

Relazione Scientifica

Angela Perrone

Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMAA)

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Titolo del programma:

Analysis of time-lapse ERT acquired in hydrogeological hazard areas

Dipartimento di afferenza:

Scienze del sistema terra e tecnologie per l'ambiente

Istituto ospitante:

British Geological Survey – Natural Environmental Research Council – Geophysical Tomography Team (Keyworth, Nottingham).

Durata:

21 giorni, 05/07/2016 – 26/07/2016



Introduzione	3
I. Algoritmi per l'inversione di tl-ERT	5
II. Visualizzazione in 3D	5
III. Visita ai siti test	6
IV. Conclusioni e sviluppi futuri	10
V. Ringraziamenti	11
VI. Bibliografia	12

Introduzione

Le frane sono fenomeni complessi il cui studio richiede necessariamente l'applicazione di un approccio multidisciplinare basato sull'integrazione di diverse tecniche di indagini in grado di fornire informazioni su molteplici fattori, alcuni dei quali direttamente coinvolti nell'innescò del movimento di massa.

Le tecniche frequentemente utilizzate per lo studio di tali fenomeni prevedono l'utilizzo di sensori posizionati su diverse piattaforme (satellitari, aeree e in situ) consentendo di ottenere informazioni principalmente sullo stato di attività della frana, sulle condizioni climatiche che insistono nell'area di studio e sulle caratteristiche geo-meccaniche e idrogeologiche del materiale coinvolto nel movimento. Queste ultime informazioni, estremamente importanti per la definizione dei possibili fattori di innescò del movimento studiato, sono molto spesso ottenute mediante l'utilizzo di sensori in situ (sondaggi geognostici, prove di laboratorio su campioni, piezometri) e hanno carattere puntuale. Questo rappresenta un limite nello studio delle frane, che per loro natura sono da collocarsi nei target di tipo volumetrico, e uno stimolo a sperimentare nuove tecniche di indagine che consentano di superare tale limite.

Negli ultimi anni, tra i metodi di prospezione geofisica per l'investigazione e il monitoraggio di aree ad elevato rischio idrogeologico, la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) ad alta risoluzione superficiale e profonda ha assunto un ruolo sempre più importante (Perrone et al., 2014). Tale tecnica, assolutamente non-invasiva, ha il pregio di associare un basso costo di esplorazione ed un'elevata risoluzione nella caratterizzazione dell'assetto geologico-strutturale del sottosuolo investigato, mediante l'individuazione di contrasti di resistività spesso ascrivibili a contatti litologici e alla presenza di strutture e superfici sepolte. Nelle aree in frana è spesso applicata successivamente al verificarsi di un evento con lo scopo di individuare la superficie di scivolamento, definire lo spessore del materiale coinvolto nel movimento, localizzare aree caratterizzate da un maggior contenuto di acqua e quindi potenzialmente instabili. L'esperienza maturata dalla comunità scientifica in questo ambito ha portato alla consapevolezza di sperimentare e testare l'utilizzo della ERT anche durante le fasi di monitoraggio di un'area instabile. Infatti, tra i fattori che possono influenzare i valori di resistività elettrica vi è anche il contenuto di acqua che, come è ben noto, gioca spesso un ruolo determinante nell'innescò di una frana. Tipicamente il contenuto di acqua nel suolo viene misurato utilizzando sensori puntuali che possono essere installati a diverse profondità oppure distribuiti spazialmente su una determinata area. In tal caso, i costi del sistema di monitoraggio diventano elevati, non riuscendo comunque a superare il carattere puntuale delle misure ottenute.

L'utilizzo di una tecnica indiretta come la ERT, mediante la realizzazione di immagini del sottosuolo 2D e 3D, consente invece di studiare un volume di materiale maggiore utilizzando sensori non invasivi e a basso costo, contenendo così i costi del sistema di monitoraggio proposto.

Sebbene esistano già delle correlazioni tra la resistività elettrica e il contenuto di acqua (Archie, 1942; Waxman and Smits, 1968), la comunità scientifica è attualmente molto interessata alla definizione di correlazioni quantitative che siano rappresentative dei diversi materiali presenti in natura e potenzialmente coinvolti in un movimento di massa, con particolare attenzione rivolta alla definizione di soglie di allerta per la resistività.

La definizione di tali correlazioni e l'impostazione delle possibili soglie, anche grazie al confronto con dati derivanti da altra strumentazione (stazioni meteo, sensori per la stima dell'umidità del suolo, piezometri), porterebbe a considerare la tomografia elettrica in modalità time-lapse 'tl-ERT' (ossia con acquisizioni continue nel tempo) quale valido strumento di monitoraggio di aree interessate da fenomeni di dissesto idrogeologico.

I ricercatori del Geophysical Tomography Team (GTT) del British Geological Survey (BGS) sono da diversi anni impegnati nell'applicazione della tl-ERT per il monitoraggio di aree paludose e di frane superficiali ubicate nella zona centro-settentrionale dell'Inghilterra. Il know-how del team guidato dal Dr. Chambers è tale da aver portato alla progettazione e realizzazione di 2 sistemi di acquisizione in continuo della resistività elettrica (sistema ALERT e sistema PRIME), con sensoristica a basso costo e controllabili in remoto, nonché al successivo sviluppo di algoritmi per il processing e l'inversione dei dati acquisiti (Wilkinson et al., 2010; Chambers et al., 2011; Chambers et al., 2012). L'attività svolta durante il programma di mobilità è consistita nella valutazione dell'applicabilità di tali algoritmi per l'analisi di dati acquisiti dai ricercatori del laboratorio geofisico del CNR-IMAA a cui la scrivente afferisce, utilizzando un diverso approccio di misura, in campagne di monitoraggio precedentemente effettuate in aree in frana del sud Italia. Contestualmente, ci si è confrontati sull'utilizzo di software di visualizzazione per la restituzione in 3D di immagini tomografiche. Inoltre, la visita di alcuni siti test dove i sistemi per l'acquisizione della tl-ERT progettati e sviluppati dai ricercatori del BGS sono operativi, ha permesso di approfondire la conoscenza sui principi di funzionamento di tali sistemi e di discutere e valutare la loro applicabilità in siti test interessati da fenomeni di deformazione in un contesto geologico più complesso rispetto a quello inglese, quale quello che caratterizza la catena appenninica italiana.

I. Algoritmi per l'inversione di tl-ERT

L'acquisizione della resistività in continuo nel tempo è un concetto abbastanza recente e, in quanto tale, ancora oggetto di notevole attenzione da parte della comunità scientifica. Molteplici sono i campi di applicazione e, quindi, le richieste di progettare e sviluppare sistemi di acquisizione performanti e algoritmi in grado di elaborare un'elevata quantità di dati.

Negli ultimi anni, il GTT del BGS è stato in grado di conseguire entrambe le cose, progettando e realizzando sistemi di acquisizione a basso costo controllabili in remoto e sviluppando algoritmi innovativi per il processing e l'inversione dei dati acquisiti da tali sistemi (Wilkinson et al., 2010). Gli algoritmi sviluppati dai ricercatori del GTT-BGS sono stati pensati principalmente per dati ottenuti utilizzando una specifica metodologia di acquisizione basata sull'uso della misura reciproca e del dispositivo dipolo-dipolo. Durante lo svolgimento del programma STM si è considerata la possibilità di modificare tali algoritmi per applicarli all'elaborazione e analisi di due consistenti set di dati, acquisiti durante il monitoraggio di due diverse aree in frana dell'Italia meridionale. I sistemi utilizzati nelle due campagne sono ovviamente diversi da quelli in uso presso i siti di indagine del BGS. I dati, inoltre, sono stati registrati senza utilizzare l'approccio della misura reciproca e mediante l'array Wenner-Schlumberger e si presentano molto rumorosi. Il confronto con i ricercatori del GTT-BGS ha evidenziato le maggiori criticità da affrontare nell'applicazione degli algoritmi già esistenti a tali dati, nonché la mancanza di informazioni aggiuntive, quali per esempio la misura di temperatura del suolo, utili per la loro correzione. Si è quindi pianificata un'attività di ricerca che richiederà un tempo maggiore rispetto ai 21 giorni previsti dal programma STM e che riguarderà: i) il filtraggio dei dati acquisiti mediante l'applicazione di tecniche statistiche, ii) la possibilità di installare nei siti investigati sensori di temperatura del suolo per un periodo di almeno 6 mesi, così da correggere i dati già acquisiti, iii) la scelta di un dataset ridotto sul quale applicare gli algoritmi di inversione time-lapse.

II. Visualizzazione in 3D

L'inversione e la visualizzazione dei dati di resistività elettrica è generalmente effettuata mediante l'applicazione di software commerciali disponibili sul mercato. Durante il periodo di permanenza presso il BGS, il software E4D per l'inversione dei dati e il software Paraview per la visualizzazione delle immagini tomografiche, entrambi open source, sono stati applicati ai dati di resistività elettrica acquisiti dai ricercatori dell'IMAA sulla frana di Montaguto (AV) nell'Appennino Meridionale. Si tratta di una frana di grandi dimensioni oggetto di monitoraggio

da parte del Dipartimento di Protezione Civile e di diversi istituti di ricerca, che ha interessato nel suo movimento sia la rete viaria che quella ferroviaria procurando numerosi disagi alla popolazione. L'applicazione di tali software è stata preceduta dalla preparazione dei file mediante la scrittura di script in ambiente Matlab. Il risultato di tale attività (fig.1) è stato inserito all'interno del lavoro scientifico Bellanova et al., 2016 (under review) sottomesso alla rivista Natural Hazards and Earth System Sciences (Nhess).

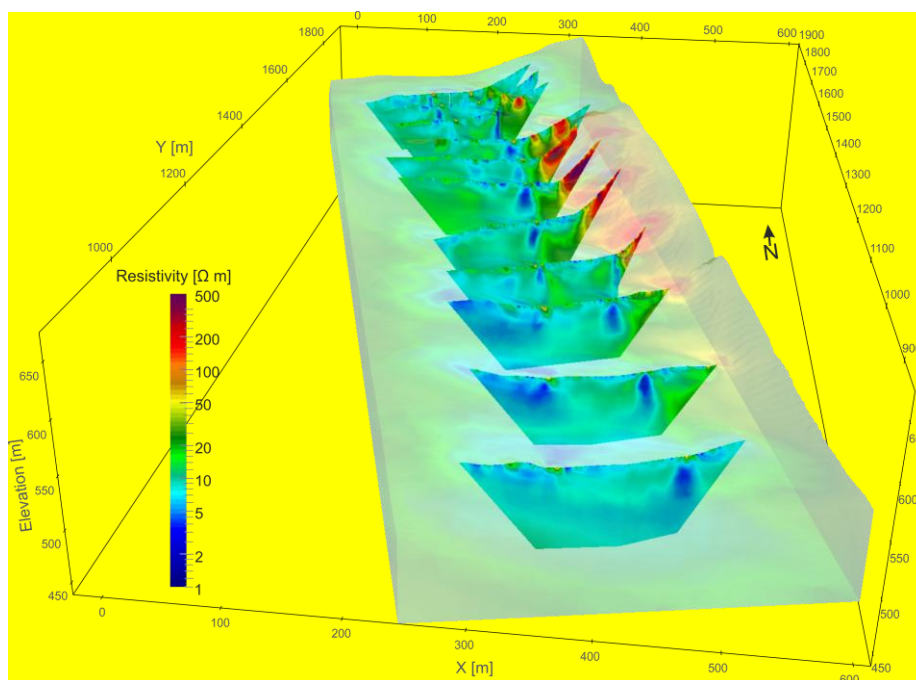


Figura 1 - Modello 3D della fana di Montaguto realizzato utilizzando il software di inversione E4D e il software di visualizzazione grafica Paraview.

III. Visita ai siti test

Nell'ultimo decennio, i ricercatori del GTT-BGS hanno progettato e sviluppato due diversi sistemi per l'acquisizione in continuo della resistività elettrica: il sistema ALERT (Automated time-Lapse Electrical Resistivity Tomography) e il sistema PRIME (PRoactive Infrastructure Monitoring and Evaluation).

In particolare, il *sistema ALERT* è stato sviluppato con lo scopo di misurare in tempo reale le proprietà geoelettriche, idrologiche e idrochimiche del terreno. Accanto a sensori a basso costo integra strumentazioni commerciali già esistenti e frequentemente utilizzati dalla comunità scientifica. Il sistema è costituito da uno o più array di elettrodi e può essere interrogato da remoto tramite telemetria wireless (satellite, GPRS, GSM/3G, Internet) per fornire immagini

volumetriche del sottosuolo ad intervalli regolari. I dati vengono trasmessi, trasformati, immagazzinati, invertiti e visualizzati utilizzando server BGS dedicati e un portale web sicuro. L'intero processo, dall'acquisizione alla elaborazione di immagini sul PC del laboratorio, è automatizzato e senza soluzione di continuità, permettendo che ingenti serie temporali di dati siano registrate con poco o nessun intervento manuale.

Il sistema *ALERT* è da anni in funzione presso uno dei siti test visitati durante il periodo di svolgimento del programma STM per monitorare una frana superficiale attualmente attiva e ubicata ad Hollin Hill (fig.2) in un'area posta 4 miglia ad ovest della città di Malton nel North Yorkshire (Chambers et al., 2011; Merritt et al., 2014). Il sistema acquisisce in 3D e quindi restituisce un'immagine volumetrica dell'area in tempo reale. Sullo stesso versante sono installati una rete di sensori per la stima dell'umidità del suolo, un sensore COSMOS, sensori piezometrici ed inclinometrici e un accelerometro per la misura dell'accelerazione sismica.

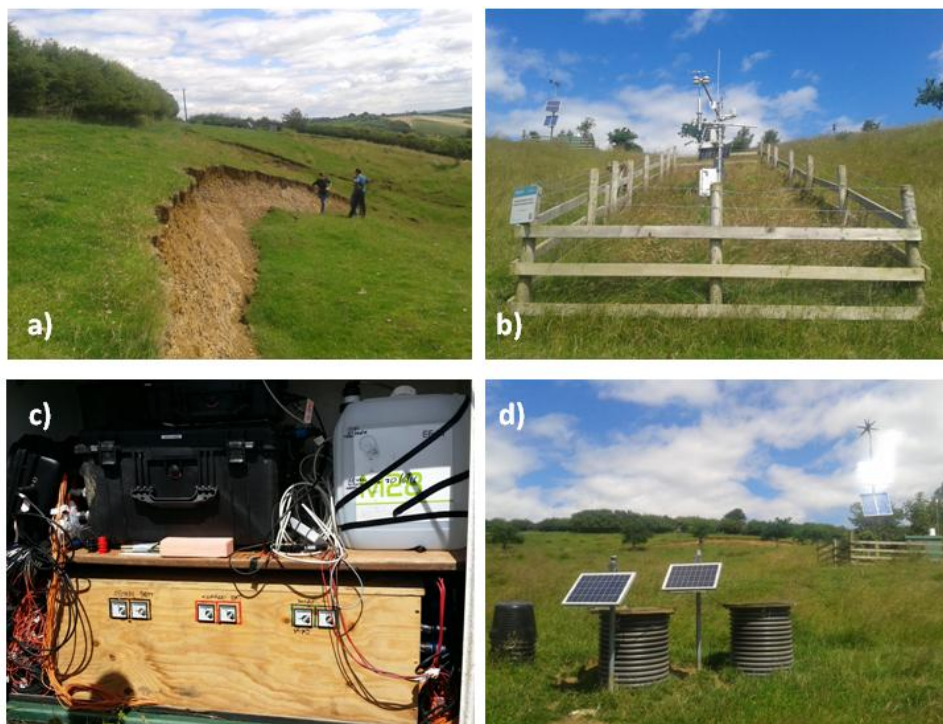


Figura 2 - Sistema ALERT installato sulla frana di Hollin Hill a 4 miglia ad ovest della città di Malton nel North Yorkshire. a) Una delle nicchie di distacco; b) sensore Cosmos; c) sistema ALERT; d) sensori piezometrici ed inclinometrici

Il sistema *PRIME* è un sistema a basso costo progettato per il monitoraggio da remoto di infrastrutture interessate da fenomeni di rischio naturale. Il sistema combina le emergenti tecnologie di imaging di geofisica della terra solida con l'innovativo trasferimento dei dati in

telemetria e l'accesso ad un portale web dedicato. È un sistema che sfrutta tecnologie intelligenti per ottenere immagini relative alla condizione fisica del sottosuolo utilizzando i metodi diagnostici comunemente impiegati nella fisica medica. A differenza del sistema ALERT, il sistema PRIME è totalmente innovativo e non considera l'utilizzo di strumentazione già presente in commercio. Inoltre, grazie agli accorgimenti adottati dagli ingegneri elettronici coinvolti nella progettazione e realizzazione dello stesso, consente di ottenere dati con un elevato rapporto segnale/rumore facilitando, in questo modo, la fase di elaborazione ed analisi. Due sono i siti test visitati durante il periodo di mobilità in cui il sistema PRIME è già in acquisizione: le wetlands nel territorio della città di Boxford nel Berkshire (UK) e i cliff che caratterizzano la costa orientale della Gran Bretagna nella zona di Aldbrough nel East Riding of Yorkshire (UK). Nel primo sito (fig.3) lo scopo dello studio è effettuare un'analisi volumetrica dell'architettura dei depositi complessi presenti alla base delle wetland usando la tomografia di resistività elettrica 3D (Chambers et al., 2014). I dati di resistività, se acquisiti in time-lapse, consentono di migliorare la conoscenza delle interazioni tra l'acqua superficiale e quella sotterranea al fine di risalire ai processi idrogeologici che si verificano all'interno delle wetlands (Uhlemann et al., 2016).



Figura 3 - Sistema Prime installato nelle wetlands nei pressi della città di Boxford nel Berkshire (UK). a) wetlands; b) sistema PRIME; c) zoom sul sistema di acquisizione; d) strumentazione elettromagnetica e topografica

Nel secondo sito test (fig.4) l'attività è da considerarsi ancora allo stato embrionale; gli elettrodi, distanziati 1 metro, sono stati recentemente collocati in 2 pozzi e lungo la superficie con lo scopo di monitorare le variazioni della resistività elettrica dovute al verificarsi di imponenti collassi di materiale detritico lungo la costa. Nello stesso sito verranno a breve installati anche sensori inclinometrici e piezometrici per completare le attività di monitoraggio.



Figura 4 - Sistema Prime installato sulla costa orientale della Gran Bretagna nei pressi di Aldbrough nel East Riding of Yorkshire (UK): a) sistema Prime; b) e c) esempi di collasso.

La visita dei siti test e l'approfondimento dei principi di funzionamento dei sistemi di monitoraggio progettati e sviluppati dai ricercatori del GTT-BGS, hanno consentito di evidenziare i vantaggi dell'utilizzo di strumentazione a basso costo in aree potenzialmente instabili. Attualmente i sistemi sono installati su aree di dimensioni ridotte e studiano le caratteristiche dei terreni nei primi strati del sottosuolo (< 10m). Si è discussa la possibilità di utilizzare gli stessi sistemi in zone a geologia complessa, dove il target da investigare è posizionato a maggior profondità (> 10 m). Si è evidenziata la necessità di effettuare dei test nelle aree di interesse propedeutiche all'installazione della strumentazione. Tale attività potrebbe essere oggetto di una proposta progettuale che veda coinvolti come utenti finali i gestori delle reti ferroviarie piuttosto che della rete viaria in aree a forte dissesto idrogeologico, nonché le amministrazioni pubbliche preposte alla difesa del suolo e delle infrastrutture.

IV. Conclusioni e sviluppi futuri

L'attività di ricerca svolta durante i 21 giorni trascorsi con i ricercatori del Geophysical Tomography Team del British Geological Survey con sede a Keyworth (Nottingham) si è concentrata essenzialmente su due obiettivi:

- conoscere e testare il funzionamento dei nuovi sistemi di acquisizione della resistività elettrica per la realizzazione di tomografie 3D e 4D basati su sensoristica a basso costo e sviluppati dai ricercatori del team ospitante;
- approfondire lo studio sugli algoritmi di processing, inversione e visualizzazione dei dati sviluppati presso il GTT, al fine di valutarne l'applicabilità a dati acquisiti in aree a maggior complessità geologica come quelle presenti nell'appennino italiano.

Per il raggiungimento del primo obiettivo, dopo la visita ai laboratori dell'istituto per prendere visione della sensoristica utilizzata nei sistemi sviluppati, è stato necessario recarsi presso alcuni siti di indagine dove tali sistemi sono operativi. La prima settimana di permanenza è stata quindi dedicata a questo tipo di attività. I sistemi sono utilizzati per monitorare tre diverse tipologie di fenomeni: una zona precedentemente paludosa e successivamente bonificata che si trova nelle wetlands vicino la cittadina di Boxford nel Berkshire (UK); un'area in frana, interessata da colate di terra veloci, ubicata nei pressi di Malton nel North Yorkshire (UK); e, una zona di scogliera con movimenti gravitativi intensi ubicata sul Mare del Nord nella zona orientale dell'Inghilterra e nei pressi della cittadina di Aldbrough nel East Riding of Yorkshire (UK).

Le successive due settimane sono state invece dedicate allo studio degli algoritmi di analisi ed inversione sviluppati presso il BGS con lo scopo di valutarne l'applicabilità a dati acquisiti in aree del sud Italia affette da fenomeni franosi decisamente più complessi da un punto di vista dell'assetto geologico, geomorfologico e strutturale di quelli che interessano i siti test inglesi visitati. I dati infatti si presentano molto rumorosi e non sono di facile analisi mediante gli approcci standard; i ricercatori del BGS stanno sviluppando un nuovo algoritmo che dovrebbe consentire di eliminare in maniera automatica gli errori dal set di dati acquisiti su lunghi periodi, così da renderli poi trattabili con i software di inversione attualmente in commercio.

In questa prima fase si è deciso di procedere alla scelta di un dataset più ridotto, sulla elevata mole di dati acquisiti dal gruppo di ricerca IMAA, e di cominciare ad operare i primi filtraggi. Insieme con i ricercatori del BGS si tenterà di adattare il loro algoritmo per poter trattare dati più rumorosi.

Lo svolgimento delle attività previste dal programma di mobilità ha ampliato il quadro di conoscenze sui nuovi sistemi di acquisizione dei dati di resistività elettrica che saranno presto in commercio e sugli algoritmi in via di sviluppo. E' stato inoltre possibile testare software open source per l'inversione e la restituzione grafica delle immagini tomografiche .

La permanenza della scrivente al BGS ha dato inizio ad una collaborazione sicuramente proficua tra due gruppi di ricerca che da moltissimi anni lavorano sugli stessi argomenti ma che non hanno mai avuto modo di collaborare nell'ambito di proposte progettuali o di programmi di collaborazione.

A tal proposito si può specificare che è in fase di preparazione una proposta progettuale relativa all'*early warning* delle frane, la cui deadline è prevista per il 15 settembre 2016, nella quale si auspica di poter coinvolgere il Geophysical Tomography Team in veste di consulente scientifico del CNR-IMAA. Il coinvolgimento del team del BGS garantirebbe l'utilizzo di sistemi innovati e a basso costo nonché di nuovi algoritmi di processing che verranno adattati all'analisi dei dati acquisiti.

V. Ringraziamenti

Si ringraziano:

- il CNR, per la concessione del finanziamento nell'ambito del programma di "Short Term Mobility 2016" con il quale la presente attività di ricerca è stata svolta;
- il BGS, per le facilities (strumentazione e mezzi di trasporto) messe a disposizione durante il periodo di attività;
- il dott. Chambers e tutto il Geophysical Tomography Team, per la collaborazione fornita, per l'organizzazione delle visite nei siti di indagine utili alla conoscenza del modo di operare dei nuovi sistemi di acquisizione dati sviluppati, per il tempo dedicatomi nella spiegazione dei nuovi algoritmi sviluppati per il processing, l'inversione e la visualizzazione dei dati di resistività, per la disponibilità mostrata e il coinvolgimento in tutte le loro attività di ricerca durante la mia permanenza.

VI. Bibliografia

- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Pet. Trans. AIME*. 146, 54-62.
- Bellanova, J., Calamita, G., Giocoli, A., Luongo, R., Perrone, A., Lapenna, V., Piscitelli, S. (2016). Electrical resistivity tomography surveys for the geoelectric characterization of the Montaguto landslide (southern Italy). Manuscript under review for journal *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*
- Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Uhlemann, S., Sorensen, J.P.R., Roberts, C., Newell, A.J., Ward, W.O.C., Binley, A., Williams, P.J., Goody, D.C., Old, G., Bai, L. (2014). Derivation of lowland riparian wetland deposit architecture using geophysical image analysis and interface detection. *Water Resources Research* 50, 5886-5905.
- Chambers et al. (2012). Bedrock detection beneath river terrace deposits using three-dimensional electrical resistivity tomography. *Geomorphology* 177-178, 17-25.
- Chambers, J.E., Wilkinson, P.B., Kuras, O., Ford, J.R., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Pennington, C.V.L., Weller, A.L., Hobbs, P.R.N., Ogilvy, R.D. (2011). Three-dimensional geophysical anatomy of an active landslide in Lias Group mudrocks, Cleveland Basin, UK. *Geomorphology* 125, 472-484.
- Merritt, A.J., Chambers, J.E., Murphy, W., Wilkinson, P.B., West, L.J., Gunn, D.A., Meldrum, P.I., Kirkham, M., Dixon, N. (2014). 3D ground model development for an active landslide in Lias mudrocks using geophysical, remote sensing and geotechnical methods. *Landslides* 11, 537-550.
- Uhlemann, S., Sorensen, J.P.R., House, A.R., Wilkinson, P.B., Roberts, C., Goody, D.C., Binley, A.M., Chambers, J.E. (2016). Integrated time-lapse geoelectrical imaging of wetland hydrological processes. *Water Resources Research* 52, doi.10.1002/2015WR017932.
- Waxman, M.H., Smits, L.J.M. (1968). Electrical conductivities in oil bearing sands. *J. Soc. Pet. Eng.* 8, 107-122.
- Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Meldrum, P.I., Gunn, D., Ogilvy, R.D., Kuras, O. (2010). Predicted the movements of permanently installed electrodes on an active landslide using time-lapse geoelectrical resistivity data only. *Geophys. J. Int.* 183, 543-556.

Firma del Fruitore

Dr.ssa Angela Perrone

