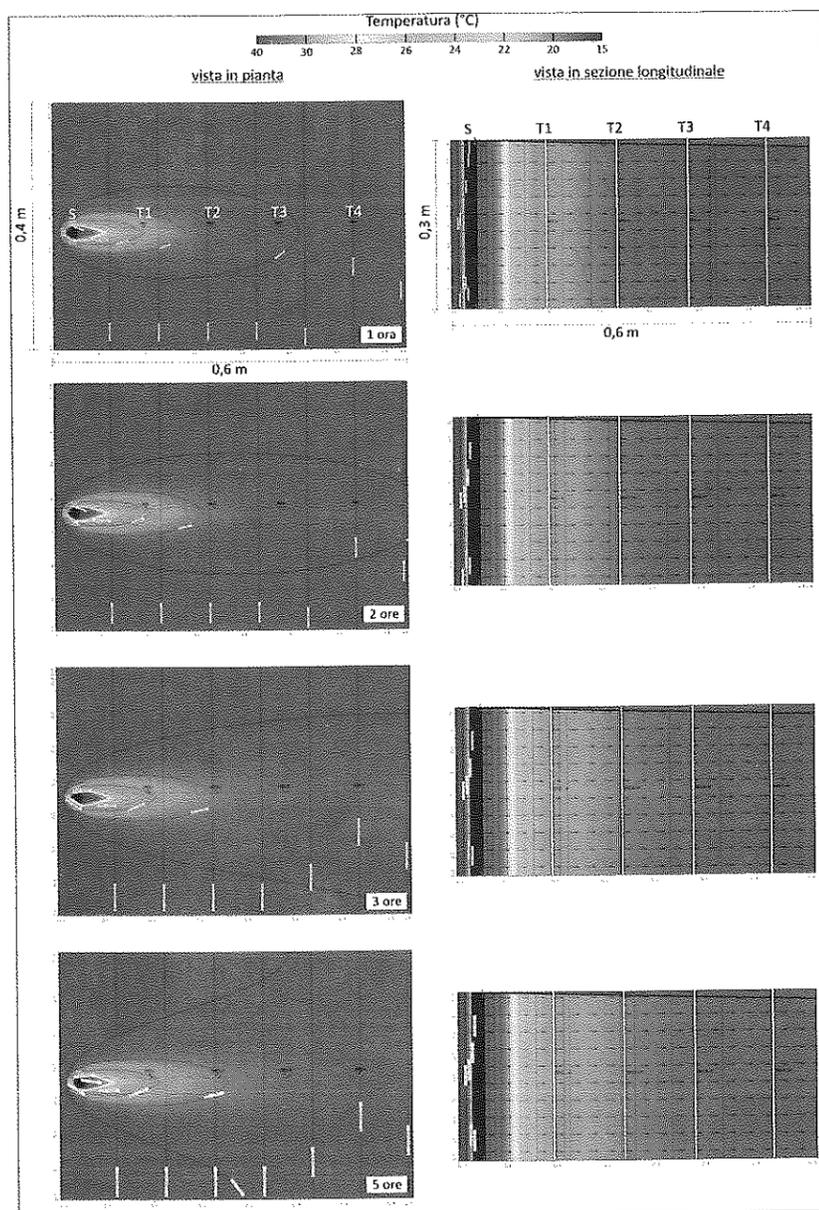


Fig. 7. Prova in condizioni sature con flusso idrico indotto modellizzata con SEAWAT – MODFLOW: passaggio del calore in 4 steps differenti, dall’inizio al termine della prova. Test with water flux induced simulated by SEAWAT – MODFLOW: temperature distribution at 4 different steps, from the beginning to the end.

ne e la convezione. È chiaro, quindi, come si possano giustificare differenze di velocità di trasmissione del calore nelle due situazioni estreme, cioè in condizioni statiche (no flusso idrico, solo conduzione) ed in condizioni dinamiche (flusso idrico, conduzione + convezione).

In linea generale, i dati acquisiti mostrano un miglioramento della propagazione del calore con l’au-

mentare del grado di saturazione e tale miglioramento si esplica in maggior misura con condizioni di flusso idrico imposto. Queste valutazioni sono facilmente intuibili dai gradienti di temperatura, estrapolati dalle registrazioni eseguite in continuo durante le prove. Dalle condizioni secche iniziali alle prove effettuate con flusso idrico indotto, passando per gradi intermedi di umi-

dità, i picchi di temperatura raggiunti dai sensori diminuiscono gradualmente. Analogamente però, i tempi di raggiungimento di tali picchi decrescono progressivamente e questo denota, come anticipato, un aumento graduale dei gradienti di temperatura, i quali, espressi in °C/min, possono essere considerati come una quantificazione della velocità di propagazione del calore all’interno del mezzo. Tali preliminari valutazioni danno l’idea di una distribuzione del calore sempre più omogenea e rapida nel tempo con l’aumentare del contenuto idrico del mezzo poroso.

Confrontando tra loro le prove in assenza di flusso, si può dire che la sola presenza di umidità favorisca il passaggio del calore rendendo evidentemente più efficiente il processo diffusivo all’interno del mezzo poroso, in buon accordo con i dati di letteratura che vogliono un aumento della conducibilità con un incremento di S_r (Horton e Wierenga, 1984; Hopmans e Dane, 1986; Bristow, 1998; Abu-Hamdeh e Reeder, 2000; Lu *et al.*, 2007; Chen, 2008; Smits *et al.*, 2010).

Non sono presenti purtroppo lavori di letteratura che prendano in considerazione un processo avvertivo all’interno del mezzo poroso. Tale mancanza denota in primo luogo una difficoltà nel confrontare i nostri dati con altre sperimentazioni e in secondo luogo l’importanza di iniziare ad approcciarsi in questa direzione.

Le risultanze dei test sperimentali testimoniano che il processo avvertivo contribuisca notevolmente alla propagazione del calore, mostrando gradienti di temperatura superiori di un ordine di grandezza rispetto a quelli registrati in condizioni sature ma statiche.

Dalle prove eseguite con più sorgenti di calore risulta come le differenze registrate nelle due configurazioni base (schematizzate in Fig. 2) possano essere spiegate dal fatto che, nella disposizione “in serie”, il sensore T1 risulta alimentato solo dalla sorgente S1, mentre T2, T3 e T4 ri-

cevano il calore da entrambe le sorgenti, trasportato con moto avvertivo dal flusso idrico imposto.

Sono quindi immediate le ricadute nel campo della progettazione di campi di sonde geotermiche. Infatti, attualmente, l’unico parametro considerato per il dimensionamento di tali impianti è la resa lineare termica delle sonde, da cui consegue la lunghezza necessaria per soddisfare il fabbisogno ipotizzato.

Per quanto riguarda la simulazione numerica eseguita, i risultati ottenuti mostrano un buon accordo con le misure sperimentali e denotano pertanto una buona affidabilità nella determinazione delle proprietà termiche del mezzo analizzato. In Tab. 4 sono riportati i valori di conduttività termica, capacità calorica volumetrica e diffusività termica (che non è altro che il rapporto delle prime due) del mezzo analizzato. La diffusività termica aumenta all’aumentare del contenuto di acqua, quantificando di fatto quanto estrapolato dalle prove sperimentali, cioè che maggiore è il contenuto d’acqua maggiore è la velocità di propagazione del calore. Un approccio di questo tipo dimostra pertanto che accoppiare una simulazione fisica a scala ridotta ad una modellazione numerica di quanto riprodotto in laboratorio, possa da un lato verificare la bontà di entrambe le simulazioni e dall’altro permettere una determinazione quantitativa delle proprietà termiche di un mezzo poroso.

6. Conclusioni

Le problematiche riguardanti l’ambito dei sistemi geotermici a bassa entalpia richiedono una co-

noscenza quantitativa approfondita delle proprietà termiche dei mezzi geologici che ospitano gli impianti di sonde geotermiche. Le proprietà termiche di tali materiali vengono spesso apprese da letteratura o da esperimenti di laboratorio che sono condotti sotto condizioni totalmente differenti rispetto a quelle che si riscontrano in sito. Si deve, a nostro avviso, tenere in conto di buona parte dei fattori che controllano le proprietà termiche, in modo tale da modificare i dati di laboratorio da cui si attinge ed adattarli al singolo sito di applicazione. Questi aggiustamenti e modifiche dovrebbero considerare gli effetti di fattori quali la temperatura, la porosità e il grado di saturazione. È necessario pertanto considerare caso per caso ed eseguire studi approfonditi che avvicinino il più possibile ad una conoscenza dettagliata del sito considerato, senza limitarsi cioè all’applicazione di valori generici, ma procedendo con un approccio multidisciplinare che preveda analisi di laboratorio, simulazioni fisiche e numeriche che portino alla determinazione delle proprietà termiche caratteristiche del sito.

I principali risultati di questo studio possono essere così riassunti:

- la presenza dell’acqua gioca un ruolo molto importante nel processo di trasporto del calore, favorendo la conduzione del calore anche con la sola parziale saturazione del terreno e sommando il processo avvertivo dovuto al flusso idrico sotterraneo;
- il posizionamento delle sonde rispetto alle geometrie geologiche ed idrogeologiche del sito influenza notevolmente la resa di queste ultime e conseguentemente i consumi

- dell’impianto di climatizzazione;
- la modellazione numerica ha portato a risultati affidabili e coerenti con quanto sperimentato in laboratorio, portando alla determinazione quantitativa delle proprietà termiche del mezzo in esame;
- l’uso di un modello in scala ridotta risulta sicuramente utile per una ricostruzione qualitativa dei fenomeni indotti nel terreno, e costituisce un’utile base per la determinazione dei parametri fisici da applicare a modelli numerici per simulare casi reali.

Questa esperienza mostra come, in presenza di acquiferi importanti, anche il posizionamento reciproco delle sonde possa modificare sostanzialmente la resa delle stesse. Tali evidenze sperimentali sottolineano dunque l’importanza della disposizione delle fonti di calore rispetto al flusso idrico sotterraneo nella valutazione della distribuzione dei flussi termici. Rapportando tale contesto di laboratorio ad una situazione reale, si ribadisce che la conoscenza delle caratteristiche termiche del mezzo geologico e la disposizione delle sonde geotermiche negli impianti a bassa entalpia siano di fondamentale importanza per una corretta progettazione nell’ottica della massima efficienza energetica.

In quest’ottica, le ricerche future saranno indirizzate su: (1) esperimenti analoghi condotti in mezzi porosi differenti, con diverse posizioni dei sensori di temperatura (sia in orizzontale che in verticale) e con diverse direzioni del flusso idrico indotto; (2) focalizzazione sull’influenza della geometria di posizionamento degli scambiatori di calore rispetto alla direzione di flusso delle acque sotterranee; (3) spe-

Tab. 4. Proprietà termiche del mezzo poroso studiato, ottenute in back-analysis con la modellazione numerica. Thermal properties of the examined porous medium, obtained by back-analysis process from the numerical simulation.

	Prova secca	Prova con $S_r = 40\%$	Prova satura	Prova con falda
Conduttività termica λ (W/m.°C)	0,3	0,8	2,1	2,3
Capacità calorica volumetrica C (kJ/m ³ /°C)	1.800	2.200	2.400	2.500
Diffusività termica Dh (10 ⁻⁴ m ² /s)	1,67	3,64	8,75	9,2

rimentazione di metodi d'indagine indiretti (geofisica) per il monitoraggio dei flussi di calore in sito; (4) sviluppo della simulazione numerica per ottenere modelli sempre più coerenti con le prove sperimentali, al fine di determinare la proprietà termiche dei mezzi geologici in esame e puntare ad una definizione quantitativa sempre più accurata di tali proprietà.

Bibliografia

- ABU-HAMDEH, N.H., REEDER, R.C., 2000. Soil thermal conductivity: effects of density, moisture, salt concentration and organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 64, pp. 1285-1290.
- AL NAKSHABANDI, G., KOHNKE, H., 1965. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural Meteorology Journal*, 2, pp. 271-279.
- ARPS, J.J., 1953. The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.*, 198, pp. 327-330.
- BRISTOW, K.L., 1998. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89, pp. 75-84.
- CAMPBELL, G.S., JUNGBAUER, J.D., BIDLAKE, W.R., HUNGERFORD, R.D., 1994. Predicting the effect of temperature on soil thermal conductivity. *Soil Science Journal*, 158, pp. 307-313.
- CARSLAW, H.S., JAEGER, J.C., 1959. *Conduction of heat in solids*. Oxford University Press, Oxford, 517 pp.
- CHEN, S.X., 2008. Thermal conductivity of sands. *Heat mass transfer*, 44, pp. 1241-1246.
- DE VRIES, D.A., 1963. Thermal properties of soils. In van Wijk WR (ed) *Physics of plant environment*. North-Holland, Amsterdam, pp. 210-235.
- GRIFFITHS, C.M., BRERETON, N.R., BEAUSILLON, R., CASTILLO, D., 1992. Thermal conductivity prediction from petrophysical data: a case study. In A. Hurst et al. (ed.) *Geological applications of wireline logs II*, Geological Society of London, Spec. Publ., 65, pp. 299-315.
- GUO, W., LANGEVIN, C.D., 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7 Reston, Virginia: USGS.
- HOPMANS, J.W., DANE, J.H., 1986. Thermal conductivity of two porous media as a function of water content, temperature and density. *Soil Science Journal*, 142, pp. 187-195.
- HORTON, R., WIERENGA, P.J., 1984. The effect of column wetting on soil thermal conductivity. *Soil Science Journal*, 138, pp. 102-108.
- JOHANSEN, O., 1975. Thermal conductivity of soils. Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway, English Translation 637, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire).
- LANGEVIN, C.D., GUO, W., 2006. MODFLOW/MT3DMS based simulation of variable density ground water flow and transport. *Ground Water* 44, 3, pp. 339-351.
- LANGEVIN, C.D., THORNE, J.R., DAUSMAN, A.M., SUKOP, M.C., GUO, W., 2007. SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-species Solute and Heat Transport. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A22 Reston, Virginia: USGS.
- LU, S., REN, T.S., GONG, Y.S., HORTON, R., 2007. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 71, pp. 8-14.
- MASCIOPINTO, C., PALMIOTTA, D., 2011. Un modello poroso equivalente può simulare il flusso ed il trasporto d'inquinanti in mezzi saturati? *Geoingegneria Ambientale e Mineraria*, Anno XLVIII, 1, pp. 25-38.
- MIDTTØMME, K., ROALDSET, E., 1998. The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts. *Petroleum Geoscience*, 4, pp. 165-172.
- MCDONALD, M.G., HARBAUGH, A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 pp.
- OCHSNER, T.E., HORTON, R., REN, T., 2001. A new perspective on soil thermal properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65, pp. 1641-1647.
- SEPASKHAH, A.R., BOERSMA, L., 1979. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 43, pp. 439-444.
- SMITS, K.M., SAKAKI, T., LIMSUWAT, A., ILLANGASEKARE, T.H., 2010. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles. *Vadose Zone Journal*, 9, pp. 1-9.
- TARNAWSKI, V.R., LEONG, W.H., 2000. Thermal conductivity of soils at very low moisture content and moderate temperatures. *Transport in porous media*, 41, pp. 137-147.
- TAVMAN, I.H., 1996. Effective thermal conductivity of granular porous materials. *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 23, pp. 169-176.
- THORNE, D., LANGEVIN, C.D., SUKOP, M.C., 2006. Addition of simultaneous heat and solute transport and variable fluid viscosity to SEAWAT. *Computers & Geosciences*, 32, pp. 1758-1768.
- VANDEBOHEDE, A., HERMANS, T., NGUYEN, F., LEBBE, L., 2011. Shallow heat injection and storage experiment: Heat transport simulation and sensitivity analysis. *Journal of Hydrology*, 409, pp. 262-272.

Processi decisionali e "impianti indesiderati": applicazione dell'integrale di Choquet per la localizzazione di un inceneritore di rifiuti¹

Il paper propone un approccio multicriteri per supportare il processo decisionale relativo alla scelta della migliore localizzazione per un inceneritore di rifiuti previsto per la Provincia di Torino.

Nel lavoro tre siti alternativi sono confrontati sulla base di differenti indicatori ambientali, ecologici, economici, sociali, territoriali ecc. Gli indicatori sono poi aggregati attraverso l'applicazione dell'integrale di Choquet al fine di ottenere la performance di ogni soluzione e di mettere in luce i trade-off tra i diversi aspetti considerati.

Dal punto di vista metodologico l'integrale di Choquet appartiene alla famiglia delle misure non additive e rappresenta un operatore di aggregazione flessibile introdotto da Choquet (1953) come generalizzazione della media aritmetica al caso dell'interazione tra più criteri.

Obiettivo del lavoro è esaminare il contributo che la tecnica dell'integrale di Choquet offre a supporto delle procedure di valutazione di sostenibilità. In particolare, lo studio mette in evidenza l'importanza di considerare le interazioni tra i criteri al fine di evidenziare l'esistenza di sinergie e ridondanze tra gli elementi presi in considerazione. Il lavoro illustra lo sviluppo di un processo decisionale di tipo partecipato e la valutazione permette di formalizzare la struttura delle preferenze dei diversi stakeholders coinvolti.

In conclusione il lavoro proposto mette in evidenza le potenzialità dell'approccio metodologico proposto nel contesto di decisioni caratterizzate da non compensabilità tra i criteri e da obiettivi conflittuali.

Parole chiave: Analisi Multicriteri, trasformazioni territoriali, integrale di Choquet, valutazioni di sostenibilità integrate, interazione tra criteri, misure non additive.

Decision processes and "undesirable facilities": an application of the Choquet integral for siting a waste incinerator.

The present paper proposes a multicriteria approach able to support Decision Makers in the choice of the best location for a new waste incinerator plant that has to be constructed in the Province of Torino (Italy). Three alternative sites have been compared based on different indicators that have been aggregated using the Choquet integral in order to obtain the global performance of each solution and to better highlight the trade-offs between the aspects involved.

The aim of the analysis is to study the contribution that the Choquet integral offers in sustainability assessment of undesirable facilities location problems, taking into consideration the existence of interactions among the criteria and paying particular attention to the use of quantitative indicators in the evaluation process. Mention should be made to the fact that the analysis takes into account the opinion of several experts in determining the importance of the different elements of the model.

Keywords: Multiple Criteria Decision Aiding, environmental analysis, Choquet integral, integrated sustainability assessment, criteria interactions, non additive measures.

Processus décisionnels et installations indésirables: une application de l'intégrale de Choquet pour la localisation d'un incinérateur.

L'article propose une approche multicritère pour la sélection de la localisation la plus appropriée pour un nouveau incinérateur de déchets qui doit être réalisé dans le territoire de la Province de Turin. Dans l'étude trois sites alternatives ont été considérés, pour lesquels toutes les informations

¹ Il contributo è frutto del lavoro congiunto dei tre autori. Tuttavia, pur essendo la responsabilità scientifica attribuibile a ciascuno in parte uguale, i paragrafi 1, 2, 3.5 e 4 sono stati curati da Marta Bottero mentre i paragrafi 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 sono stati curati da Valentina Ferretti. L'abstract e le conclusioni sono stati invece curati congiuntamente dai tre autori.

Marta Bottero*
Valentina Ferretti*
Giulio Mondini*

* Dipartimento di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio (DIST), Politecnico di Torino

1. Introduzione

Nell'ambito della valutazione di scenari di trasformazione territoriale si è soliti ricorrere al paradigma dello sviluppo sostenibile. Come è noto, il concetto di sviluppo sostenibile è stato introdotto dalla Commissione Brundtland (1987) ed è definito come uno sviluppo in grado di soddisfare il raggiungimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere il soddisfacimento dei bisogni delle generazioni future.

A partire da questa prima definizione sono state proposte nel corso degli anni molteplici interpretazioni. Mentre la Commissione Brundtland individuava un approccio duale dello sviluppo considerando questioni ambientali ed economiche, i modelli successivi (denominati "triple-bottom lines") propongono una visione più olistica e includono tematiche ambientali, sociali ed economiche. Più recentemente, sono stati sviluppati approcci ancora più inclusivi che aggiungono ulteriori dimensioni al modello quali ad esempio i fattori culturali e quelli economici (Mondini, 2009). La figura 1 propone una rappresentazione degli elementi fondanti nell'ambito delle valutazioni di sostenibilità.

Per quanto fino ad ora affermato, i problemi relativi alle valutazioni di sostenibilità sono problemi di natura multidimensionale per la risoluzione dei quali si è soliti ricorrere alle Analisi Multicriteri (Munda, 2006).

In termini generali, le Analisi Multicriteri (AMC) rappresentano un'ampia famiglia di tecniche in grado di tener conto contemporaneamente