

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Geoscienze

**RELAZIONE SINTENTICA DELL'ATTIVITÀ SVOLTA
RELATIVA ALL'UTILIZZO DEL FINANZIAMENTO
PER ASSEGNI DI RICERCA**

Modellistica idrogeofisica dei sistemi di interazione
suolo–radici

Assegnista: **Dott.ssa Laura Busato**
Responsabile scientifico: Prof. Giorgio Cassiani

Durata assegno: 12 mesi Macro area: 04/A4 Geofisica
Data inizio: 01 Febbraio 2017 Area: GEO/11 Geofisica Applicata

Sede: Dipartimento di Geoscienze, Via Gradenigo 6, 35131, Padova (PD)

1 Relazione sintetica dell'attività svolta

1.1 Introduzione

L'approccio idrogeofisico consiste nell'utilizzare metodi geofisici per caratterizzare e monitorare processi idrologici [9]. La geofisica applicata, infatti, mette a disposizione diverse tecniche adatte a questo tipo di problematiche. Una delle più comuni è la tomografia di resistività elettrica (ERT, [9]) applicata sia da superficie che in foro. Una seconda tecnica è la DTS (Distributed Temperature Sensing), la quale consente di utilizzare il calore come un tracciante naturale. Queste tecniche sono relativamente economiche, non invasive e veloci da utilizzare.

Tuttavia, per sfruttare al meglio le informazioni che questi metodi forniscono, è consigliabile la combinazione con dati provenienti da altre discipline attraverso una opportuna fase di modellazione idrologica. Questo può essere effettuato mediante l'utilizzo di modelli agli elementi finiti *physically-based* quali, a titolo esemplificativo, CATHY [2] e FEMWATER [6]. Durante quest'anno di assegni mi sono concentrata sulla parte di modellazione idrologica di due casi studio monitorati durante il dottorato: zona radicale di un arancio e zona iporreica del torrente Vermigliana.

1.2 Casi studio e metodologie geofisiche applicate

Zona radicale di un arancio L'albero di arancio (*Citrus sinensis*; cv *Tarocco Ippolito*) considerato in questo studio è situato in un aranceto nella Sicilia sud orientale (Lentini, SR) e, al momento delle misure ERT, ha un'età di 20 anni. L'irrigazione ha luogo grazie ad un sistema "a goccia" costituito da quattro gocciolatori in linea per pianta, spazati 1 m. Ogni pianta è quindi irrigata con 16 lh^{-1} di acqua (ogni gocciolatore ha una porta pari a 4 lh^{-1}), su base giornaliera, da Maggio ad Ottobre. Secondo la classificazione USDA (United States Department of Agriculture), il suolo in questo sito ha una tessitura di tipo franco sabbioso.

La pianta studiata era affetta da *Citrus Tristeza virus*, un patogeno che infetta molte varietà commerciali di *Citrus* su portinnesto. Per questo motivo, la chioma dell'albero è stata tagliata durante la primavera del 2014, mentre il sistema radicale è stato lasciato in posto. Questo ci ha permesso di effettuare il monitoraggio ERT sia con la pianta in vita, sia in una fase in cui l'assorbimento di acqua e nutrienti da parte delle radici (*root water uptake*, RWU) non era più attivo. La strumentazione ERT ha previsto l'utilizzo di 72 elettrodi, di cui 48 suddivisi in quattro pozzetti (posizionati ai vertici di un quadrato centrato sulla pianta) e 24 a coprire una griglia superficiale attorno al tronco della pianta e delimitata dai quattro pozzetti stessi. Le misure sono state effettuate con un resistivimetro IRIS Syscal Pro, con una sequenza di 4885 quadripoli, array dipolo-dipolo skip-0. Il tempo di acquisizione è di circa 30 minuti.

Zona iporreica del torrente Vermigliana Il torrente Vermigliana è il corso d'acqua principale dell'alta Val di Sole, origina dallo scioglimento del ghiacciaio Presena (Gruppo della Presanella) ed è uno dei tributari principali del torrente Noce. Esso presenta un regime nivoglaciale, che comprende portate maggiori in estate e minori in inverno. Variazioni in termini di portate si possono osservare anche su scala giornaliera, poiché esse sono generalmente maggiori al mattino rispetto al pomeriggio. La Val di Sole è una valle di origine glaciale, il cui fondo è riempito da till molto eterogeneo (da argille a massi), e da depositi quaternari alla base dei

versanti [3]. Nel dettaglio, il nostro sito è localizzato nei pressi del centro abitato di Vermiglio (TN), in località laghetti di San Leonardo, a 1165 m s.l.m.

In questo sito, la caratterizzazione geofisica ha avuto luogo mediante la combinazione di due differenti metodologie: ERT e DTS. Nel primo caso, la configurazione comprende 72 elettrodi spaziati 1 m, di cui 24 in acciaio inox in superficie e 48 in ottone in foro. Questi ultimi, in particolare, sono posizionati in un foro al di sotto del corso d'acqua, all'interno della zona iporreica, perpendicolarmente al torrente stesso. Le acquisizioni sono state fatte grazie ad un resistivimetro IRIS Syscal Pro con un array dipolo–dipolo skip–0, ciascuna con la durata di circa 30 min, con l'acquisizione di 4885 misure dirette e reciproche. Il monitoraggio ERT stagionale (cioè con acquisizioni circa una volta al mese nella stagione estiva) è stato effettuato dal 2013 al 2016, mentre il monitoraggio *short-term*, con acquisizioni circa ogni ora, ha avuto luogo nei giorni 30 Giugno 2015 e 01 Luglio 2015. Anche nel caso della DTS la strumentazione (cioè il cavo in fibra ottica in modalità *double-ended*) è posizionata al di sotto del torrente, in un foro suborizzontale perpendicolare al corso d'acqua stesso, pochi metri a valle rispetto alla strumentazione ERT. Le acquisizioni sono fatte utilizzando un sistema AP Sensing N4386A Distributed Sensing con intervallo di campionamento e risoluzione spaziale pari a 1 m. In ogni misura sono acquisite tre tracce, con *update time* e tempo di misura entrambi pari a 30 s. I tre valori di temperatura così ottenuti per ogni punto di acquisizione sono quindi mediati, risultando in un unico profilo con 200 valori di temperatura spaziati 1 m. Il monitoraggio DTS è stato compiuto in concomitanza con le misure ERT, a partire da Giugno 2014.

2 Risultati del progetto ottenuti con riferimento agli obiettivi proposti

Zona radicale di un arancio La modellazione è mirata a ricostruire la distribuzione del root water uptake a partire dalle misure ERT. In questa prima fase, il caso studio è sviluppato in modo sintetico mediante il codice CATHY [2]. Per ricreare le condizioni del monitoraggio ERT in campagna (pre e post taglio della chioma), infatti, sono sviluppati due modelli idrologici la cui unica differenza è la presenza, o meno, dell'attività radicale di un albero di arancio.

La mesh tridimensionale agli elementi finiti ($6.4 \times 6.4 \times 4.0 \text{ m}^3$) è costituita da 9282 nodi e 52500 elementi tetraedrici, suddivisi in 25 layer orizzontali con spessore crescente con la profondità (da 0.1 m a 0.5 m). Il nostro interesse è però focalizzato solo su un dominio interno, di dimensioni pari a quelle del volume investigato dall'ERT ($1.2 \times 1.2 \times 1.2 \text{ m}^3$). Il materiale, omogeneo ed isotropo su tutta la mesh, è descritto secondo i parametri indicati da [6] per un materiale franco sabbioso, sia in condizioni sature che insature. La tavola d'acqua è posizionata a 3.0 m di profondità. Le *boundary conditions* consistono in flusso nullo sui nodi al di sopra della tavola d'acqua (condizione di Neumann) ed in un carico di pressione crescente con la profondità nella zona satura (condizione di Dirichlet). L'irrigazione è imposta come una condizione al contorno atmosferica su una piccola porzione della faccia superficiale, con portata pari a 4 lh^{-1} per 5 hd^{-1} per 15 giorni, poi sospesa per 5 giorni, ed infine ripresa per 10 giorni. Le precipitazioni sono considerate trascurabili. La distribuzione del carico di pressione per le condizioni iniziali è ottenuta grazie ad una simulazione di sola irrigazione della durata di 15 giorni. Il tempo totale di simulazione è quindi pari a 15 giorni ed il time-step è mantenuto costante e pari a 120 s.

Il secondo modello ha le stesse caratteristiche del precedente, eccetto per la presenza dell'attività della pianta. In particolare, l'arancio è descritto attraverso una serie di parametri

provenienti sia da dati acquisiti in sito (LAI, PAR, altezza, ecc.) che da letteratura. La calibrazione ha luogo comparando la traspirazione modellata con quella misurata in campagna.

La ricostruzione della distribuzione del RWU avviene tramite la combinazione dei due modelli così ottenuti (solo irrigazione e irrigazione con attività della pianta). La trattazione matematica (tralasciata per motivi di brevità) può essere riassunta come segue. Il modello numerico di infiltrazione può essere descritto come:

$$f(\theta) = L(\theta) - b(\theta) \quad (1)$$

dove $f(\theta)$ è la discretizzazione numerica dell'equazione di Richards, θ è il vettore N -dimensionale che contiene la soluzione in ogni nodo della mesh, $L(\theta)$ comprende le matrici di massa e di rigidità e $b(\theta)$ è il termine noto, che descrive l'azione delle forzanti esterne. In particolare, $b(\theta)$ può essere pensato come la combinazione di un termine di irrigazione ($\tilde{b}(\theta)$) ed un termine di traspirazione ($b_T(\theta)$). La ricostruzione di quest'ultimo termine, in particolare, è l'obiettivo del nostro lavoro. Definendo la differenza in contenuto idrico tra i due modelli (pianta P ed irrigazione I) agli stessi istanti di simulazione come $\hat{\theta} = \theta_P - \theta_I$, la componente di traspirazione ricostruita (b_T^R) è definita da:

$$b_T^R(\theta_P) = L(\theta_P) - \tilde{b}(\theta_P) = L(\hat{\theta} + \theta_I) - \tilde{b}(\hat{\theta} + \theta_I) \quad (2)$$

Nell'equazione (2), però, $L(\hat{\theta} + \theta_I)$ non può essere calcolato, in quanto la distribuzione di contenuto idrico nella realtà non è disponibile ad ogni time-step della simulazione idrologica, ma solo agli istanti delle acquisizioni ERT. È quindi necessario approssimare l'equazione (2) mediante espansione in serie di Taylor. Poiché si ha che $L(\theta_I) - \tilde{b}(\theta_I) = 0$ (dal modello di sola irrigazione), si ottiene:

$$b_T^R(\hat{\theta} + \theta_I) \simeq J_L(\theta_I)\hat{\theta} - J_{\tilde{b}}(\theta_I)\hat{\theta} = J_f(\theta_I)\hat{\theta} \quad (3)$$

dove J è lo Jacobiano, cioè la matrice di tutte le derivate parziali di primo ordine rispetto a θ . Questa approssimazione è tanto più accurata quanto più $\hat{\theta}$ è piccolo.

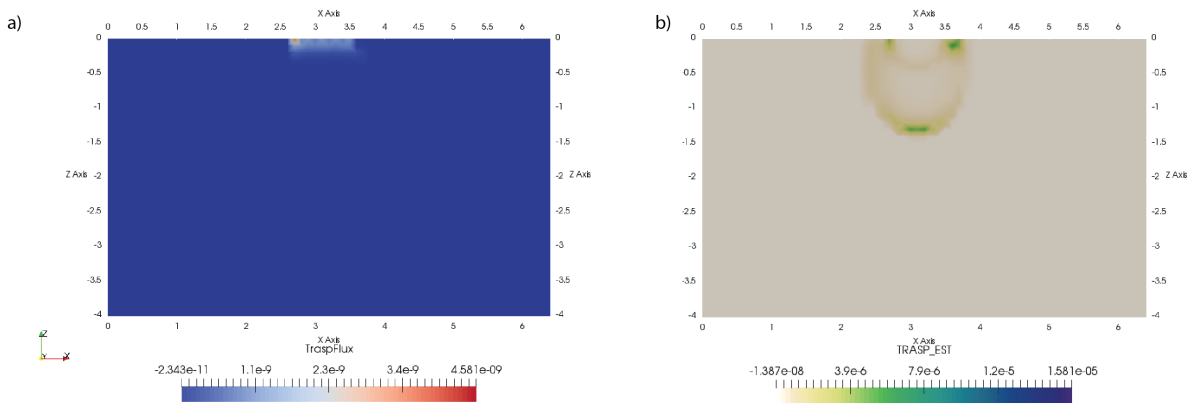


Figura 1: Confronto tra a) RWU simulato nel modello con pianta e b) RWU ricostruito mediante l'applicazione dell'equazione (3).

Fig. 1b mostra il risultato di questa approssimazione alle ore 12:00 del ventesimo giorno di simulazione. Dal confronto con il RWU simulato dal modello con pianta (Fig. 1a), si può

osservare come l'approccio proposto sia in grado di localizzare la posizione delle radici all'interno della mesh, non riuscendo però ad escludere l'effetto dell'irrigazione. Quest'ultima è infatti ben visibile nella Fig. 1b, a tal punto da non permettere una corretta stima del flusso di root water uptake. Questo potrebbe essere causato da diversi fattori, quali un'approssimazione eccessiva mediante espansione in serie di Taylor al primo ordine o un $\hat{\theta}$ non sufficientemente piccolo. È quindi necessario proseguire, in futuro, con ulteriori prove, sempre corroborate da un'attento approccio matematico.

Zona iporreica del torrente Vermigliana La modellazione della zona iporreica del torrente Vermigliana è stata effettuata mediante l'utilizzo di FEMWATER [7] ed è mirata a rappresentare la zona iporreica del torrente durante il monitoraggio short-term. Il dominio di studio è rappresentato da una mesh prismatica triangolare formata da 22464 nodi e 40060 elementi, costruita mediante la combinazione di due software: GMSH [4] e GMS [8] (Fig. 2a). Alla mesh così creata sono quindi attribuite le seguenti *boundary conditions*: condizione di flusso nullo sul fondo e sui lati lunghi paralleli al flusso dell'acqua nel torrente, condizioni di carico idraulico costante sui lati corti a monte e valle, mentre il torrente è simulato grazie ad una condizione di carico idraulico transiente imposto su ciascun nodo del letto del fiume (opportunamente calcolato tenendo conto della pendenza del torrente stesso). Le condizioni iniziali prevedono una tavola d'acqua orizzontale la cui profondità è posta pari al valore medio misurato dal piezometro presente in sito, rispetto all'intervallo di tempo considerato. La mesh è infine suddivisa in due zone, sulla base di quanto mostrato dalle misure ERT: (i) Zona 1 con materiale di origine glaciale, in concordanza con quanto indicato da [3] e (ii) Zona 2 con materiale più elettricamente conduttivo, localizzata nel subalveo, con uno spessore pari ad 1m a partire dal fondo del torrente (Fig. 2a).

Le simulazioni possono essere suddivise in due categorie: (i) simulazioni di solo flusso, mirate a rappresentare le variazioni di carico di pressione all'interno della mesh come conseguenza della variazione di carico idraulico nel torrente, e (ii) simulazioni di trasporto, le quali hanno invece l'obiettivo di rappresentare i fenomeni di trasporto che hanno luogo nel dominio investigato.

La prima tipologia di simulazioni consente la calibrazione del modello, nel caso del torrente Vermigliana effettuata confrontando l'altezza della tavola d'acqua calcolata con quella misurata in sito grazie ad una sonda piezometrica. Il confronto più soddisfacente (Fig. 2b) è ottenuto attribuendo una conducibilità idraulica satura pari a $K_{s,1} = 0.005$ m/s e $K_{s,2} = 0.0003$ in Zona 1 e Zona 2, rispettivamente. Gli altri parametri sono invece ricavati da [6] considerando un suolo franco argilloso e curve di ritenzione idrica di tipo *linear front*. In particolare, la calibrazione è stata effettuata sull'intervallo di tempo compreso tra il 01 Gennaio 2015 (ore 00:00) ed il 01 Luglio 2015 (ore 24:00), con un time-step costante pari a 60.0 s.

La distribuzione di carico di pressione nello spazio e nel tempo così ottenuta è quindi utilizzata come condizione iniziale per il modello di trasporto. Utilizzando gli stessi parametri del modello di flusso e la stessa mesh, il modello di trasporto comprende, come condizione al contorno, il residuo fisso (in mg/l) delle acque del torrente Vermigliana. Questo valore è ottenuto a partire dalla resistività elettrica delle acque del torrente misurata dalla sonda presente in sito. I valori così disponibili sono quindi convertiti nel corrispettivo valore di residuo fisso secondo l'equazione $S = KA$ [5] dove S è il residuo fisso (mg/l), K è la conducibilità elettrica specifica (in $\mu\text{S}/\text{cm}$) e A è una costante ($0.54 \leq A \leq 0.96$). Il modello di trasporto va dal 27 Maggio 2015 (ore 16:00) al 01 Luglio 2015 (ore 24:00), con un time-step costante pari a 60.0 s. La variazione di concentrazione nello spazio e nel tempo così ottenuta è quindi convertita in: (i)

resistività elettrica, mediante l'applicazione delle leggi di Archie [1] e Waxman and Smits [10], per confrontare il modello con le misure di resistività assolute e (ii) variazione percentuale di resistività, per confrontare il modello con le acquisizioni ERT in time-lapse.

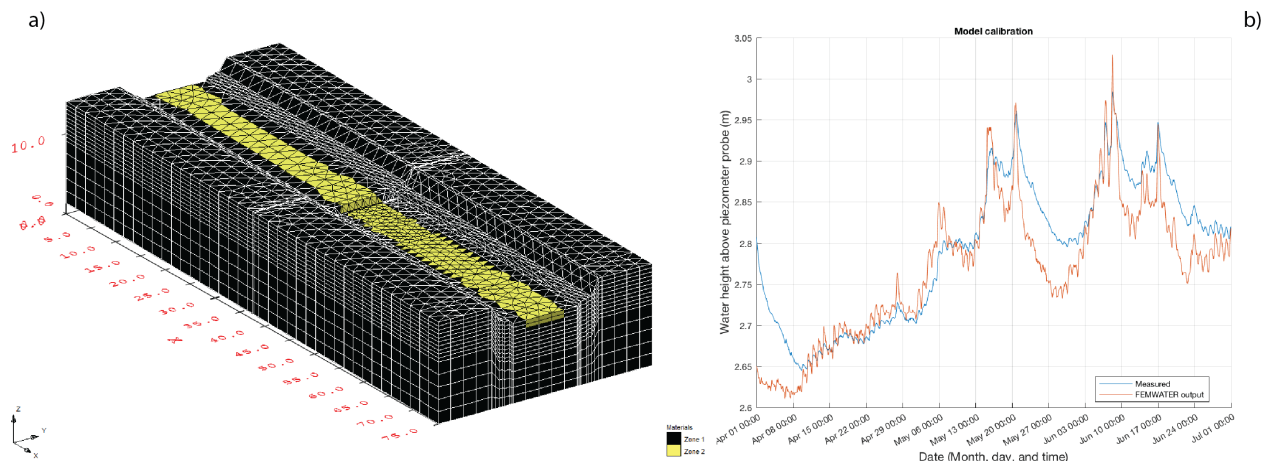


Figura 2: Calibrazione del modello idrologico della zona iporreica del torrente Vermigliana: a) mesh tridimensionale agli elementi finiti e b) confronto tra le oscillazioni della tavola d'acqua misurate e modellate.

I risultati ottenuti (qui non mostrati per motivi di brevità) mostrano una ottima concordanza con il dato ERT sia in termini assoluti che in condizioni di time-lapse. Nel primo caso, infatti, è possibile individuare il dominio a minore resistività nel subalveo, mentre nel secondo caso è possibile ricostruire il trend di variazione di resistività percentuale mostrato dalle misure geofisiche. Questo ci ha permesso di descrivere un dominio caratterizzato da processi di trasporto relativamente veloci, con un'estensione in 2D non disponibile con altre tipologie di misura tradizionali.

3 Conclusioni

I due casi studio considerati durante questo anno di assegno di ricerca mostrano le potenzialità della modellazione idrogeofisica, se corroborata da un solido background matematico e nel caso in cui le acquisizioni geofisiche siano progettate correttamente, sia in termini di risoluzione spaziale che temporale. Nonostante l'approccio proposto nel caso dell'arancio non sia del tutto soddisfacente, esso fornisce importanti indicazioni su come procedere nel futuro, con la possibilità di usufruire di tecniche di *data assimilation*. Il secondo esempio, invece, sebbene sia più tradizionale, mostra come un'acquisizione geofisica innovativa (cioè con gli elettrodi al di sotto del corso d'acqua) fornisca informazioni molto più influenti in una successiva fase di modelling, rispetto alle tradizionali misure puntuali.

Riferimenti bibliografici

- [1] Archie, G.E., 1942 . The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146(01), 54–62.

- [2] Camporese, M., Paniconi, C., Putti, M., and Orlandini, S., 2010, Surface–subsurface flow modeling with path–based runoff routing, boundary condition–based coupling, and assimilation of multisource observation data: *Water Resources Research*, v. 46(2), doi: 10.1029/2008WR007536.
- [3] Dal Piaz, G.V. et al. 2007. Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000, Foglio 042 Malè. Provincia Autonoma di Trento, Servizio Geologico. APAT, Servizio Geologico d'Italia, Roma, 143.
- [4] Geuzaine, C. and Remacle, J.F., 2009. Gmsh: A 3–D finite element mesh generator with built–in pre– and post–processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 79 (11), 1309–1331.
- [5] Hem, J.D., 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water (Vol. 2254). Department of the Interior, US Geological Survey.
- [6] Leij, F.J., 1996. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: user's manual (Vol. 96, No. 95). National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency.
- [7] Lin, H.C., Richards D.R., Yeh G.T., Cheng J.R., Chang H.P., and N.L. Jones, 1996. FEMWATER: A three–dimensional finite element computer model for simulating density dependent flow and transport. Technical report, 129 pp., U.S. Army Eng. Waterways Exp. Station, Vicksburg, Miss.
- [8] Owen, S.J., Jones, N.L., and Holland, J. P., 1996. A comprehensive modeling environment for the simulation of groundwater flow and transport. *Engineering with computers*, 12(3), 235–242.
- [9] Rubin, Y., and Hubbard, S. S. (Eds.), 2006. *Hydrogeophysics* (Vol. 50). Springer Science & Business Media.
- [10] Waxman, M. H., and Smits, L. J. M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8(02), 107–122.

4 Elenco delle pubblicazioni scientifiche incluse le partecipazioni a convegni

- Cassiani, G., Boaga, J., Busato, L. e Perri, M.T., 2017. Characterization and monitoring of the riparian and hyporheic zones, GELMON, Fourth International Workshop on Geoelectrical Monitoring, Vienna, 22–24 Novembre. Invited talk.
- Vanella, D., Cassiani, G., Busato, L., Boaga, J., Barbagallo, S., Binley, A., and Consoli, S., 2018. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil–root interactions during deficit irrigation. *Journal of Hydrology*, 556, 310–324.
- Busato, L., Boaga, J., Cassiani, G., e Perri, M.T. 2018. Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: a case study along the Vermigliana creek (Trentino – Alto Adige Region, Italy). *In preparation*

5 Altre attività

- Didattica integrativa: 24 ore, “Fisica Terrestre e Geofisica Applicata”, Responsabile: Prof. Zaja, A., Laurea di primo livello in Scienze Geologiche (2017/2018);
- Didattica: 2 ore, “Geology and Geophysics”, Responsabile: Prof. Martin, S., Laurea Magistrale in Environmental Engineering (2017/2018);
- Donini, F., 2017, Tomografia di resistività elettrica a supporto della modellazione idrologica: applicazioni su un argine dell'Adige [Tesi di Laurea Magistrale]: Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova. Relatore: Prof. Cassiani, G., Dott. Boaga, J.. Correlatore: Dott.ssa Busato, L.;
- Campagna di misure geofisiche (tomografia di resistività elettrica – ERT, e mise-à-la-masse – MALM) presso un aranceto del Centro di ricerca per l'agrumicoltura e le colture mediterranee del consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia (CREA-ACM, Acireale, Sicily);

- Campagna di misure geofisiche (tomografia di resistività elettrica – ERT, e mise-à-la-masse – MALM) presso il fiume Selke (Saxony-Anhalt, Germania) per il monitoraggio di un test con tracciante salino. In collaborazione con Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) di Lipsia.