

# UTILIZZO DI TECNICHE GEOFISICHE NON DISTRUTTIVE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLO STRATO DI COPERTURA E LA LOCALIZZAZIONE DI BIOGAS IN DISCARICHE CONTROLLATE

Giorgio De Donno<sup>1</sup>, Luca Di Giambattista<sup>1\*</sup>, Luciana Orlando<sup>1</sup>

<sup>1</sup>“Sapienza” Università di Roma, DICEA – Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale.

**Sommario** – La crescente sensibilità ambientale, unita ad un razionale uso del territorio, pone come priorità conoscitiva la caratterizzazione e il monitoraggio nel tempo delle aree di discarica in cui al corpo rifiuti spesso si associano biogas e percolato, i quali determinano importanti variazioni di alcuni parametri fisico-chimici, individuabili mediante l'utilizzo di tecniche non invasive di tipo geofisico. Lo scopo del presente lavoro è l'analisi delle potenzialità e dei limiti dell'integrazione di differenti metodi geofisici (tomografia elettrica di resistività, metodi elettromagnetici a bassa frequenza e georadar) per la localizzazione di biogas in una discarica controllata costituita da rifiuti di tipo Car-Fluff. Dall'analisi dei profili di resistività ottenuti mediante le indagini di tomografia elettrica è stato possibile investigare i soli terreni di copertura posti al di sopra della membrana di impermeabilizzazione, in quanto quest'ultimo si comporta da isolante impedendo il passaggio della corrente elettrica. I metodi elettromagnetici e georadar hanno invece consentito di monitorare anche i sedimenti al di sotto del telo di impermeabilizzazione. L'interpretazione integrata dei dati ottenuti con le diverse tecniche geofisiche ha consentito la localizzazione degli accumuli del biogas al di sopra del telo in polietilene ad alta densità e ha avviato ai limiti dovuti alle particolari condizioni specifiche legate al singolo metodo di indagine. Lo studio ha dimostrato che le tecniche geofisiche possono fornire un valido ausilio nell'ottimizzazione dello sfruttamento di biogas in discariche controllate e nella riduzione dei rischi ad esso associati in discariche non controllate.

**Parole chiave:** biogas, Car-Fluff, tomografia elettrica, georadar, metodi elettromagnetici a bassa frequenza.

## INTEGRATED GEOPHYSICAL TECHNIQUES APPLIED TO CHARACTERIZE COVERS AND DETECT BIOGAS IN A CONTROLLED LANDFILL

**Abstract** – In the last decades geophysical techniques have been used for detection, characterization and monitoring of landfills due to the high-flexibility and the cost-effectiveness of these methods. The aim of this work is to analyze potential and limits of a new integrated approach, encompassing electrical resistivity tomography, georadar and low-frequency electromagnetic techniques, for the evaluation and the monitoring of biogas accumulation in the subsoil. Experimental geophysical data are acquired in a closed controlled landfill which contains Car-Fluff waste. The electrical resistivity tomography investigation is able to investigate only the shallower layer

above the geomembrane, acting as an insulator. On the contrary, georadar and electromagnetic methods can monitor also the waste mass below the geomembrane, where biogas accumulations are likely to occur. Through the joint interpretation of geophysical data we are able to reduce the degree of uncertainty in interpretation of the single geophysical model and to provide a direct correlation between the change in the geophysical parameters and the effective presence of biogas. As a result the non-invasive geophysical techniques can be an important tool for biogas monitoring in controlled landfills and for reducing the associated risks in uncontrolled landfills.

**Keywords:** biogas, Car-Fluff, electrical resistivity tomography, georadar, electromagnetic methods.

Ricevuto il 24-6-2016. Modifiche sostanziali richieste il 7-6-2016. Correzioni richieste il 19-8-2016. Accettazione il 22-9-2016.

## 1. INTRODUZIONE

La crescente sensibilità ambientale, unita ad un razionale uso del territorio, pone come priorità conoscitiva la caratterizzazione e il monitoraggio nel tempo delle aree di discarica, sia che si tratti di discariche esaurite o ancora in esercizio, che di discariche abusive. I rifiuti a contatto con l'ambiente nel tempo subiscono trasformazioni di tipo fisico-chimico che si traducono in rilascio di sostanze chimiche che possono interagire con il sottosuolo e l'atmosfera. In particolare, per effetto della digestione anaerobica di rifiuti solidi organici, ossia della degradazione della sostanza organica attuata da diverse specie microbiche che operano in assenza di ossigeno libero o combinato, si determina la trasformazione in una miscela gassosa, denominata biogas e costituita, di norma per oltre il 98% in volume, da anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e da metano (CH<sub>4</sub>), con tenori di quest'ultimo composto variabili dal 35% al 65%.

Pertanto è particolarmente importante monitorare e gestire i prodotti gassosi (biogas) e liquidi (percolato) generati, al fine di garantire la sicurezza in discarica e nelle aree limitrofe. Nel caso del biogas il monitoraggio è inoltre utile, per minimizzare le emissioni di odori, i rischi di esplosione e/o incendi, la generazione di condizioni di asfissia, l'emissione di composti organici volatili, danni locali alla vegetazione, effetti globali come il riscaldamento

\* Per contatti: Via Eudossiana, 18 – 00184 Roma.  
E-mail: luca.digiambattista@uniroma1.it.

to climatico e l'impoverimento dell'ozono, oltre che per consentire il recupero di una fonte di energia rinnovabile.

In quest'ottica la presenza di biogas e percolato, determina importanti variazioni di alcuni parametri fisico-chimici, come la conducibilità e la cariche elettrica dei terreni, la costante dielettrica e la suscettività magnetica, individuabili mediante l'utilizzo di tecniche geofisiche.

In letteratura molti studi utilizzano tecniche geofisiche per l'individuazione e caratterizzazione di discariche di varia natura, per il monitoraggio di discariche note e la ricerca di discariche abusive (Chambers et al., 2006; Genelle et al., 2012). In particolare, l'applicazione delle tecniche geofisiche in discarica è generalmente incentrata sulla valutazione dell'integrità dei manti di tenuta (Sirieix et al., 2012), sulla localizzazione di discariche non controllate (Orlando e Marchesi, 2001) e di siti contaminati (Dahlin et al., 2002) e sul monitoraggio di interventi di bonifica (Chambers et al., 2010). Frid et al. (2010) hanno effettuato una mappatura tramite tecniche geofisiche e geochimiche delle aree a rischio gas anche se con riferimento a discariche prive di manto di copertura, mentre non si riscontrano lavori relativi alla mappatura di biogas in discariche chiuse e controllate utilizzando tecniche geofisiche non invasive.

Dal punto di vista chimico, il monitoraggio delle emissioni di biogas può essere effettuato mediante camera di accumulo portatile (Capaccioni et al., 2005). Tale tecnica, combinata con l'esecuzione di appropriati bilanci del biogas, può essere d'aiuto all'individuazione delle quote di biogas emesso in dispersione ed eventualmente accumulato internamente (Capaccioni et al., 2011).

Questo lavoro ha l'obiettivo di analizzare pregi e difetti delle tecniche geofisiche non invasive nell'individuazione e controllo dello strato di copertura e degli accumuli di biogas in discariche controllate, evidenziando inoltre le potenzialità legate all'utilizzo integrato di differenti metodi geofisici, tramite l'analisi e l'interpretazione di dati geofisici sperimentali acquisiti in una discarica dove viene conferito rifiuto di tipo Car-Fluff. Anche se questa tipologia di rifiuto è caratterizzata da un basso grado di biodegradabilità, sono comunque presenti delle frazioni organiche, come già mostrato in diversi lavori (Cossu e Lai, 2015; Urbini et al., 2014). In particolare un'indagine sulla qualità del biogas prodotto da una discarica di car-fluff ha mostrato la presenza di 16 PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) e 35 VOCs (Volatile Organic Compounds) (Raboni et al., 2015).

## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1. Descrizione del sito

L'area di studio si colloca all'interno di un impianto di smaltimento per rifiuti provenienti dalla demolizione dei veicoli situato in Italia Centrale, operativo dal 2004 e costituito da 3 lotti (di cui 1 esaurito e 2 attivi), per una volumetria totale di 2.200.000 m<sup>3</sup> (di cui 200.000 m<sup>3</sup> per il lotto 1).

L'attività sperimentale d'indagine ha riguardato il lotto esaurito (lotto 1), interessato dalla fase di post-gestione operativa caratterizzata dal monitoraggio della produzione di percolato e biogas, i quali vengono captati per mezzo di appositi impianti di raccolta. Anche se le tipologie di rifiuto smaltite in questa discarica sono caratterizzate da un basso grado di biodegradabilità, sono comunque presenti delle frazioni organiche, costituite soprattutto da materiali tessili, soggette a deterioramento. Il biogas, derivante dai processi di degradazione, viene captato attraverso una rete di tubi e pozzi fessurati in polietilene ad alta densità (HDPE) presenti nelle vasche di smaltimento e utilizzato per alimentare due motori endotermici per la produzione di energia elettrica. L'impianto di raccolta del percolato è invece costituito da una rete di tubazioni in HDPE convogliate ad un pozzo di estrazione in cui il percolato viene sollevato mediante elettropompe sommerse. Il rifiuto liquido viene provvisoriamente stoccato nei serbatoi in PRVF, contenuti in una vasca di sicurezza impermeabilizzata; da qui viene avviato a trattamento presso aziende esterne o direttamente in sito attraverso un impianto ad osmosi inversa.

Il lotto è situato lungo il versante sud del sito e si estende per una lunghezza di circa 230 m lungo la direzione x e di circa 80 m nella direzione y in Figura 1a.

La copertura superficiale raggiunge la quota massima (134 m s.l.m.) circa a metà del lotto in direzione y, mentre le zone meno elevate corrispondono ai confini del lotto. Tale geometria è legata alla necessità di convogliare opportunamente le acque meteoriche, principali cause di produzione di percolato in caso di infiltrazione e di facilitare le operazioni di raccolta del biogas e del percolato. Per lo stesso motivo la copertura presenta un andamento ascendente anche nella direzione E-W. Dall'analisi della sezione-tipo A-A' del lotto (Fig. 1b), si osserva come la copertura superficiale sia composta dalla sovrapposizione di diversi strati, al fine di isolare il corpo discarica dall'ambiente esterno. Lo strato più esterno della copertura superficiale costituito da terreno provenien-



Figura 1 – (a) Planimetria dell'impianto di smaltimento; (b) Sezione tipo A-A' del lotto come riportata in Fig.1a con linea bianca tratteggiata

te dai materiali di cava ha uno spessore variabile lungo il profilo trasversale, da 0,8 m in prossimità dei bordi del lotto a 3,5 m in corrispondenza dell'alto topografico. Al di sotto di questo strato (come anche sul fondo e lungo le sponde) è presente un telo in geomembrana in HDPE dello spessore di 2 mm, posto al di sopra di uno strato di 50 cm di argilla compattata. Inoltre, tra il rifiuto e l'argilla è presente un ulteriore strato di terreno vegetale di spessore pari a 50 cm, volto a regolarizzare la superficie per facilitare la posa in opera dell'argilla stessa. La profondità del lotto a partire dalla base fino alla sommità della copertura finale, è pari a 35 m nel punto più alto e di 20 m in quello più basso, in accordo con la topografia descritta precedentemente.

La barriera di fondo, dal basso verso l'alto, è costituita da uno strato di argilla compattata con spessore  $\geq 1.5\text{m}$ , una geomembrana in HDPE da 2 mm con geotessile protettivo, uno strato di controllo di eventuali perdite di percolato dallo strato superiore, una seconda geomembrana in HDPE da 2,5 mm e uno strato di drenaggio per la captazione del percolato. Un sistema a doppia membrana inframmezzata da una georete è presente, insieme allo strato di argilla compattata, anche sulle pareti del lotto. Dal punto di vista geologico il terreno di fondazione della discarica è costituito da formazioni vulcaniche, pozzolatiche e tufacee (Formazione di Villa Senni), mentre la falda acquifera principale è situata a circa 50 m dal p.c. originario (ca. 70 m s.l.m.).

La campagna geofisica, che ha interessato il lotto nel periodo tra novembre 2014 e novembre 2015, è stata condotta con lo scopo principale di sviluppare una procedura codificata d'indagine per l'individuazione di biogas, comprendente tecniche geofisiche completamente non distruttive. Per tali scopi sono state applicate tecniche di tomografia elettrica di resistività (Electrical Resistivity Tomography – ERT), georadar (Ground Penetrating Radar – GPR) ed elettromagnetiche a bassa frequenza (ElectroMagnetic Induction – EMI).

Le indagini sono state di tipo areale e lineare, hanno interessato una cospicua porzione della superficie del lotto (Fig. 2) e sono state progettate per eseguire interpretazione integrata tra le varie tecniche.

## 2.2. Metodologie geofisiche impiegate

I principali parametri di acquisizione dei dati sono riportati in Tabella 1.

Le modalità di acquisizione, i principi di funzionamento vengono descritti in dettaglio nel paragrafo seguente con riferimento alle tre differenti tecniche geofisiche utilizzate.

### 2.2.1. Tomografia elettrica di resistività

Nella tomografia elettrica di resistività (ERT) si effettuano, lungo un allineamento in superficie, numerose misure della differenza di potenziale  $\Delta V$

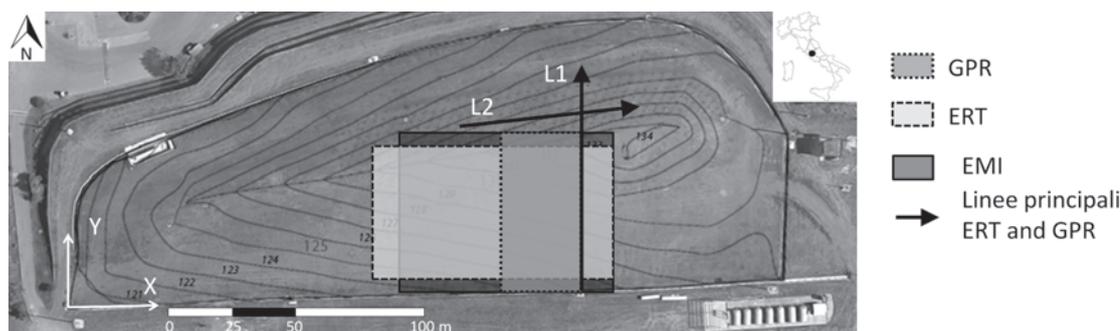


Figura 2 – Planimetria con ubicazione delle indagini geofisiche

Tabella 1 – Parametri di acquisizione

Metodo	Parametro	Valore
Tomografia elettrica di resistività (ERT)	Strumento	Resistivimetro IRIS Syscal Pro 48 canali
	Area indagata	70,5x40 m + 2 linee (L1 e L2)
	Interdistanza linee	2 m
Georadar (GPR)	Strumento	Antenne IDS 200 e 600 Mhz
	Area indagata	27x 46 m + 2 linee (L1 e L2)
	Interdistanza profili	1.5 m
Metodo elettromagnetico a bassa frequenza (EMI)	Strumento	Elettromagnetometro GSSI EMP-40 Profiler
	Area indagata	66x50 m
	Interdistanza profili	1,5 m

generata dall'applicazione di un campo elettrico in corrente continua avente un'intensità  $I$ , che si distribuisce nel sottosuolo in funzione delle resistività delle formazioni presenti. La profondità massima di investigazione è funzione della lunghezza del profilo, mentre la risoluzione è funzione della distanza tra gli elettrodi e del tipo di dispositivo. La distribuzione della resistività nel sottosuolo viene ottenuta mediante un processo iterativo di inversione dei dati che si basa sulla minimizzazione dell'errore tra i dati acquisiti in campagna e i dati calcolati sulla base di modelli teorici dell'assetto del sottosuolo (Greenhalg et al., 2006).

Le indagini ERT sono state eseguite in due campagne di acquisizione (gennaio e luglio 2015). Nella prima campagna sono state realizzate 2 linee situate trasversalmente (L1) e lungo la cresta (L2) del pendio coprendo una lunghezza di 70.5 m ciascuna. Nella seconda campagna invece sono state eseguite 20 linee parallele in direzione E-W, spaziate 2 m ciascuna, coprendo un'area di circa 70,5 x 40 m. I dati di tomografia elettrica sono stati acquisiti per mezzo del geo-resistivimetro Syscal-Pro48 della Iris Instruments, utilizzando una configurazione a 48 elettrodi posti ad interdistanza 1,5 m. Sono stati impiegati array polo-dipolo e dipolo-dipolo, i quali combinano una buona risoluzione ad una elevata profondità di indagine (Genelle et al., 2012) soprattutto nelle condizioni di stagione secca e asciutta essi consentono di massimizzare la rilevabilità delle eterogeneità superficiali.

La fase di elaborazione e inversione dei dati è stata eseguita utilizzando il software RES2DINV (Loke e Barker, 1995).

### 2.2.2. Ground Penetrating Radar

Il Ground Penetrating Radar (GPR), è una tecnica che consiste nell'inviare, per mezzo di un'antenna trasmittente, nel sottosuolo degli impulsi elettromagnetici (durata dell'ordine di  $10^{-9}$  s) ad alta frequenza, che a seguito di fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione dipendenti essenzialmente dalla geometria e dalle proprietà del mezzo vengono captati da un'antenna ricevente. L'assorbimento dell'energia e quindi la profondità di investigazione sono funzione dei terreni attraversati: ad un aumento di conducibilità elettrica del mezzo corrisponde un aumento dell'assorbimento e una diminuzione della profondità di indagine. Per ogni impulso si ha una traccia e le singole tracce affiancate formano la sezione georadar (radargramma). Quest'ultima rappresenta le variazioni di ampiezza delle onde riflesse e diffratte in funzione della posizione (ascissa) e del tempo di andata e ritorno (ordinata).

Le indagini GPR sono state eseguite in due successive campagne (febbraio-novembre 2015), lungo profili longitudinali e trasversali. Sono stati realizzati 2 profili in sovrapposizione alle linee elettriche L1 e L2 e 18 profili di lunghezza pari a 50 m e spaziatura reciproca pari a 1.5 m coprendo un'area di circa 27 x 50 m. A seguito di alcuni test preliminari e per conseguire la profondità d'indagine e la risoluzione desiderate, sono state scelte antenne con frequenza pari a 200 e 600 MHz. I dati acquisiti sono stati sottoposti ad un processing di base (amplificazione, filtraggio e migrazione) mediante il software Gred 3D Utilities (IDS) e Reflexw (Sandmeier Geophysical Research). Quindi è stata effettuata la mappatura del riflettore più profondo attraverso il *picking* del tempo di arrivo dell'onda elettromagnetica al riflettore. Infatti individuando il tempo di arrivo dell'onda allo strato più profondo e conoscendo la velocità di propagazione dei mezzi investigati è possibile calcolare la profondità della superficie inferiore dello strato di copertura superficiale individuata dal GPR e mapparne l'andamento all'interno dell'area di indagine.

### 2.2.3. Metodo elettromagnetico bassa frequenza

Le indagini elettromagnetica a bassa frequenza (EMI) utilizzano una fonte energizzante costituita da un solenoide (il trasmettitore elettromagnetico) percorso da una corrente alternata e da una bobina che ha le funzioni di ricevitore del campo elettromagnetico variabile indotto. Il segnale elettromagnetico, che lo strumento raccoglie tramite il ricevitore, è la somma vettoriale del campo elettroma-

gnetico primario e di quello secondario indotto che oscilla con la stessa frequenza del primario. La risposta elettromagnetica che si ottiene dipende dalla frequenza di oscillazione del campo primario, dalla conducibilità del terreno indagato e dall'accoppiamento geometrico tra il trasmettitore ed il ricevitore. Registrando lungo allineamenti paralleli la componente in fase e la componente in quadratura del campo magnetico secondario rispetto a quello principale, tramite approssimazioni matematiche è possibile ricavare rispettivamente mappe di suscettività magnetica  $\kappa$  e di conducibilità  $\sigma$  (o del suo inverso, ovvero la resistività), relative ad un determinato volume di sottosuolo (McNeill 1980; Won e Huang 2004):

$$\sigma = \frac{4}{2\pi f \mu_0 s^2} \text{Im}(Q^*) \quad (1)$$

$$\kappa = -\frac{2 \text{Re}(Q^*)}{\text{Re}(Q^*) + G} \quad (2)$$

in cui  $Q^*$  è il coefficiente di accoppiamento reciproco complesso tra il campo magnetico primario e secondario,  $f$  la frequenza del campo impiegato,  $s$  la spaziatura tra le bobine,  $\mu_0$  la permeabilità magnetica nel vuoto e  $G$  un parametro che dipende solo dalla geometria e dalla configurazione delle bobine.

Le indagini EMI sono state condotte in tre campagne nei mesi di novembre 2014, gennaio e ottobre 2015, su un'area di dimensioni 64.5x50 m.

Lo strumento utilizzato (GSSI EMP-400 Profiler), è stato impostato per registrare su tre frequenze diverse, pari a 3, 10 e 15 kHz, acquisendo profili S-N con un'interdistanza reciproca pari a 1,5 m, mappati per mezzo di una procedura di interpolazione sull'intera area d'indagine.

### 3. RISULTATI

#### 3.1. Tomografia elettrica di resistività

Si riportano in Figura 3a i risultati relativi all'inversione della linea L1, direttamente confrontabile con la sezione tipo A-A' di Figura 1b. Si nota come la presenza del telo in HDPE (avente elevata resistività dell'ordine di  $10^6 \Omega\text{m}$ ) impedisca il passaggio di corrente agli strati inferiori più conduttivi (corpo rifiuti), laddove è possibile l'accumulo di biogas.

La sezione geoelettrica mostra uno strato superficiale caratterizzato da bassi valori di resistività ( $<50 \Omega\text{m}$ ) e spessore variabile tra 1 e 4 m, coincidente con lo strato di materiali di copertura superficiale. Al di sotto di esso la resistività cresce di un ordine di grandezza a causa della presenza del manto di copertura. Confrontando la sezione geofisica con la sezione-tipo del lotto riportata in Figura 1b, si nota come gli spessori del primo strato siano comparabili a quelli di progetto fino alle profondità alle quali è posizionato il telo in HDPE. La variazione laterale di resistività presente nello strato inferiore potrebbe invece essere legata alla particolare conformazione topografica o ad una non perfetta tenuta del telo di copertura. Il manto di impermeabilizzazione infatti agisce come isolante al passaggio della corrente e quindi la risposta in termini di resistività dovrebbe essere la stessa per tutta la lunghezza della stesa elettrica.

Il modello di resistività della linea L2 (Fig. 3b), approssimativamente parallela alle linee di livello, mostra un andamento simile alla linea L1 caratterizzato da uno strato conduttivo (terreno di copertura) e quindi da un aumento di resistività dovuto alla presenza del manto di copertura. I risultati con-

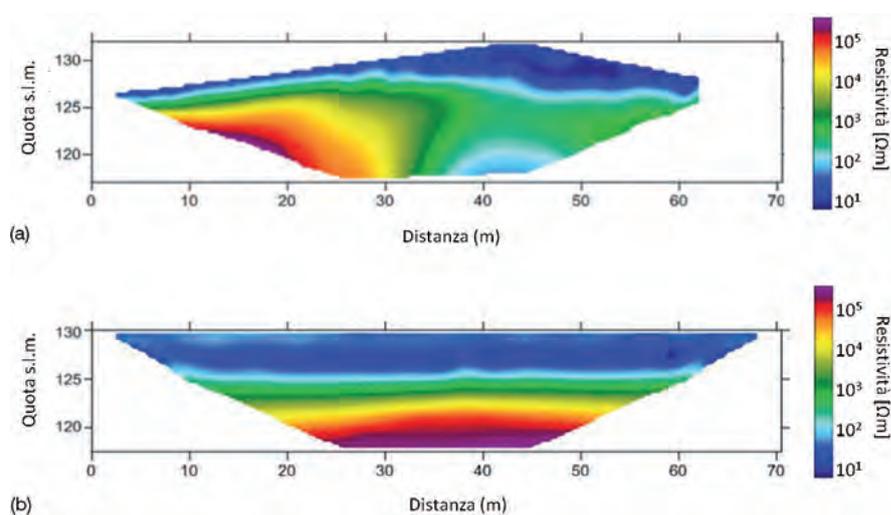


Figura 3 – Modelli di resistività delle linee L1 (a) ed L2 (b)

fermano inoltre la continuità della geomembrana lungo la linea elettrica.

### 3.2. Georadar

Le sezioni georadar hanno consentito di individuare una riflessione continua situata ad una profondità massima di circa 2 m (circa 50 ns in Fig. 4) al di sotto della quale la riflessione non risulta più visibile. Si riporta a titolo esemplificativo in Figura 4 il radargramma relativo alla linea L1. Si nota come la riflessione indotta dal telo, indicata in colore arancio, non sia più visibile tra le progressive di circa 40-60 m corrispondenti al massimo della superficie topografica.

In Figura 5 si riporta invece il radargramma relativo alla linea L2, trasversale alla precedente, il quale mostra chiaramente la riflessione dovuta al telo di impermeabilizzazione in HDPE di chiusura della discarica. La riflessione del telo è individuabile con continuità su tutta l'estensione del profilo. Al di sotto del manto di copertura si ha una forte ed immediata attenuazione del segnale, abbastanza omogenea su tutta la linea. La perdita del segnale in profondità è dovuta probabilmente allo strato conduttivo di argilla compattata posto al di sotto del manto che assolve anche alla funzione di protezione dalle asperità del rifiuto, in particolar modo nelle discariche Car-Fluff.

Inoltre all'interno dello strato di copertura si osservano delle riflessioni sub-orizzontali abbastan-

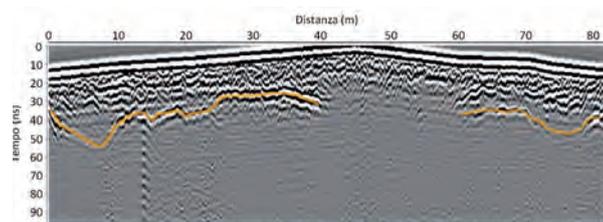


Figura 4 – Radargramma relativo all'acquisizione con antenna da 200 MHz sulla linea L1. Il riflettore che rappresenta il telo in HDPE è indicato in arancio

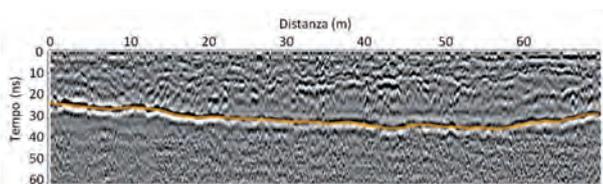


Figura 5 – Radargramma relativo all'acquisizione con antenna da 200 MHz sulla linea L2. Il riflettore che rappresenta il telo in HDPE è indicato in arancio

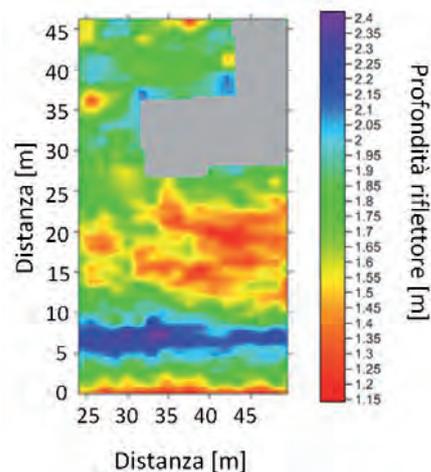


Figura 6 – Mappa della profondità del riflettore GPR nell'area di indagine indicata in Fig. 2

za continue. Tali riflessioni sono dovute a variazioni delle proprietà dielettriche all'interno dello strato di copertura, tali comunque da non pregiudicare la penetrazione del segnale in profondità. Inoltre si riscontra la presenza di numerosi corpi di piccole dimensioni che provocano iperboli di diffrazione, dalle quali è stato possibile ricavare il valore della velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica pari a circa 0.1 m/ns.

Per mezzo l'operazione di *picking* sopra descritta, effettuata sui radargrammi relativi alle acquisizioni a 200 MHz, è stato possibile mappare la profondità del riflettore che rappresenta il telo HDPE in tutta l'area indagata con il georadar individuata in Figura 2. Il risultato di questa elaborazione è riportato in Figura 6, dove si nota che il range di variazione della profondità sia compreso tra 1,2 e 2,4 m circa. Non considerando i primi 10 m in direzione y, che risentono della presenza di sottoservizi, si nota come i valori maggiori siano concentrati nelle zone topograficamente più elevate e che sia presente una zona grigia dove non è stato possibile identificare il riflettore.

### 3.3. Metodo elettromagnetico a bassa frequenza

In Figura 7 sono riportate le mappe di resistività ottenute per la frequenza di 15 kHz, in due differenti periodi dell'anno (novembre 2014 e gennaio 2015). Si nota come le mappe presentino una distribuzione di resistività all'interno dell'area caratterizzata da una zona più resistiva corrispondente alla sommità del lotto e da zone in cui le variazioni sono più limitate e attribuibili alle diverse condizioni di umidità del terreno al momento dell'acquisizione. L'anomalia resistiva riscontrata in cor-

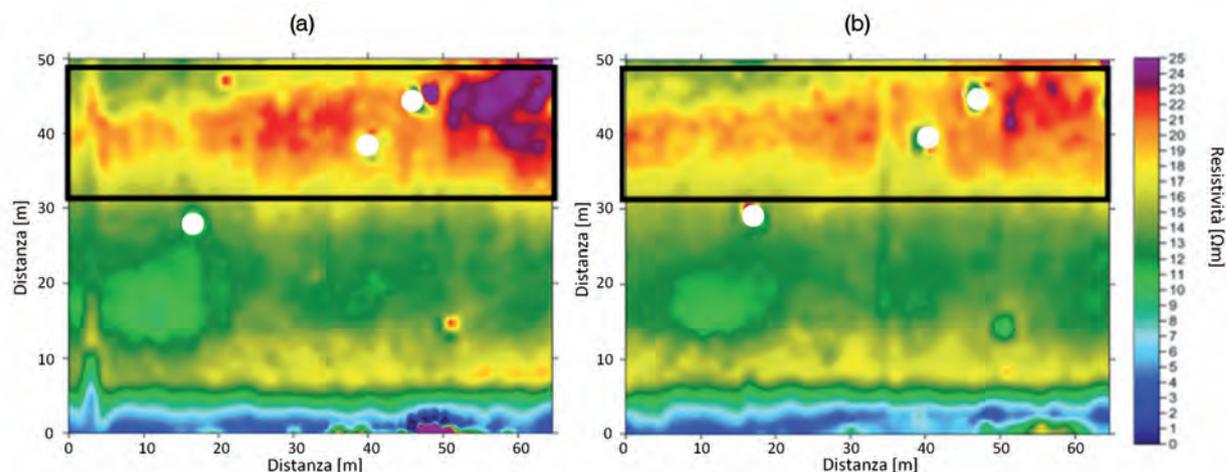


Figura 7 – xxxMappe di resistività EMI a 15kHz, acquisite a novembre 2014 (a) e gennaio 2015 (b). Il riquadro nero indica l'area che presenta i valori maggiori di resistività

rispondenza del massimo topografico è attribuibile all'accumulo di biogas: infatti qualora dovesse effettivamente essere presente del gas nei pori dello strato sottostante il telo, si andrebbe ragionevolmente a convogliare verso le quote maggiori, dove sono presenti anche alcuni pozzi di estrazione (indicati in bianco in Figura 7).

#### 4. DISCUSSIONE

L'interpretazione congiunta dei dati acquisiti con i diversi metodi ha permesso di sopperire alle incertezze legate sia alle particolari condizioni del sito in esame, sia alle indeterminazioni interpretative delle singole tecniche e di fornire una correlazione diretta tra la variazione dei parametri geofisici e l'effettiva presenza di biogas.

Nel caso in esame, l'indagine ERT non risulta diagnostica per la localizzazione del biogas in discariche chiuse e controllate, a causa della presenza del manto di copertura che agisce come isolante. Tale tecnica può essere altresì impiegata per la rilevazione di lacerazioni nel telo e per lo studio del suolo di copertura, ma non per lo studio

Nel caso delle acquisizioni EMI e GPR, il confronto dei risultati ottenuti ha permesso di validare l'ipotesi iniziale secondo la quale entrambi i metodi non risentono della presenza del telo impermeabilizzante in HDPE, investigando anche lo strato posto immediatamente al di sotto di esso. In Figura 8 sono confrontate la rappresentazione della superficie del riflettore profondo di Figura 6 e la mappa di resistività EMI di Figura 7.

Come già evidenziato in precedenza, nell'analisi dei risultati non è stata presa in considerazione la zona compresa tra 0 e 10 m in direzione y, dove le stru-

mentazioni risentono dell'effetto di bordo legato ai sottoservizi e alle recinzioni. Nella zona compresa tra 15-25 m in direzione y sono presenti valori di resistività limitati (10-15  $\Omega\text{m}$ ), mentre la superficie del riflettore risulta a circa 1.5 m. Laddove invece si riscontrano valori più elevati di resistività (progressiva maggiore di 25 m), si registra una profondità della superficie riflettente di circa 1.8-2 m, nonostante in certe zone non sia stato possibile individuare il riflettore (zone grigie in Fig. 8b). Come mostrato in precedenza queste zone corrispondono all'alto topografico del lotto, dove è plausibile ipotizzare un accumulo di biogas. È possibile quindi che l'eventuale presenza di biogas accentui il fenomeno dello *scattering*, per cui l'impulso emesso dall'antenna GPR tende a rifrangersi in tutte le direzioni dello spazio, con conseguente perdita di energia e impossibilità di individuare il riflettore. Questa ipotesi è validata dal fatto che il valore massimo di resistività (circa 25  $\Omega\text{m}$ ) si riscontri nel margine NE della griglia d'indagine in accordo con la zona in cui non è stato possibile individuare la superficie riflettente.

Una seconda analisi integrata è stata eseguita interpretando congiuntamente la sezione 2D ERT di resistività, il radargramma GPR e i valori della resistività EMI acquisiti sulla linea L1 (Fig. 9). Nell'area compresa tra 10 e 20 m lungo la linea d'indagine, la sezione ERT (Fig. 9b) mostra spessori del terreno conduttivo di copertura compresi tra 1 e 1.5 m mentre il profilo EMI (Fig. 9a) restituisce valori di resistività al di sotto di 20  $\Omega\text{m}$  e la linea GPR individua un riflettore continuo (profondità 1-1.5 m). A quote topografiche superiori i riflettori della sezione GPR (Fig. 9c) non sono visibili, mentre è possibile individuare la superficie riflettente nella parte terminale della linea. Pertanto si può ipo-

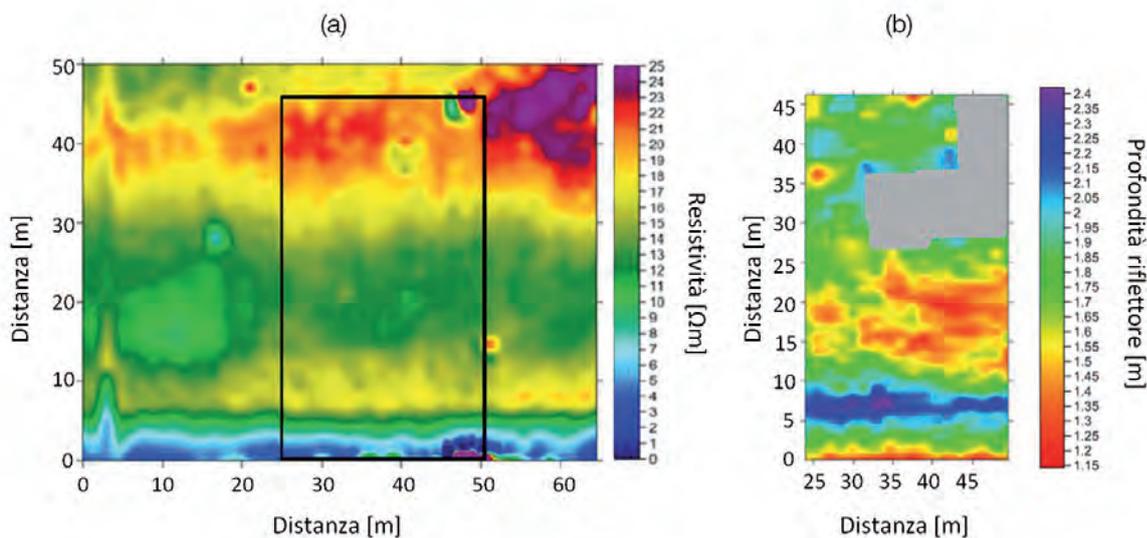


Figura 8 – Confronto tra mappa di resistività EMI ottenuta con frequenza 15 kHz a novembre 2014 (a) e mappa della profondità del riflettore GPR, delimitata in Fig. 8a dal riquadro nero (b)

tizzare che all'aumentare dello spessore dello strato di copertura si determini un maggiore assorbimento del segnale che non permette di intercettare il telo impermeabilizzante. Questa ipotesi risulta in disaccordo però con il profilo di resistività EMI che mostra all'aumentare dello spessore un incremento della resistività che dovrebbe favorire la penetrazione del segnale georadar. Inoltre se il gas fosse

presente solo al di sotto del telo impermeabile, detto manto dovrebbe comunque essere individuato nel radargramma di Figura 9c. Qualora invece vi sia accumulo di biogas anche al di sopra del telo, vi sarebbe proprio l'aumento di *scattering* con la conseguente dispersione del segnale mostrata in Figura 9c. Quindi l'aumento della resistività registrato dall'acquisizione EMI all'aumentare degli spesso-

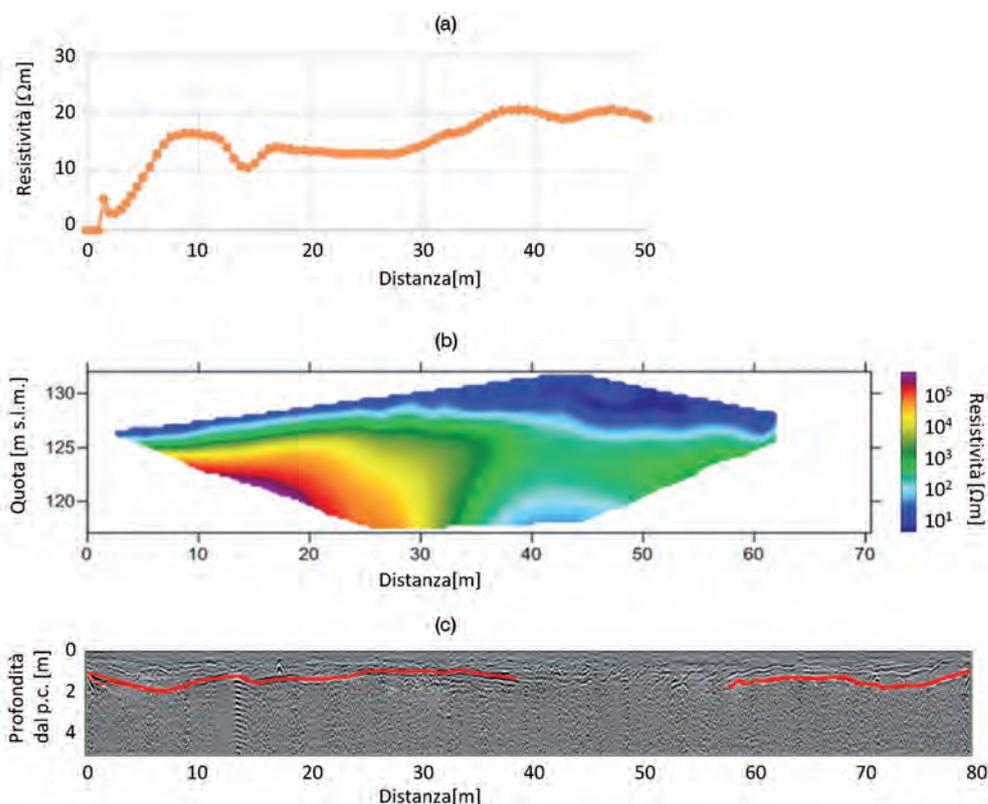


Figura 9 – Confronto tra profilo di resistività EMI (a), sezione di resistività ERT (b) e radargramma GPR (c) relativi alla linea L1. Il riflettore che rappresenta il telo in HDPE è indicato in rosso

ri e la concomitante diminuzione della penetrazione del segnale radar può essere giustificata dal probabile accumulo di biogas nella zona sommitale del lotto che interessa anche i terreni al di sopra del manto di impermeabilizzazione.

Questa ipotesi è avvalorata dal confronto, riportato in Figura 10, tra la mappa di resistività EMI di Figura 8a e l'immagine satellitare del lotto. Si nota come la zona ad alta resistività, situata all'interno del rettangolo bianco di Figura 10a corrisponda esattamente alla zona in cui la vegetazione è assente o estremamente secca e ha la colorazione gialla indicante l'azione del biogas sulla vegetazione (Fig. 10b).

L'effettiva presenza di biogas al di sopra del manto di copertura potrà trovare conferma attraverso l'effettuazione di una campagna localizzata di monitoraggio delle emissioni diffuse di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> mediante, ad esempio, la metodologia della camera di accumulo (Capaccioni et al., 2011). Nel caso in esame, a causa di restrizioni nell'accesso ai luoghi per l'effettuazione di indagini chimiche, non è stato possibile effettuare detta campagna di indagine per la validazione dei risultati ottenuti.

## 5. CONCLUSIONI

Tramite l'interpretazione dei dati geofisici è stato possibile valutare la potenzialità e i limiti di ciascuna metodologia d'indagine per la caratterizzazione dello strato di copertura e l'individuazione di biogas in discarica e il valore aggiunto dato dall'interpretazione integrata dei risultati.

Dall'analisi dei profili di resistività ottenuti mediante le indagini di tomografia elettrica si evince

che tale tecnica investiga i soli terreni di copertura al di sopra del telo HDPE, in quanto quest'ultimo si comporta da isolante impedendo il passaggio di corrente elettrica. Nel profilo acquisito trasversalmente alla discarica (L1), caratterizzato da quote topografiche variabili, si sono riscontrate delle variazioni laterali di resistività nel modello attribuibili alla variazione della superficie topografica o ad una possibile rottura nel telo di impermeabilizzazione, mentre la linea L2 parallela alle isoipse, ha mostrato una buona continuità del manto di copertura. Le indagini ERT hanno comunque fornito un ottimo supporto per la caratterizzazione dello strato superficiale di terreno, e hanno mostrato come questa metodologia possa essere impiegata per l'analisi dello stato di conservazione dello strato di copertura.

Le indagini EMI, concentrate in un'area di ca. 3000 mq, hanno permesso di ricavare i valori di resistività e suscettività dei primi 3-5 m di sottosuolo e di monitorare eventuali variazioni nella componente fluida del sottosuolo dovute alla stagionalità. La mappa delle resistività mostra un incremento di tale parametro concorde con l'incremento della quota topografica. Da tali risultati è stato possibile ipotizzare che l'incremento della resistività con la quota sia dovuto all'accumulo del biogas nella parte sommitale della discarica che determina un aumento della resistività interstiziale dei sedimenti. In questo modo si è potuto quindi verificare come il metodo EMI, a differenza delle indagini ERT, non risenta della presenza del telo HDPE e permetta di investigare anche lo strato posto immediatamente al di sotto del manto di copertura. Questa metodologia quindi appare particolarmente in-

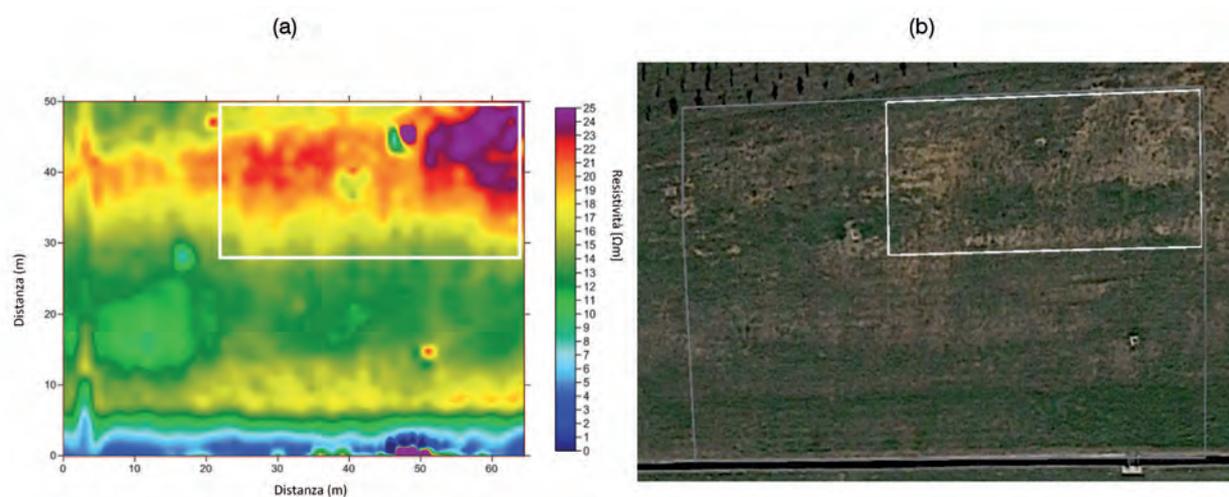


Figura 10 – Confronto tra la mappa di resistività EMI (a) e immagine satellitare (b). L'area indagata con l'indagine EMI è indicata in grigio, la zona anomala con probabile accumulo di biogas in bianco

dicata per l'individuazione di eventuali accumuli di biogas durante lo sfruttamento.

Infine le indagini georadar, focalizzate in una zona più ristretta, hanno permesso di verificare le capacità risolutive e di penetrazione della tecnica per gli scopi prefissati. Si è evidenziata la presenza di una superficie riflettente principale che si trova a profondità variabile tra 1 e 3 m dal piano campagna al di sopra della quale si trovano sedimenti a tratti stratificati. Al di sotto di questo riflettore in genere non si riscontrano segnali utili. Il riflettore ha una buona continuità in tutta l'area eccetto che nella parte topografica più elevata. Questo comportamento è attribuibile alla presenza di biogas al di sopra del telo in HDPE che altera la risposta del segnale georadar in termini di penetrazione del segnale. I risultati ottenuti sono congruenti con quanto riscontrato dalle indagini elettromagnetiche a bassa frequenza e confermano come entrambe le tecniche siano diagnostiche per l'individuazione di biogas. Inoltre anche il metodo georadar non sembra risentire della presenza del telo di impermeabilizzazione. Le anomalie riscontrate, attribuibili alla presenza di biogas, potranno essere validate da una futura campagna di monitoraggio delle emissioni gassose.

In definitiva il lavoro svolto ha messo in evidenza come le metodologie geofisiche selezionate siano efficaci nel monitoraggio di impianti di smaltimento controllati per la caratterizzazione dei primi metri di sottosuolo. Si è dimostrato come tutti e tre i metodi permettano di investigare lo strato di copertura e che in particolare i metodi EMI e GPR consentono di monitorare anche il sottosuolo al di sotto del manto di impermeabilizzazione, laddove è maggiore la probabilità di riscontrare accumuli di biogas durante la fase di sfruttamento. Dette tecniche non invasive sono rapide, economiche e permettono di investigare aree estese ad un costo limitato.

Inoltre l'utilizzo congiunto di diverse tecniche geofisiche non distruttive consente di ottenere risultati più efficaci, ovviando ai limiti dovuti a particolari condizioni specifiche legate al singolo approccio e alle indeterminazioni interpretative insite in ciascun metodo, fornendo inoltre un importante ausilio nell'ottimizzazione dello sfruttamento di biogas in discariche controllate e nella riduzione dei rischi ad esso associati in discariche non controllate.

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Capaccioni B., Caramiello C., Tatano F. e Viscione A. (2011). Effects of a temporary HDPE cover on landfill gas emissions: Multiyear evaluation with the static chamber approach at an Italian landfill. *Waste Management* 31(5), 956-965.

Capaccioni B., Didero M., Lucci P., Pirillo L., Scartoni P. e Tatano F. (2005). Camera di accumulo portatile per il monitoraggio di emissioni di biogas in discarica: risultati sperimentali ed elaborazioni preliminari a scala provinciale. *RS Rifiuti Solidi XIX* (2), 96-110.

Chambers J.E., Kuras O., Meldrum P.I., Ogilvy R.D. e Hollands J. (2006). Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. *Geophysics* 71(6), B231-B239.

Chambers J.E., Wilkinson P.B., Wealthall G.P., Loke M. H., Dearden R., Wilson R. e Ogilvy R.D. (2010). Hydrogeophysical imaging of deposit heterogeneity and groundwater chemistry changes during DNAPL source zone bioremediation. *Journal of contaminant hydrology* 118(1), 43-61.

Cossu R. e Lai T. (2015). Automotive shredder residue (ASR) management: an overview. *Waste Management* 45, 143-151.

Dahlin T., Bernstone C. e Loke M.H. (2002). A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics* 67(6), 1692-1700.

Frid V., Doudkinski D., Liskevich G., Shafran E., Averbakh A., Korostishevsky N. e Prihodko L. (2010). Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills. *Environmental Earth Sciences* 60(4), 787-798.

Genelle F., Sirieix C., Riss J. e Naudet V. (2012). Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site. *Engineering Geology* 145, 18-29.

Greenhalgh S.A., Bing Z. e Green A. (2006). Solutions, algorithms and inter-relations for local minimization search geophysical inversion. *Journal of Geophysics and Engineering* 3(2), 101-113.

Loke M.H. e Barker R.D. (1995) Least-square deconvolution of apparent resistivity pseudo-sections. *Geophysics* 60(6), 499-523.

McNeill J.D. (1980). Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction numbers – Technical Note TN-6;1980, Geonics Ltd: Mississauga, ON.

Orlando L. and Marchesi R., (2001). Georadar as tool identify and characterization solid waste dump deposits. *Journal of Applied Geophysics*, 48, 163-174.

Raboni M., Torretta V., Urbini G. e Viotti P. (2015). Automotive shredder residue: a survey of the hazardous organic micro-pollutants spectrum in landfill biogas. *Waste Manage. Res.* 33 (1), 48-54.

Sirieix C., Fernández Martínez J.L., Riss J. e Genelle F. (2012). Electrical resistivity characterization and defect detection on a geosynthetic clay liner (GCL) on an experimental site. *Journal of Applied Geophysics* 90, 19-26.

Urbini G., Viotti P. e Gavasci R. (2014). Attenuation of methane, PAHs and VOCs in the soil covers of an automotive shredded residues landfill: a case study. *J. Chem. Pharm. Res.* 6 (11), 618-625.

Won I.J., Huang H. (2004). Magnetometers and electro-magnetometers. *The Leading Edge* 23, 448-451.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare i gestori della discarica per la disponibilità dimostrata.

Questo articolo riprende parte di un contributo presentato a SiCon2016.



# INGEGNERIA DELL'AMBIENTE

per il 2016 è sostenuta da:

