

Il metodo Airborne Em: un approccio innovativo allo studio del territorio

ANTONIO MENGHINI¹, ANDREA VIEZZOLI²

Riassunto

Si riportano alcuni casi di applicazione del metodo airborne EM, con finalità idrogeologiche, geotecniche e ambientali. La continua innovazione, sia nel campo della strumentazione che della elaborazione dei dati, ha reso sempre più versatile questa tecnica, in grado di fornire dati di notevole dettaglio su aree molto vaste, garantendo anche una notevole profondità di indagine, con tempi e costi inimmaginabili per la classica geofisica "a terra".

I campi più frequenti di applicazione riguardano la ricerca di corpi idrici sotterranei, in termini di valutazione della loro potenzialità e vulnerabilità, lo studio dei fenomeni di ingressione marina lungo le fasce costiere, dei movimenti franosi e di casi di inquinamento.

Abstract

Among geophysical applied techniques, Airborne electromagnetics saw one of the most significant developments of the last decade. Thanks to major improvements in data acquisition, processing and inversion and integration, it has become a very effective tool for environmental mapping. Applications span from groundwater mapping and management, to geotechnical, to exploration. It provides high spatial resolution (in the order of tenths of m), down to considerable depths (on average, 200 m), fast, cost effectively, in a totally non invasive way. These characteristics made it one of the major methodologies applied by Geological surveys in several countries. The raw data measures the variability over time (frequency) of the currents induced in the ground by a transmitter. These data are then inverted to the electrical resistivity (conductivity) model consistent to the measured response. Such geophysical models can then be translated into geological and hydrogeological ones, integrating them with ancillary information. In order to achieve best results, the raw data needs to

be accurate. It then requires accurate processing and inversion, in order to achieve quantitative models free from artifacts. We present briefly the methodology, some key aspects for its successful application, and some case studies.

Following these insights, in 1889, a second edition

Termini chiave/Keywords

Acque sotterranee, Elettromagnetismo nel dominio del tempo, TDEM,

Groundwater, Time Domain Electromagnetics, TDEM, Airborne Electromagnetics

Premessa

Tra i recenti sviluppi della Geofisica applicata, il metodo airborne EM appare senza dubbio uno dei più innovativi ed interessanti, essendo in grado di fornire informazioni di estremo dettaglio (con risoluzione laterale nell'ordine di poche decine di metri) e sino a notevoli profondità (mediamente oltre i 200 m), su aree molto vaste (decine e centinaia di Km²).

Tali caratteristiche lo rendono uno strumento quantomai efficace per lo studio del territorio, anche in prospettiva di pianificazione, per lo sfruttamento ad esempio delle risorse idriche sotterranee su scala comunale, provinciale o regionale, per lo studio di fenomeni franosi su scala di bacino idrografico, per lo studio dell'intrusione marina lungo le fasce costiere: tutti campi di indagine che, vista la loro estensione areale, rendono improponibile, sia dal punto di vista economico che di tempi, il classico approccio della "geofisica a terra". Che la metodica sia quanto mai matura ed idonea per questo tipo di applicazioni, lo dimostra il fatto che sono sempre più numerosi, a livello mondiale, gli Enti Pubblici che l'hanno già inserita in alcuni progetti di ampio respiro, soprattutto per lo studio delle risorse idriche. Un esempio su tutti è fornito dal Ministero

¹ Aarhus Geophysics, Via Giuntini, 13; 56023 Navacchio (PI); am@aarhusgeo.com

² Aarhus Geophysics, Via Giuntini, 13; 56023 Navacchio (PI); av@aarhusgeo.com

dell'Ambiente Danese, che ha inserito le prospezioni airborne EM come propedeutiche, nell'ambito di un grande progetto nazionale sullo studio e sulla tutela delle acque sotterranee (MOLLER et alii, 2009); il Servizio Geologico Statunitense sta avviando una iniziativa simile, mentre quello Australiano le utilizza addirittura per identificare zone idonee per la ricarica artificiale degli acquiferi.

Il dato che viene fornito dalla prospezione è costituito dalla distribuzione tridimensionale della resistività elettrica (sia laterale che in profondità), ma si possono poi estrarre informazioni derivate, come la geometria di un particolare elettrostrato che abbia un qualche significato idrogeologico (acquifero o

acquiclude). Data la sua densità di indagine, la metodologia si integra molto bene con dati ancillari, sia da pozzo che da remote sensing satellitare, o da geofisica superficiale

Nel presente articolo si mostreranno i principali campi di applicazione di questa tecnica.

Cenni sul metodo tdem

Il metodo elettromagnetico nel dominio del tempo (TDEM) è stato sviluppato contemporaneamente, a partire grossomodo dagli anni '70, dalle comunità tecnico-scientifiche russe, canadesi ed australiane, per la ricerca di giacimenti minerali. E' intorno agli anni '80 che il metodo ha trovato una più vasta

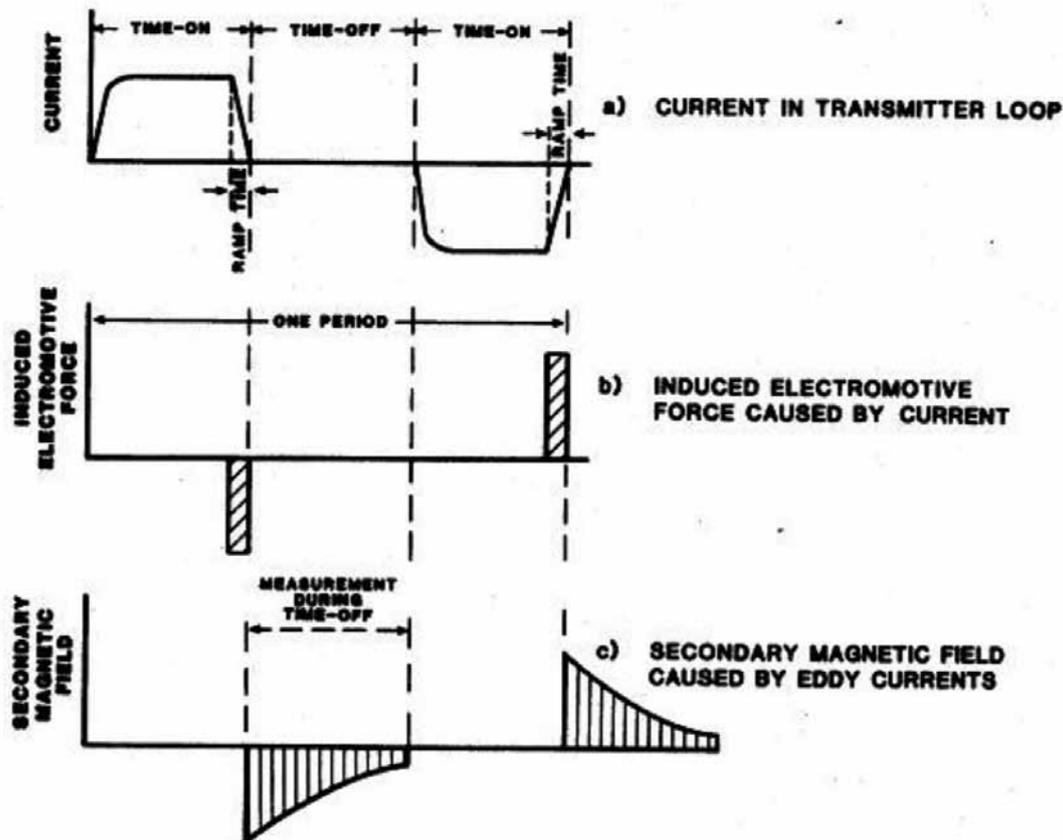


Fig. 1 – La corrente immessa nel loop trasmettente ha di solito una forma d'onda quadra (in alto), con tempi di energizzazione (time-on) uguali a quelli di stacco della corrente (time-off). La corrente impiega un certo tempo per annullarsi entro il circuito (tempo di "turn-off" o "ramp time"). A causa di questa brusca variazione della corrente, si produce un campo magnetico primario (al centro), di brevissima durata, il quale, a sua volta, dà vita ad un campo magnetico secondario, che viene rilevato come curva di decadimento del voltaggio (transiente), durante il time-off. Il transiente contiene le informazioni sulla resistività del sottosuolo.

Fig. 1 – Square waveform of the current injected into the transmitting loop: time-on equal to time-off. Turn-off or Ramp-time is the time needed for the complete zeroing of the current. The abrupt decreasing of the current into the loop produces the primary magnetic field (in the middle), that produces, in turn, the secondary magnetic field. The latter is measured as a voltage decay (transient), during time-off. The transient contains the information about the ground resistivity.

applicazione in campo idrogeologico, sino ad essere utilizzato più recentemente per scopi geotecnici (rilevamento dello stato fessurativo di ammassi rocciosi, ricostruzione stratigrafica del sottosuolo, etc.) ed ambientali (ricerca di inquinanti, ordigni bellici inesplosi, etc.).

Il sondaggio TEM (Transient Electro Magnetic) permette di ricostruire un modello monodimensionale (1D) del sottosuolo, individuando degli "elettrostrati", cioè delle unità geoelettriche caratterizzate da una ben definita resistività elettrica (espressa in ohm-m). Realizzando pertanto un sondaggio TEM, è possibile definire la stratigrafia del sottosuolo, sino a profondità variabili in funzione del sistema utilizzato e delle condizioni ambientali e stratigrafiche del sito indagato. Per eseguire un sondaggio "a terra" bisogna distendere un cavo elettrico in forma di quadrato o di rettangolo (loop) che funziona da trasmettitore, alimentato da un'unità trasmittente che può essere alimentata tramite batteria o tramite gruppo elettrogeno; in questo modo è possibile energizzare il sistema con correnti di intensità variabili da 2 ad oltre 100 A.

La corrente di energizzazione viene di solito inviata in forma di onde quadre (Fig. 1), per cui, ad ogni impulso positivo (time-on), segue un egual periodo, durante il quale la corrente viene azzerata (time-off); viene poi invertito il senso di immisione della corrente (tratto negativo della Fig. 1), seguito da un ulteriore periodo di annullamento. L'intero ciclo viene ripetuto molteplici volte, con frequenze di ripetizione variabili da 2,5 a 250 Hz. Si consideri che una singola misura viene campionata dalla strumentazione per almeno 2^8 (vale a dire 256) volte. Nel momento in cui si azzerava bruscamente la corrente ("turn-off"), secondo quanto previsto dalla legge di Faraday, si produce un campo elettromagnetico primario, di brevissima durata, che tende ad annullarsi in tempi rapidissimi (nell'ordine dei millisecondi). Questo induce poi delle correnti vacanti nel sottosuolo, che si propagano, col passare del tempo, sempre più in profondità e con un allargamento progressivo, secondo una modalità che ricorda degli anelli di fumo (Fig. 2).

Queste correnti indotte si dissipano in tempi rapidissimi, producendo a loro volta, un campo

elettromagnetico secondario, il quale contiene le informazioni che ci interessano, ovvero le variazioni di resistività del sottosuolo. In realtà quello che viene misurato è un voltaggio (in nV) che si annulla nel giro di pochi millisecondi (chiamato "transiente") e che viene campionato dall'unità ricevente, collegata ad una bobina ricevente (coil), durante il "time-off", onde evitare interferenze con il campo primario.

Il ricevitore è in grado di campionare il transiente tramite una serie di canali di acquisizione, che si aprono a tempi via via maggiori, indagando così zone sempre più profonde, visto che col passare del tempo le correnti indotte penetrano sempre più. Infatti la velocità di propagazione è direttamente proporzionale alla resistività elettrica (ovvero inversamente proporzionale alla conducibilità elettrica) del terreno. La profondità di penetrazione del punto di massima intensità del campo elettrico in un semispazio omogeneo di resistività $\rho=1/\sigma$, è regolata dalla formula:

$$d = 2p \sqrt{2t/ms}$$

dove t = tempo, m = permeabilità magnetica nel vuoto e s = conducibilità elettrica.

I valori di voltaggio vengono poi convertiti in valori di resistività apparente, in modo da ricavare una curva di campagna sulla quale si può procedere con le classiche modalità di inversione. La profondità di indagine dipende dalla resistività degli strati attraversati e dal rapporto segnale-rumore. Per incrementare quest'ultimo si ricorre generalmente all'ampliamento del loop o all'incremento dell'intensità di corrente.

Il sistema Airborne EM

Il sistema Airborne EM è stato sviluppato per la ricerca mineraria su zone molto vaste e generalmente disabitate (Australia, Canada, etc.). Per un inquadramento generale dei vari sistemi, si rimanda al lavoro di SIEMON et alii (2009). Le prime strumentazioni utilizzate erano alloggiate su aereo (fixed-wing) e per di più utilizzavano il metodo nel dominio della frequenza. L'applicazione in campo idrogeologico ha poi richiesto una maggiore risoluzione superficiale ed un maggiore grado di dettaglio nella definizione del modello geofisico, in primo luogo per i più contenuti contrasti di resistività rispetto a quelli normalmente verificati

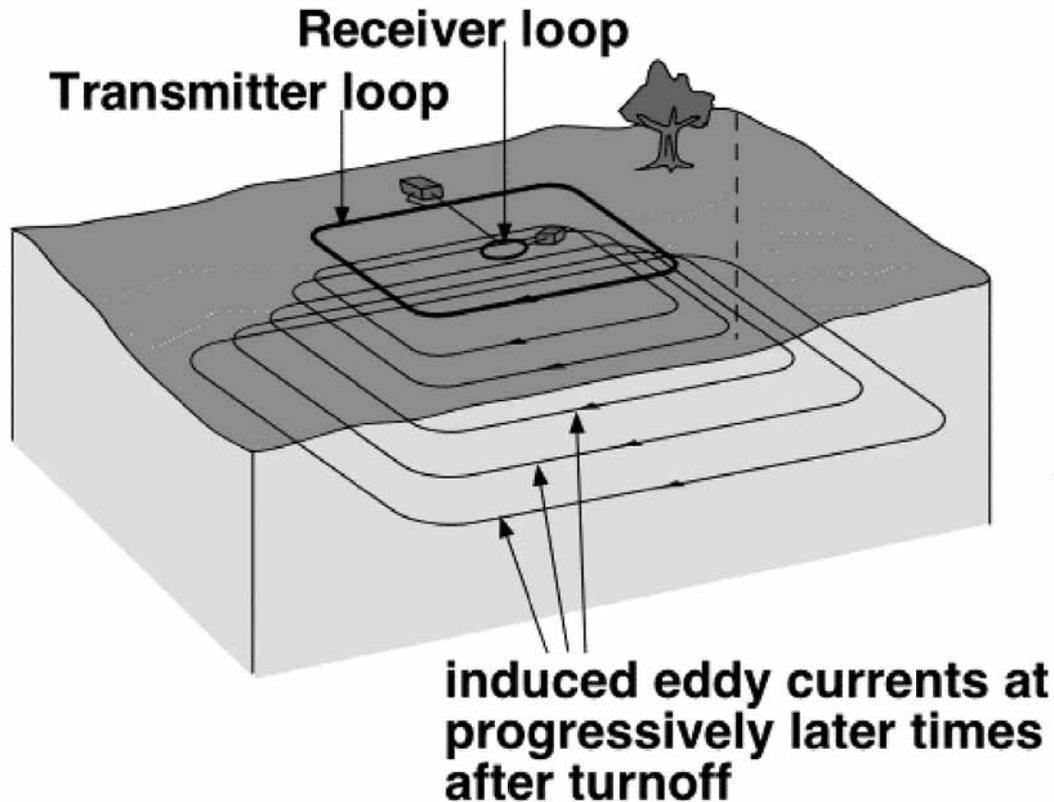


Fig. 2 – Schema di acquisizione tradizionale (ground-based): la corrente pulsante immessa nel loop trasmittente, disteso sul terreno in forma di quadrato o di rettangolo, genera le correnti indotte che si propagano sempre più in profondità col trascorrere del tempo; queste si allargano progressivamente, coinvolgendo volumi di terreno sempre più grandi, secondo una modalità simile ad anelli di fumo. Il ricevitore, posizionato al centro del loop trasmittente, rileva il transiente associato alla rapida dissipazione di queste correnti indotte nel sottosuolo.

Fig. 2 – Traditional acquisition set-up (ground-based system): the pulsed current is injected into the transmitting loop, that is laid out on the surface as a square or a rectangle. It produces the eddy currents diffusing deeper and deeper during the time lapsing. The eddy currents spread, involving greater and greater volumes of soil, following a smoke-rings shape. The receiver, that is located at the center of the Tx loop, measures the transient linked to the eddy currents induced into the ground.

in ambito minerario. Si è così spostata l'attenzione su sistemi trasportati su elicottero, in grado quindi di volare a minor altezza e con velocità di sorvolo più contenute, due fattori che hanno migliorato notevolmente la qualità del segnale. Un altro fattore che ha reso possibile applicare la metodologia in campo idrogeologico, è costituito da un processo di elaborazione ed inversione molto più accurato, decisamente più raffinato di quanto viene richiesto nella ricerca mineraria, dove il target produce di norma anomalie molto più nette, che non necessitano spesso di alcuna inversione.

Nei sistemi airborne da elicottero (HTEM) sia il loop trasmittente che il coil ricevente vengono trasportati su di un'unica struttura solidale, posta a circa 30-40 m da terra. La distanza tra il sistema trasmittente-ricevente, nell'ordine dei 20 m, rende minimo il

disturbo arrecato dal veivolo. La figura 3 mostra uno dei sistemi HTEM maggiormente utilizzati per applicazioni idrogeologiche, lo SkyTEM (SORENSEN & AUKEN, 2004), in grado di immettere correnti elevate (sino a 100 A) e di campionare sino a tempi di diverse decine di millisecondi, e allo stesso tempo di acquisire dati accurati anche negli early times (circa 10 μ s a partire dall'inizio della rampa). Le misure vengono effettuate in continuo, ma di solito vengono "stacked" ad intervalli di circa 1,5 secondi, per cui, in condizioni di normale trasferimento dell'elicottero, si acquisiscono dati ogni 25 m circa. La spaziatura poi tra un profilo e l'altro viene scelta in funzione del grado di definizione richiesto. Grazie ad un sistema GPS e a due coppie di laser altimetrici e di inclinometri, è possibile tenere sotto controllo, in continuo, la posizione, l'altitudine e le

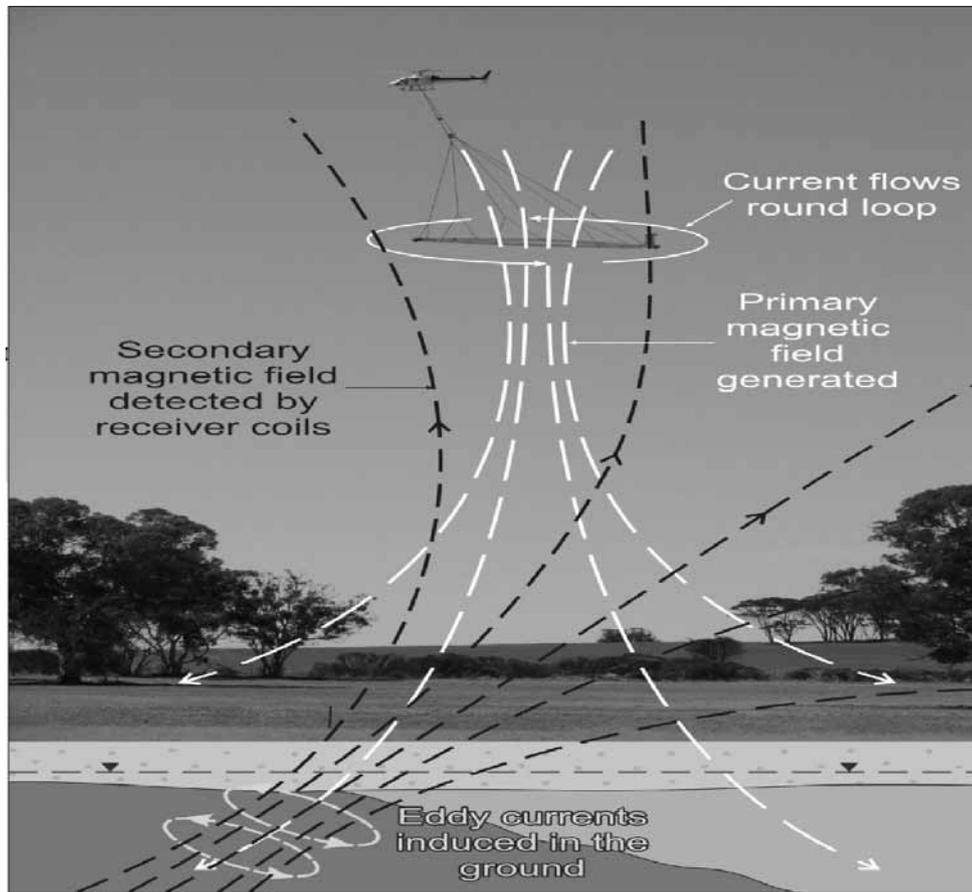


Fig. 3 – Il sistema airborne SkyTEM: il loop trasmittente viene trasportato dall'elicottero, in maniera solidale con il coil ricevente, entrambi posti a distanza tale da evitare qualsiasi interferenza con il veivolo. Il campo magnetico primario è indicato dalle linee tratteggiate bianche, mentre il secondario, prodotto dalle correnti indotte nel sottosuolo (anelli bianchi), dalle linee tratteggiate nere.

Fig. 3 – The SkyTEM airborne system: the transmitting loop is carried out by the helicopter, together with the receiving coil, both of them are located far away, to avoid any interferences with the air carrier. The primary magnetic field is shown by the white dashed lines, while the secondary magnetic field, that is produced by the eddy currents induced into the ground (white donuts), is shown by the black dashed lines.

oscillazioni del sistema, in modo da apportare le dovute correzioni.

Elaborazione ed inversione dei dati

Come già accennato, l'applicazione del metodo airborne EM in ambito idrogeologico e ambientale, richiede una maggior cura nell'elaborazione dei dati, tanto che è necessario procedere in ultima analisi ad una vera e propria inversione, con costruzione di un modello geofisico.

Il processo di elaborazione ed inversione si compone di 4 distinte fasi:

- 1) analisi dei dati di navigazione (GPS, misure altimetriche ed inclinometriche)
- 2) analisi dei dati di voltaggio
- 3) rimozione dei disturbi arrecati dalle infrastrutture (couplings)
- 4) inversione dei dati

Il primo step viene condotto tramite operazioni automatiche di filtraggio e di media ("averaging"). Nel caso sia necessario, ad es. laddove la copertura boschiva renda più difficoltoso acquisire dati di altimetro, si procede anche con delle correzioni manuali. Il monitoraggio accurato tanto della quota che dell'inclinazione del loop trasmittente, ha dei riflessi importanti poi sull'elaborazione successiva dei dati di voltaggio, in quanto variazioni anche modeste dell'effettiva area del loop, nonché della sua quota, possono modificare la risposta. La figura 4 mostra, per un tratto di volo di circa 600 metri, quale è l'effetto della riflessione dei due laser (linee rossa e verde) sulla punta degli alberi di un'area boscata, posta tra le progressive di 200 e 260 m, e di un altro manufatto (a 450 m): si determina una sottostima della reale quota di volo. Questi dati vengono quindi rimossi e sostituiti da quelli derivanti

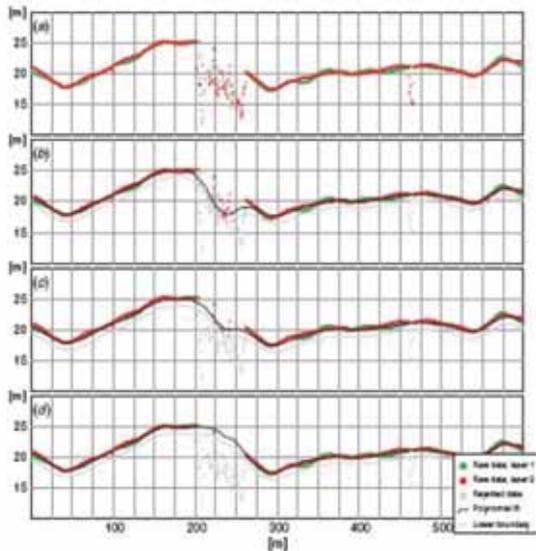


Fig. 4 – Elaborazione dei dati altimetrici: a) dati originari acquisiti dai due laser posizionati agli estremi del loop trasmettente (in rosso e verde). Tra le progressive dei 200 e 250 m si nota il disturbo arrecato da una zona boscata, che da luogo ad una sottostima della quota di volo. Intorno alla progressiva dei 450 m invece si nota l'effetto di un'altra struttura in elevazione. In b) viene mostrato il risultato di un primo filtraggio dei dati, dopo una sola iterazione, con ricostruzione dei due tratti mancanti (linea nera) . Dopo altre 3 iterazioni (c) si nota un parziale miglioramento dei dati ricostruiti. In d) si mostra il risultato finale, che ha permesso di ricostruire con maggiore attendibilità le quote di volo nei tratti anomali.

Fig. 4 – Processing of the altitude data: a) raw data acquired by the two lasers located at the sides of the Tx loop (red and green dots). Between 200 and 250 m there is a clear underestimation of altitude due to tree cover. At 450 m there is another disturbance caused by an infrastructure. On b) is shown the result of a first filtering, after only one iteration: the black line shows the recovery of the missing data. After further 3 iterations (c), a partial improvement. On d) the final result is shown, allowing a more correct recovery along the disturbed sectors of flights.

dall'applicazione di una media mobile (linea nera) che corregge anche gli errori causati dalla non perfetta verticalità dei due laser. Passando da b a d si ha modo di verificare la progressiva correzione all'aumentare del numero delle iterazioni.

Nella figura 5 invece è mostrata la variazione del tilt del loop, misurata sia nelle direzione di volo (x) che in quella perpendicolare (y); nel primo caso (punti rossi) si misurano oscillazioni di 8°, mentre nel secondo (punti blu) si registrano variazioni di 4°. Si tratta di modifiche dell'assetto strumentale che non possono essere ignorate, visto che possono tradursi in una variazione di voltaggio nell'ordine del 3 %.

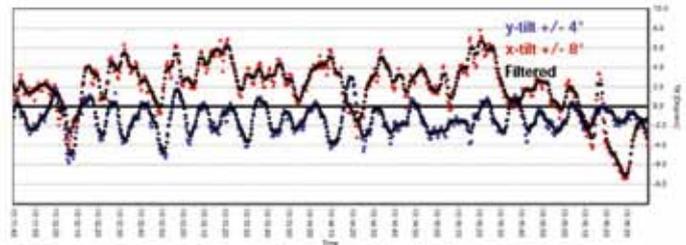


Fig. 5 – Elaborazione dei dati inclinometrici. I punti rossi e blu mostrano i valori misurati dai due tiltmetri alloggiati sul loop trasmettente, in modo da misurare contemporaneamente l'inclinazione del sistema sia lungo la direzione di volo (x) che in quella perpendicolare (y). I punti neri mostrano lo smoothing operato dai filtri. In questo caso si registrano valori di inclinazione variabili dai 4° agli 8°.

Fig. 5 – Processing of tilt data. Red and blue dots show the values measured by the two tiltmeters located on the Tx loop, which monitor the system inclination along both X (parallel to flight line) and Y (perpendicular to flight line) directions. Black dots show the smoothing performed by the filters. In this case tilt values range from 4° to 8°.

Per quanto riguarda il secondo step, vanno innanzitutto eliminati tutti quei fattori di errore che potrebbero inficiare la successiva inversione. Si procede quindi ad una dettagliata ricognizione di tutti i transienti, che vengono visualizzati in profilo (con i canali di ricezione disposti dall'alto verso il basso), in modo da verificarne la corretta forma, ovvero la diminuzione del voltaggio con il tempo, valutando nel contempo anche quello che è il rumore di fondo. Per l'acquisizione di quest'ultimo si può procedere ad una misura del transiente in modalità passiva, ovvero con il trasmettitore spento. In questo modo è possibile soppesare quale è il limite effettivo di indagine, ovvero quale è l'ultimo canale di acquisizione utile (late times).

Questa fase è strettamente connessa con la rimozione di ogni forma di coupling, sia esso galvanico che capacitivo. Il secondo è più facilmente riconoscibile perché da luogo ad evidenti distorsioni del transiente, con inversione di segno e tassi di decadimento decisamente anomali. La figura 6 ne mostra un esempio, legato al sorvolo di un agglomerato urbano: la distorsione è evidente tanto nelle curve di voltaggio (mostrate nella parte superiore) che in quelle di resistività apparente (in basso).

Più difficile è riconoscere il coupling galvanico, causato ad esempio da una condotta metallica interrata o da una recinzione metallica, perché da

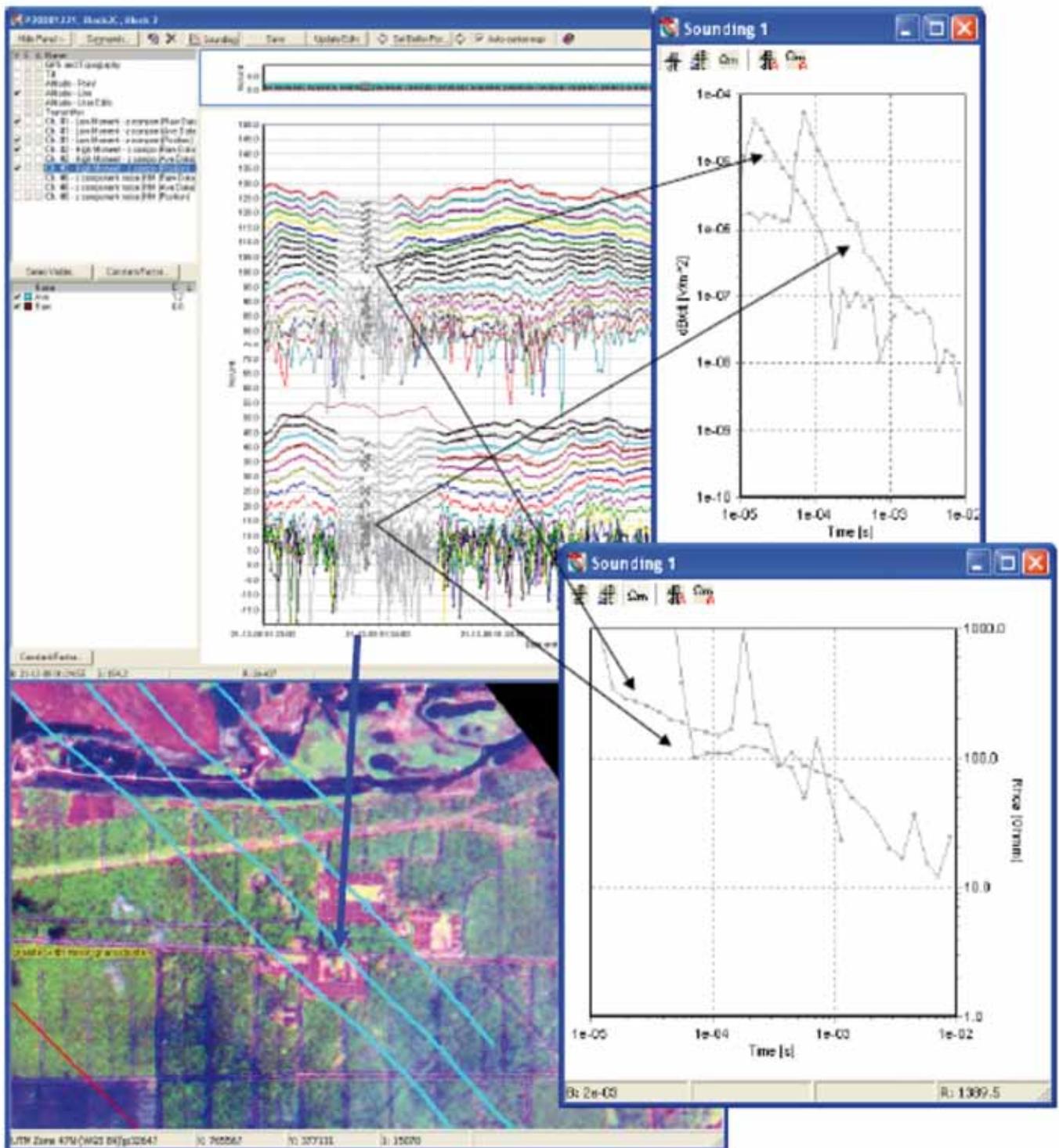


Fig. 6 – Rimozione del coupling, tramite controllo interattivo con le informazioni GIS. In alto a sinistra sono visualizzati i dati di voltaggio acquisiti dai vari canali di ricezione e da due differenti sistemi energizzanti, lungo un tratto di volo. I dati in grigio sono quelli scartati a causa del coupling indotto da un agglomerato urbano, indicato dalla freccia azzurra nell'immagine all'infrarosso (carta in basso a sinistra). A destra sono visualizzati i transienti anomali (in alto), misurati al momento del sorvolo sopra l'area urbanizzata, e le associate curve di resistività apparente (in basso), anche esse decisamente anomale.

Fig. 6 – Coupling removal by means of interactive checking with GIS information. On the upper left side the voltage data acquired by the different gates and by two different energizing systems are shown. Grey data have been culled, due to the coupling by an urban settlement, marked by the blue arrow on the infrared map (on the lower left side). On the right side, anomalous transients (above) are shown, that have been measured while flying above the urbanized area. Below the relative apparent resistivity curves are shown.

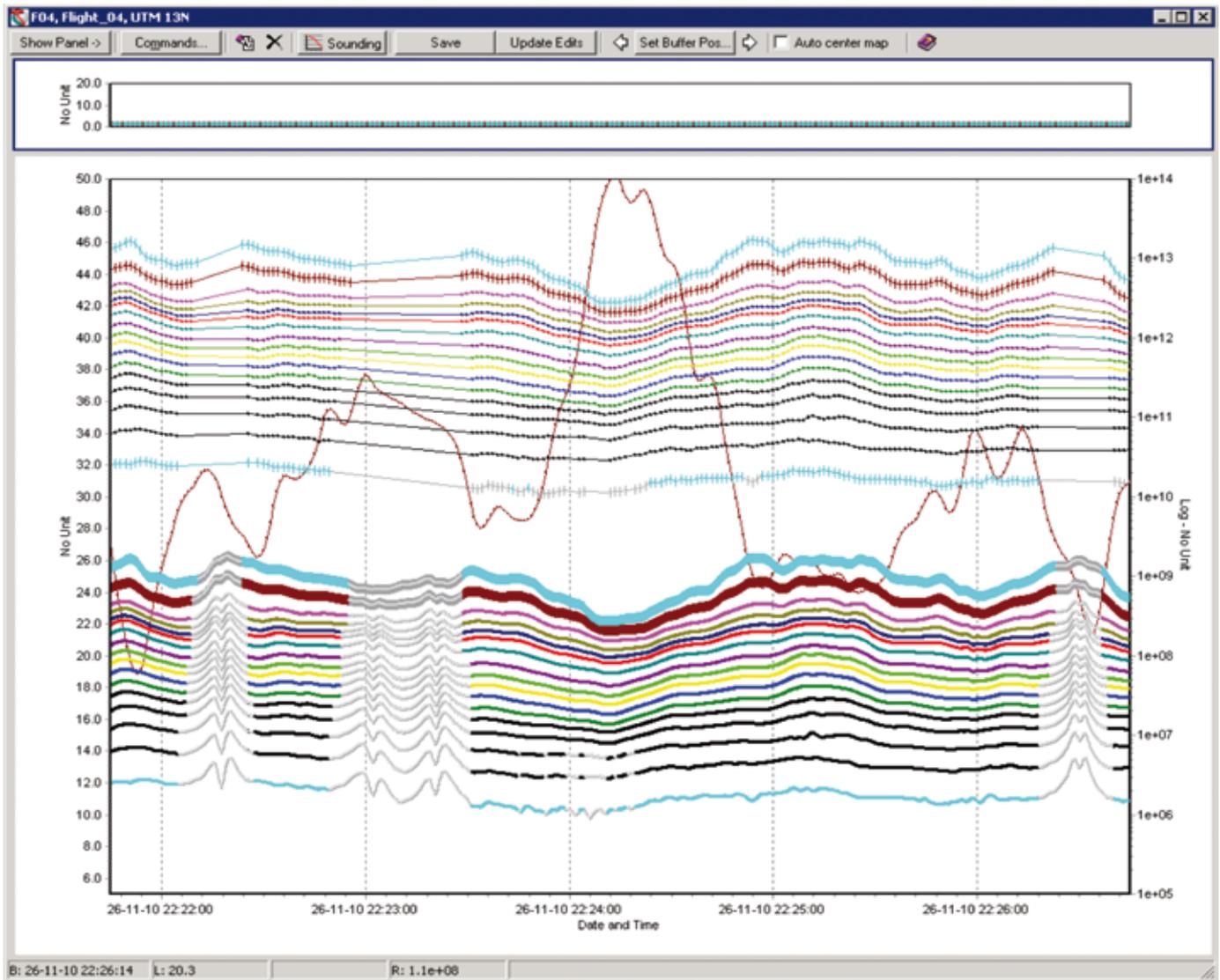


Fig. 7 – Applicazione del filtro trapezoidale: in basso sono riportati i dati originali, con i canali di ricezione che registrano i valori di voltaggio a tempi via via maggiori (dall’alto verso il basso). Si riconoscono tre evidenti fenomeni di coupling, che hanno imposto la rimozione di dati (in grigio), ed un disturbo sui late times nella parte centrale. L’adozione del filtro fa sì che i dati mediati siano più omogenei, con guadagno di alcuni dei late times. Ovviamente nelle 3 zone di coupling non è possibile estrarre alcuna informazione.

Application of the trapezoidal filter: raw data are shown below, with voltage values going later and later from high to low. Three clear couplings are shown, that have imposed the rejection of data (grey), and a disturbance on the late times in the middle section. The use of the filter makes the averaged data more homogeneous, and later time gates can be retained. Of course, on the 3 coupling zones, it is impossible to extract any information.

luogo ad un transiente apparentemente accettabile: il segnale risulta amplificato senza mostrare alcuna oscillazione sospetta, tanto che vi può essere il rischio di modellizzare strati molto conduttivi, chiaramente fittizi. E’ importante in questa fase ricorrere ad informazioni esterne, accompagnando l’elaborazione con la visualizzazione interattiva di mappe GIS dove sono localizzate le infrastrutture note.

Ovviamente il metodo non è applicabile in zone intensamente urbanizzate, in quanto il rumore elettromagnetico di fondo diventa inaccettabile: di

norma si acquisiscono dati utili ad una distanza di circa 100 m da qualsiasi infrastruttura. Ciò però non vieta di indagare zone densamente abitate, come sperimentato in Danimarca e Germania: i dati acquisiti sopra le aree antropizzate vengono semplicemente rimossi, mentre le informazioni ricavate nelle aree intermedie sono comunque valide.

Prima di procedere con l’inversione dei dati, si applica un particolare filtro trapezoidale, in grado di mantenere il giusto dettaglio superficiale e, nel

contempo, di migliorare il segnale in profondità. In definitiva il numero dei sondaggi coinvolti nella media aumenta con la profondità: si tratta di un assunto che ha una sua giustificazione fisica, in quanto, col passare del tempo, il volume coinvolto dalle correnti indotte si allarga sempre più (Fig. 2). Si estraggono così i sounding veri e propri, sui quali si procederà con l'inversione. La figura 7 mostra, nella sezione inferiore, i dati originari, con evidenti fenomeni di coupling (tratti in grigio), che sono stati esclusi prima di applicare il filtraggio trapezoidale. I risultati di quest'ultimo (sezione in alto) sono rappresentati da valori di voltaggio più "robusti", con una barra di errore ridotta, soprattutto per i canali più profondi. Ovviamente le zone disturbate dalle infrastrutture appaiono vuote, perché non sono state comprese nelle operazioni di averaging e filtraggio.

L'inversione dei dati fa ricorso ad un approccio quasi-3D, fornito dalla Spatially Constrained Inversion (SCI): si tratta di una metodologia (VIEZZOLI et alii, 2008) che, grazie all'uso di vincoli (constraints) orizzontali e verticali, è in grado di trasferire le informazioni ricavate da un singolo modello 1D a tutti quelli circostanti. In tal modo si riesce ad ottenere, entro limiti imposti comunque dall'operatore, una certa continuità laterale, compatibile con la maggior parte delle condizioni geologico-stratigrafiche. E' altresì possibile guadagnare in risoluzione di strati che altrimenti sarebbero più difficilmente modellizzabili tramite la singola inversione 1D. Un altro vantaggio risiede nell'attenuazione di quelle variazioni allungate nel verso dei voli (il cosiddetto "striping"), che spesso si ritrovano nell'elaborare dati airborne.

D'altro canto rimane ancora impossibile approssimare l'inversione dei dati in modalità effettivamente 3D, a causa dell'elevato numero di sondaggi che debbono essere trattati (migliaia o decine di migliaia per ogni prospezione): sarebbero necessari tempi enormi ovvero sistemi di calcolo in parallelo molto complessi. Inoltre, in molti casi, la geologia e' effettivamente a strati piano-paralleli ("semilayered"): in tali casi l'approccio SCI e' assolutamente indicato e una inversion full 3D introdurrebbe gradi di incertezza, senza effettivo beneficio (VIEZZOLI et alii, 2011).

La figura 8 mostra i vantaggi della SCI inversion

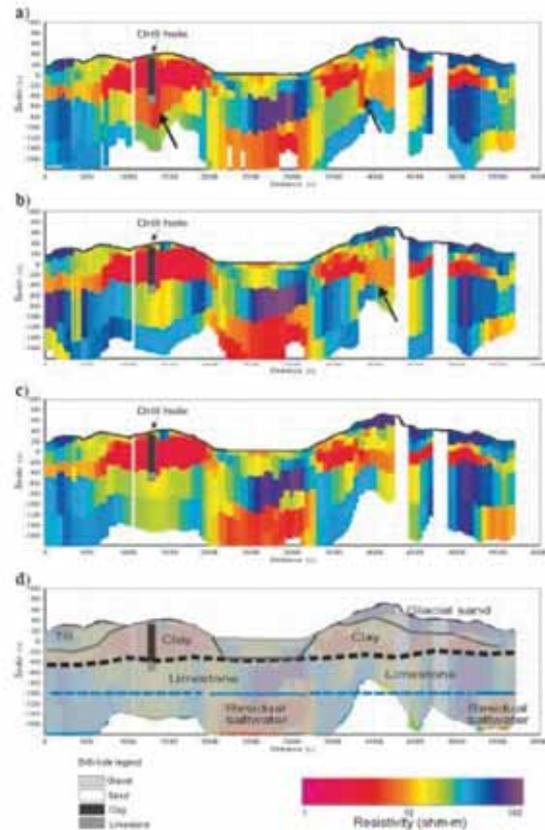


Fig. 8 – Confronto tra i risultati ottenuti utilizzando vari tipi di inversione e la sezione geologica reale (d). In a) si riporta il risultato di una stitched section, ossia della semplice concatenazione di singoli modelli 1D, del tutto indipendenti fra loro: si notano errori di modellizzazione in prossimità della perforazione (drill hole), dove si determina una sovrastima dello spessore delle argille conduttive (in rosso) ed una anomala variazione laterale di resistività sulla parte destra (freccia nera). L'applicazione della LCI -Laterally Constrained Inversion - (b) aumenta la capacità di risoluzione del contatto argille-calcarei, così come intercettato dalla perforazione, mentre la continuità laterale di resistività viene decisamente migliorata dalla SCI- Spatially Constrained Inversion - (c). In ogni caso si noti come il metodo sia in grado di rilevare il comportamento resistivo, toni blu, delle sabbie glaciali (glacial sand) e dei calcari acquiferi (limestone), mentre le argille (clay) e la falda salina residuale (residual saltwater) sono contraddistinte da basse resistività (in rosso).

Fig. 8 – Comparison between the results obtained by various kinds of inversion and the effective geological section (d). On a) the result of a stitched section is shown, that is a simple concatenation of single 1D models: modeling mistakes are clear close to the drill hole, where the model shows an overestimate of the conductive clays thickness (red) and an anomalous lateral variation of resistivity on the right side (black arrow). The application of the LCI -Laterally Constrained Inversion - (b) increases the resolution of the clay-limestone contact, as confirmed by the borehole, while the lateral continuity of resistivity is markedly improved by the SCI- Spatially Constrained Inversion - (c). Notice how the method is able to detect the resistive response (blue) of the glacial sands and of the limestones, and the clays and the residual saltwater, marked by low resistivities (red).

nei confronti della semplice concatenazione di singoli modelli 1D (a) e della Laterally Constrained Inversion (b); la prima è ottenuta affiancando i modelli senza alcun'altra forma di elaborazione del dato, mentre con la LCI si trasferiscono i constraints solamente lungo le linee di volo. Il contatto argilla-calcarei, intercettato dal pozzo sul lato sinistro del profilo, è risolto con precisione solo nel caso della LCI (b) e della SCI (c), mentre la a mostrerebbe una sovrastima dello spessore della copertura argillosa più conduttiva. La freccia sulla destra mostra poi una maggiore continuità laterale dello strato calcareo resistivo, facilitando l'interpretazione in chiave geologica da parte della SCI.

Campi di applicazione del metodo airborne EM Idrogeologia

Con specifico riferimento al metodo airborne, case-studies in campo idrogeologico sono stati presentati da moltissimi Autori: si va dallo studio dell'intrusione marina nelle falde costiere (FITTERMAN & DESZCZ-PAN, 1998; SIEMON et alii, 2004; SMITH et alii, 2004; SIEMON, 2006; AUKEN et alii, 2009) alla contaminazione di falde acquifere da parte di acque mineralizzate (VIEZZOLI et alii, 2009; MUNDAY & FITZPATRICK, 2008), dalla individuazione di paleovalli acquifere (CHRISTIANSEN et alii, 2006; AUKEN et alii, 2008), sino alla ricerca di corpi idrici sotterranei (AUKEN et alii, 2003; DANIELSEN et alii, 2003; SATTEL & KGOTLHANG, 2004; BALDRIDGE et alii, 2007; CHRISTENSEN et alii, 2008; STEUER et alii, 2008). Altre preziose informazioni possono essere costituite dalla vulnerabilità delle falde, attraverso la determinazione dello spessore della copertura argillosa impermeabile (ROTTGER et alii, 2005).

Non va trascurato che, grazie alla possibilità di acquisire informazioni su vasti areali, della stessa scala di un bacino idrografico o idrogeologico, la metodologia appare quantomai indicata per lo studio delle risorse idriche, anche a livello di modelli di flusso 3D, e per la pianificazione del loro sfruttamento, fornendo anche un aiuto nella ricostruzione di quei modelli idrogeologici che sono fondamentali per tentare di prevedere qualsiasi tipo di scenario futuro. La figura 9 mostra l'abilità della tecnica nel mappare il substrato argilloso conduttivo che sostiene la falda più superficiale del territorio danese, con un dettaglio impensabile se si fosse

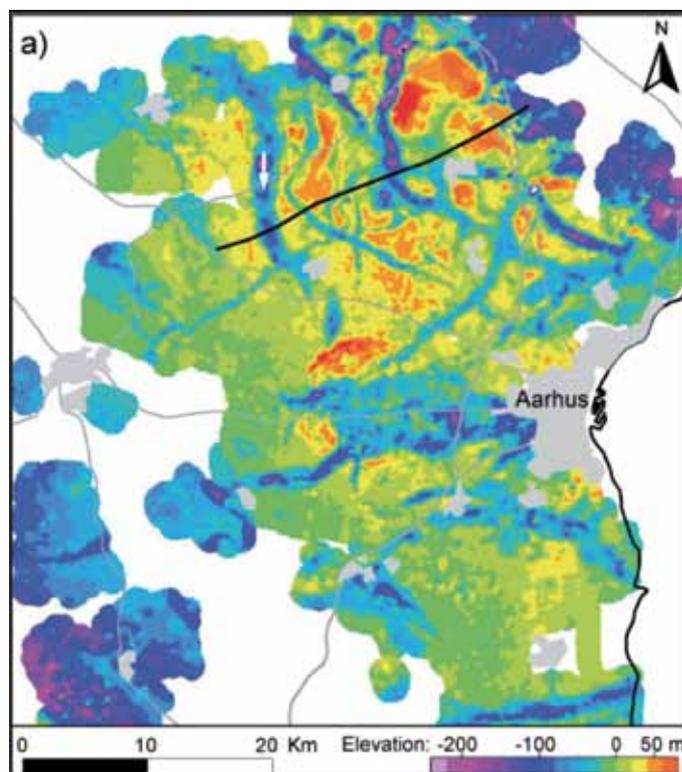


Fig. 9 – Esempio di mappa derivata: Carta strutturale del substrato argilloso conduttivo, che delimita inferiormente l'acquifero sabbioso più superficiale in una zona posta ad Ovest della città di Aarhus (Danimarca). I toni blu indicano le zone dove il substrato è più depresso (al di sotto di quota -100 m s.l.m.), evidenziando una serie di paleovalli sepolte, spesso colmate da sedimenti più grossolani e dove quindi ha sede una maggiore circolazione idrica. Le zone in rosso mostrano invece le culminazioni dell'acquiclude (quote superiori ai 50 m s.l.m.), dove la circolazione è del tutto assente. In prossimità della costa (angolo nord-orientale della carta) il substrato conduttivo può essere rappresentato dall'interfaccia acqua marina-acqua dolce.

Fig. 9 – Example of derived map: Structural map of the conductive clayey substratum, that confines at the bottom the shallower sandy aquifer (West of Aarhus, Denmark). Blue colours show where the substratum is lower (elevations below -100 m a.s.l.), so highlighting a series of buried paleovalleys, that are often filled by coarser sediments and where groundwater flow is more active. Red areas show on the contrary the acquiclude culminations (elevations higher than 50 m a.s.l.), where groundwater flow is completely absent. Along the coastline (north-eastern corner of the map) the conductive substratum can be represented by the freshwater-seawater interface.

fatto riferimento ai pochi pozzi noti. Si tenga conto che l'area indagata presenta una superficie notevole (50 x 60 Km²). E' stato così possibile rilevare tutta una serie di paleovalvei (in blu), colmati di materiale più grossolano (sabbie e ghiaie glaciali), sede di una cospicua circolazione idrica sotterranea.

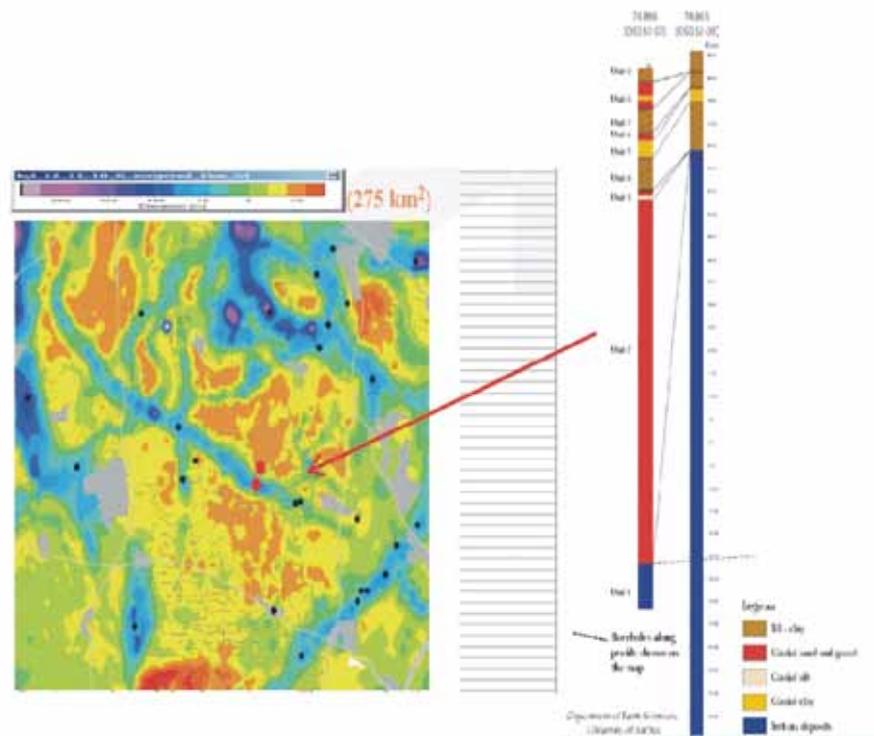


Fig. 10 – Dettaglio della mappa della Fig. 9: lungo l’asse della paleovalle è stato scavato un pozzo che ha effettivamente incontrato il substrato argilloso conduttivo a notevole profondità (80 m), intercettando un potente acquifero sabbioso-ghiaioso di origine glaciale. Il pozzo scavato invece al di fuori della paleovalle si è rilevato sterile, avendo incontrato a debole profondità il substrato argilloso impermeabile.

Fig. 10 – Detail of Fig. 9: along the paleovalley axis a well has been excavated, that intercepted effectively the clayey substratum at great depth (80 m), capturing a very productive sandy-gravel aquifer of glacial origin. On the contrary, the well excavated out of the buried valley was dry, having intercepted the impermeable clays at shallow depth.

In figura 10 è riportato un dettaglio dell’area indagata, con ubicati due pozzi che sono stati scavati a seguito dell’indagine geofisica: quello posto all’interno della paleovalle ha effettivamente attraversato un cospicuo spessore di sabbie e ghiaie di origine glaciale acquifere (circa 80 m), mentre quello scavato per controllo, al di fuori della struttura idrogeologica, ha incontrato il substrato a debole profondità, tanto da rivelarsi del tutto sterile. Sempre in ambito di pianificazione idrogeologica, un altro dato di fondamentale importanza è costituito dallo spessore di eventuali coperture a bassa permeabilità che possono garantire la protezione delle falde sotterranee sottostanti. La figura 11 mostra una carta delle isopache delle coperture argillose poste al tetto dell’acquifero più importante della Danimarca: i toni rosso-magenta stanno ad indicare le aree a minore spessore, quindi le più vulnerabili.

Si tenga conto che il metodo EM, essendo nato per la ricerca di giacimenti minerari, è estremamente preciso nel determinare profondità e spessori di

strati argillosi conduttivi. Si tratta ovviamente di un’informazione strategica per un corretto uso del territorio, utile per definire ad esempio le zone più idonee per l’impianto di discariche o di insediamenti industriali o minerari, ovvero quelle più adatte per la localizzazione di nuovi campi-pozzi, potenzialmente più tutelati.

Nell’ambito dello studio dei rapporti tra falde costiere e intrusione marina, si riporta un caso di applicazione nella Laguna Veneta (VIEZZOLI et alii, 2010). La sezione EM riportata nella Fig. 12, mostra efficacemente l’intrusione delle acque di laguna (in rosso) verso l’interno. Si evidenziano poi strutture più resistive profonde (in blu), soprattutto nell’entroterra, collegate ad acquiferi dolci imprigionati. Non va trascurato che in questo caso è stato possibile acquisire informazioni anche sotto la Laguna stessa, un risultato che sarebbe stato conseguibile solo programmando indagini geofisiche su natanti, affatto semplici dal punto di vista logistico.

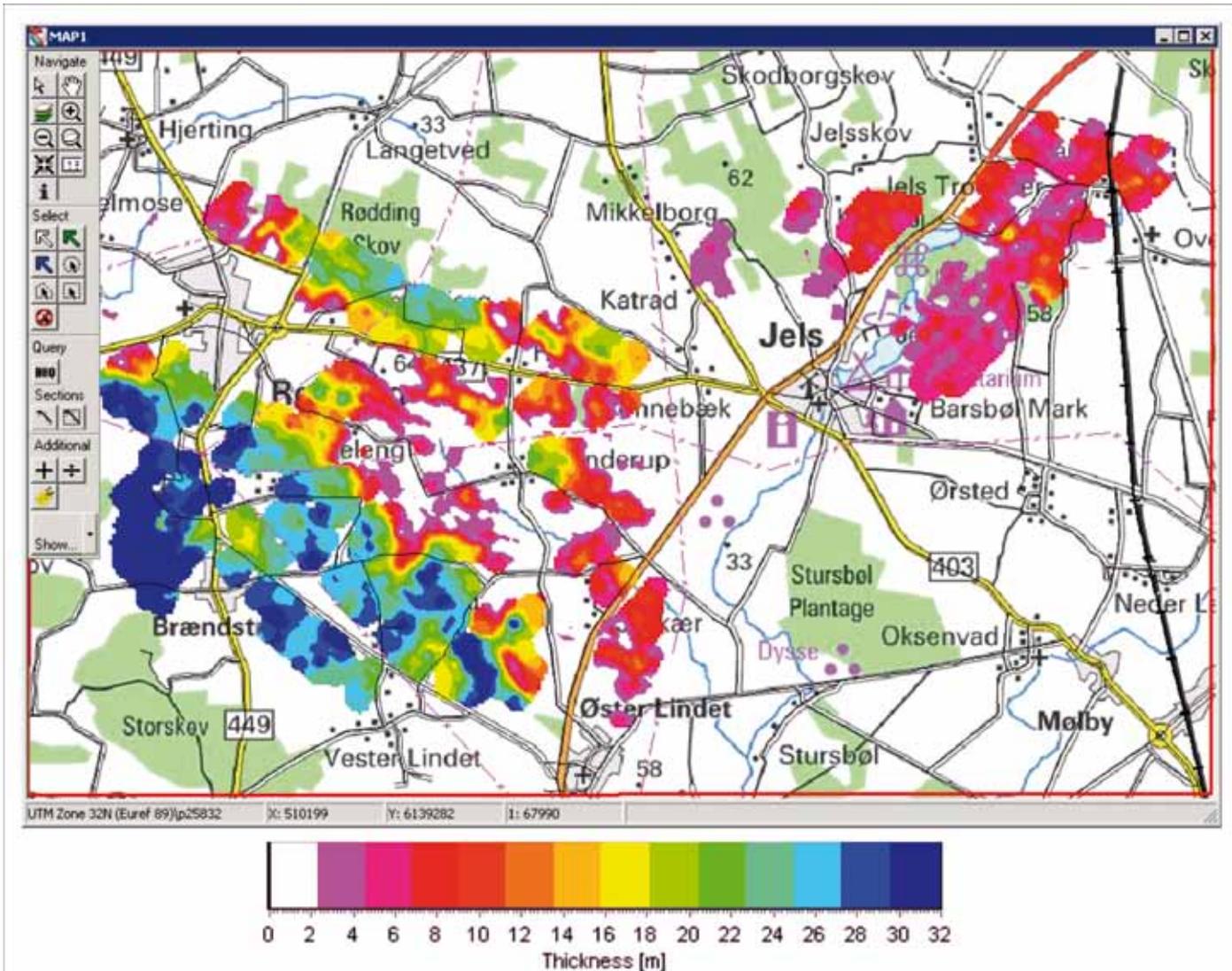


Fig. 11 – Carta delle isopache delle coperture argillose impermeabili dell’acquifero sabbioso-ghiaioso glaciale. Gli spessori massimi (in blu) sono stati rilevati nel settore Ovest dell’area, evidenziando un buon livello di protezione della falda. Al contrario, subito ad Est dell’abitato di Jels, si riscontrano gli spessori più esigui, ovvero condizioni di elevata vulnerabilità delle risorse idriche.

Fig. 11 – Isopachs maps of the impermeable clay coverage above the glacial sandy-gravel aquifer. The minimum thickness (blue) have been detected in the western sector of the area, so highlighting a good degree of protection of the aquifer. On the contrary, to the East of Jels town, the thinner clay coverage reveals a higher vulnerability of the groundwater resources.

Geotecnica

Le applicazioni in campo geotecnico sono andate via via aumentando negli ultimi anni, grazie al progressivo miglioramento nell’acquisizione dei primi canali (gli early times) che contengono le informazioni più superficiali. Spesso si fa ricorso anche al metodo nel dominio della frequenza, ad esempio per lo studio di cavità sotterranee (Supper et al., 2009), di bacini idrici di stoccaggio (LIPINSKI et alii, 2008) o di stabilità di strutture in terra (HAMMACK et alii, 2010).

A livello di bacino idrografico, la metodologia si presta molto bene anche per lo studio dei fenomeni

franosì, grazie al fatto che, nella maggioranza dei casi, il corpo frana ovvero la porzione suscettibile di dissesto, mostra una minore resistività, in parte legata alla presenza di acque circolanti, in parte per fenomeni diffusi di alterazione e/o fessurazione. Ovviamente la possibilità di sorvolare aree altrimenti inaccessibili, spesso boscate e ripide, rende quantomai conveniente programmare una prospezione airborne.

PFÄFFHUBER et alii (2010) hanno riportato un caso di applicazione di misure airborne EM per lo studio di movimenti franosi in Norvegia, che hanno coinvolto formazioni filladiche. Queste mostrano, se integre,

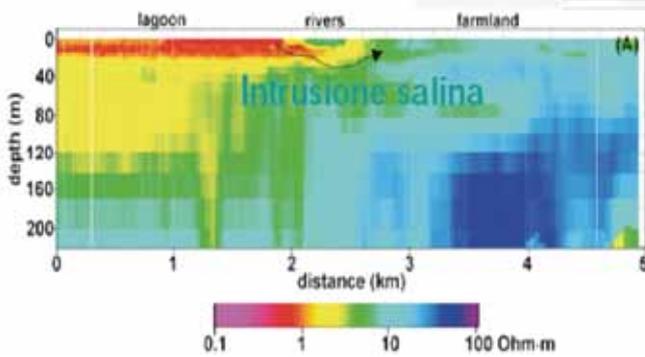


Fig. 12 – Studio dei fenomeni di intrusione salina all'interno della Laguna di Venezia: la sezione si riferisce all'area meridionale, nei pressi di Chioggia. Si nota il comportamento decisamente conduttivo delle acque lagunari (in rosso), così come dei sedimenti più superficiali saturi, che hanno modo di bypassare un corso d'acqua ed entrare così nell'area costiera. Intorno ai 120 m di profondità, nell'entroterra, si evidenzia una corpo resistivo (in blu), sede di circolazione di acque dolci. Al di sotto della Laguna invece permangono situazioni di elevata conducibilità (in giallo), che mostrano prevalenza di acque salmastre.

Fig. 12 – Study of the saltwater intrusions into the Venice Lagoon: the section is referred to the Southern area, close to Chioggia. It is evident the strong conductivity response of the lagoon waters (red), as such as of the shallower saturated sediments, that are able to bypass a river, so to enter into the coastal area. At about a depth of 120 m, on the landside, it is possible to detect a resistive body (blue), where freshwater flows. Below the lagoon, on the contrary, conditions of very high conductivity persist (yellow), showing the prevalence of brackish waters.

una elevata resistività, ma, a seguito dei fenomeni fessurativi, determinati da motivi fagliativi, e di decompressione, si sono verificate condizioni locali di abbattimento della resistività elettrica: ne consegue che le zone potenzialmente instabili presentano una minore resistività del contesto. La figura 13 mostra la distribuzione della resistività elettrica, a 70-80 m di profondità, lungo il versante di un fiordo, caratterizzato dalla presenza, in sommità, di ampie fasce allentate, a rischio frana (in rosso), più conduttive della roccia integra (in blu). La sezione estratta, che taglia il versante lungo la sua massima pendenza, mette in luce spessori relativamente contenuti del materiale suscettibile di frana, al di sotto di una copertura resistiva: il passaggio di resistività è ascrivibile al contatto filladi-gneiss. L'aumento di conducibilità al piede del fiordo è determinato dalla presenza dell'acqua marina.

Ambiente

Le applicazioni in campo ambientale, oltre alla tutela delle risorse idriche ed all'inquinamento delle stesse già trattato nel paragrafo relativo alle applicazioni idrogeologiche, possono essere per lo studio della tenuta di bacini di decantazione connessi ad attività mineraria (SMITH et alii 2008; HAMMACK et alii, 2010) o delle discariche (SIEMON et alii, 2002; BEAMISH & MATTSSON, 2003). In questo tipo di applicazioni si sfrutta il comportamento decisamente conduttivo dei fluidi inquinanti, siano essi il percolato proveniente dalle discariche o le acque di lavorazione provenienti da attività mineraria. Il corpo rifiuti mostra pertanto una spiccata risposta conduttiva, come visibile dalla Fig. 14, che riporta un esempio di mappatura di discariche effettuata nel Nord Italia.

Per finire, la metodologia, quando fornisce informazioni anche molto superficiali, può permettere di studiare l'interazione tra suolo, acque sotterranee e ambiente vegetale (VIEZZOLI et alii, 2010).

Conclusioni

Si ritiene che l'applicazione del metodo airborne EM sia decisamente vantaggiosa nel caso si debbano programmare studi ambientali di vario genere, di ampio respiro, su scala comunale-provinciale, caratterizzati dalla necessità di coprire superfici molto vaste. I ridotti tempi di esecuzione ed i conseguenti costi contenuti (se confrontati con campagne geofisiche "a terra", dotate dello stesso grado di risoluzione e di profondità di investigazione), giustificano infatti appieno l'utilizzo di questa tecnica, contraddistinta oramai da marcate innovazioni tecniche, tanto nell'acquisizione strumentale che nell'elaborazione dei dati. La metodologia non è però applicabile all'interno di centri abitati. Grazie al notevole valore diagnostico, a livello geologico-ambientale, del parametro "resistività", ricavato dalla prospezione AEM, è possibile applicare la metodologia ai più disparati ambiti di ricerca: dalla idrogeologia all'ambiente, sino alla geotecnica

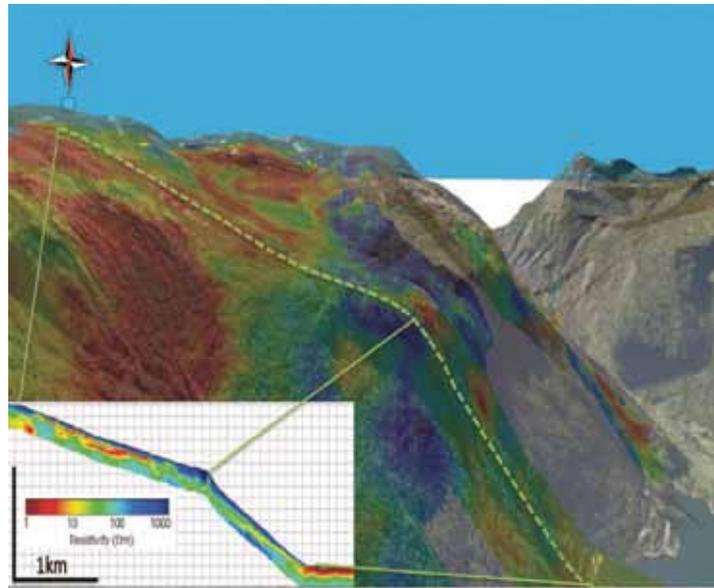


Fig. 13 – Esempio di applicazione allo studio dei fenomeni franosi (Fiordo di Aurland, Norvegia): lungo il versante sono stati riportati i valori di resistività registrati a profondità di 70-80 m. Le zone più suscettibili di frana sono evidenziate dai toni rossi (maggiore conducibilità), mentre la roccia integra è indicata dai toni blu (maggiore resistività). E' riportata anche una sezione geoelettrica che taglia il pendio lungo la direzione di massima pendenza: le zone più allentate, sia per una maggiore fessurazione che per il maggiore grado di imbibizione, sono ben evidenziate dagli strati più conduttivi, spesso presenti al di sotto di una copertura superficiale più resistiva. L'aumento di conducibilità al piede del versante è determinato dalle acque del fiordo.

Fig. 13 – Example of application to potential landslide hazard (Aurland Fjord, Norway): resistivity values at 70-80 m depth have been depicted along the slope. The areas more susceptible to earthflow are marked by red colours (higher conductivity), while the fresh rocks are evidenced by blue colours (higher resistivity). Also a geoelectric section, running along the maximum dip of the slope, is shown: the more relaxed zones, due both to the greater fracturing and to the higher saturation degree, are well imaged by the more conductive layers, that are often located below a shallow more resistive overburden. The increase of conductivity at the foot of the slope is due to the fjord seawater.

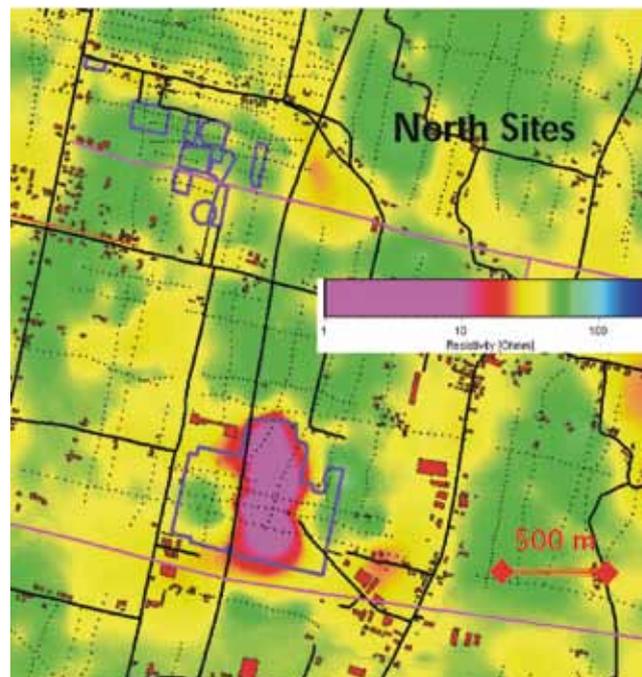


Fig. 14 – Studio di una discarica nell'area Veneta: il comportamento dei rifiuti è decisamente conduttivo (magenta) per la presenza del percolato. Non si registrano perdite considerevoli dal corpo-discarica, visto che il limite dell'anomalia conduttiva segue quelli dell'impianto (linea viola).

Fig. 14 – Study of a waste disposal on the Venetian region: the response of wastes is markedly conductive (magenta), due to the presence of leachate. There are not any sharp losses from the disposal, as the limits of the conductive anomaly follow very well those ones of the artificial structure (purple line).

Riferimenti bibliografici

- AUKEN E., JORGENSEN F. & SORENSEN K.I. (2003) - Large-scale TEM investigation for groundwater. *Exploration Geophysics* 33, 188-194.
- AUKEN E., CHRISTIANSEN A.V., JACOBSEN L.H. & SORENSEN K.I. (2008) - A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of TEM data. *Journal of Applied Geophysics* 65, 10-20.
- AUKEN E., VIOLETTE S, D'OZOUVILLE N., DEFFONTAINES B., SORENSEN K.I., VIEZZOLI A. & DE MARSILY G. (2009) - An integrated study of the hydrogeology of volcanic islands using helicopter borne transient electromagnetic: Application in the Galapagos Archipelago. *Geoscience* 341, 899-907.
- BALDRIDGE W.S., COLE G.L., ROBINSON B.A. & JIRACEK G.R. (2007) - Application of time-domain airborne electromagnetic induction to hydrogeologic investigations on the Pajarito Plateau, New Mexico, USA. *Geophysics* 72, B31-B45.
- BEAMISH D. & MATTSSON A. (2003) - Time-lapse airborne EM surveys across a municipal landfill. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 8, 157-165.
- CHRISTIANSEN A.V., AUKEN E. & SORENSEN K.I. (2006) - The transient electromagnetic method – Airborne TEM. In: *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology* (ed. R. Kirsch) 209-225, Springer.
- CHRISTENSEN N.B., HALKJAER M. & SORESEN K.I. (2008) - Mineral and groundwater exploration with the SkyTEM system. *Proceedings of the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics (AEM2008)*, 28-30 May 2008, Haikko Manor, Finland.
- DANIELSEN J.E., AUKEN E., JORGENSEN F., SONDERGAARD V.H. & SORENSEN K.I. (2003) -The application of the transient electromagnetic method in hydrogeophysical surveys. *Journal of Applied Geophysics* 53, 181-198.
- FITTERMAN D.V. & DESZCZ-PAN M. (1998) - Helicopter EM mapping of saltwater intrusion in Everglades National Park, Florida. *Exploration Geophysics* 29, 240-243.
- HAMMACK R.W. & MABIE J.S. (2002) - Airborne EM and magnetic surveys find faults with Sulphur Bank Mercury Mine Superfund site. *The Leading Edge* 21, 1092-1095.
- HAMMACK R., KAMINSKI V., HARBERT W., VELOSKI G. & LIPINSKI B. (2010) - Using helicopter electromagnetic (HEM) surveys to identify potential hazards at coal-waste impoundments: Examples from West Virginia. *Geophysics* 75, B221-B229.
- LIPINSKI B.A., SAMS J.I., SMITH B.D. & HARBERT W. (2008) - Using HEM surveys to evaluate disposal of by-product water from CBNG development in the Powder River Basin, Wyoming. *Geophysics* 73, B77-B84.
- MOLLER I., SONDERGAARD V.H., JORGENSEN F., AUKEN E. & CHRISTIANSEN A.V. (2009) - Integrated management and utilization of hydrogeophysical data on a national scale. *Near Surface Geophysics* 7, 647-659.
- MUNDAY T. & FITZPATRICK A. (2008) - The targeted application of AEM for salinity mapping, interception and disposal: An illustration of the multifarious role of helicopter EM data in environmental management across the Murray Basin of Southeast Australia. *Proceedings of the 5th International Conference on Airborne Electromagnetics (AEM2008)*, 28-30 May 2008, Haikko Manor, Finland.
- PFÄFFHUBER A.A., GRIMSTAD E., DOMAAS U., AUKEN E., FOGED N. & HALKJAER M. (2010) - Airborne EM mapping of rockslides and tunneling hazards. *The Leading Edge* 29, 956-959.
- ROTTGER B., KIRSCH R., FRIBORG R., SCHEER W., THOMSEN S. & VOB W. (2005) - Multifrequency airborne EM survey – A tool for aquifer vulnerability mapping. In: *Near-Surface Geophysics* (ed. K.W. Butler), 643-651, SEG.
- SATTEL D. & KGOTLHANG L. (2004) - Groundwater exploration with AEM in the Boteti area, Botswana. *Exploration Geophysics* 35, 147-156.
- SIEMON B., STUNTEBECK C., SENGPHEL K.P., ROTTGER B., REHLI H.J. & EBERLE D.G. (2002) - Investigation of hazardous waste sites and their environment using the BGR helicopter-borne geophysical system. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 7, 169-181.
- SIEMON B., EBERLE D.G. & BINOT F. (2004) - Helicopter-borne electromagnetic investigation of coastal aquifers in North-West Germany. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften* 32, 385-395.
- SIEMON B. (2006) - Electromagnetic methods – frequency domain: Airborne techniques. In: *Groundwater Geophysics – A Tool for Hydrogeology* (ed. R. Kirsch) 155-170, Springer.
- SIEMON B., CHRISTIANSEN A.V. & AUKEN E. (2009) - A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surface Geophysics* 7, 629-646.
- SMITH R.S., O'CONNELL M.D. & POULSEN L.H. (2004) - Using airborne surveys to investigate the hydrogeology of an area near Nyborg, Denmark. *74th SEG Meeting*,

Denver, Colorado, USA. Expanded Abstracts.

- SORENSEN K.I. & AUKEN E. (2004) - A new high-resolution helicopter transient electromagnetic system. *Exploration Geophysics* 35, 191-199.
- STEUER A., SIEMON B. & EBERLE D. (2008) - Airborne and ground-based electromagnetic investigations of the fresh-water potential in the tsunami-hit area Sigli, northern Sumatra. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics* 13, 39-48.
- SUPPER R., MOTSCHKA K., AHL A., BAUER-GOTTWEIN P., GONDWE B., ALONSO G.M., ROMER A., OTTOWITZ D. & KINZELBACH W. (2009) - Spatial mapping of submerged cave systems by means of airborne electromagnetics: an emerging technology to support protection of endangered karst aquifers. *Near Surface Geophysics* 7, 613-627.
- VIEZZOLI A., CHRISTIANSEN A.V., AUKEN E. & SORENSEN K.I. (2008) - Quasi-3D modelling of airborne TEM data by spatially constrained inversion. *Geophysics* 73, F105-F113.
- VIEZZOLI A., AUKEN E. & MUNDAY T. (2009) - Spatially constrained inversion for quasi 3D modelling of airborne electromagnetic data – an application for environmental assessment in the Lower Murray Region of South Australia. *Exploration Geophysics* 40, 173-183.
- VIEZZOLI A., TOSI L., TEATINI P. & SILVESTRI S. (2010) - Surface water-groundwater exchange in transitional coastal environments by airborne electromagnetics: The Venice Lagoon example. *Geophysical Research Letters* 37, L01402.
- VIEZZOLI A., MUNDAY T. & AUKEN E. (2010) - Accurate quasi 3D versus practical full 3D inversion of AEM data – the Bookpurnong case study. *Preview* 149, 23-31.