

MONITORAGGIO DEL FLUSSO DI BIOGAS DIFFUSO DAL SUOLO DA DISCARICHE RSU: IL CASO DI LEGOLI, PECCIOLI (PI)

B. Raco*, R. Cioni*, M. Guidi*, A. Scozzari*, M. Lelli* G. Lippo**

Sommario – In conformità con il D.L. 36/2003 è stato stimato il flusso di biogas emesso dall'intero corpo della discarica di Legoli (Peccioli, Pisa), attraverso due campagne di misura del flusso di CO₂ e CH₄ diffuso dal suolo. Le misure sono state eseguite con il metodo della camera di accumulo nei mesi di maggio 2004 e gennaio 2005. Le quantità totali di CO₂ e di CH₄ emesse giornalmente in atmosfera, come pure la quantità di biogas persa dal sistema di captazione, sono state stimate attraverso elaborazioni statistiche realizzate a partire dalle misure puntuali di flusso. Utilizzando metodi geostatistici, sono state costruite delle mappe di isoflusso di biogas che hanno permesso di individuare aree di degassamento anomalo presenti sulla copertura. Queste informazioni, oltre ad essere molto utili per la gestione tecnica della discarica, hanno permesso di tarare il modello di produzione. Insieme alla misura dei flussi sono state costruite delle mappe di temperatura superficiale del suolo della discarica, ottenute tramite un radiometro IR, basato su un microbolometro FPA. Queste mappe termografiche sono state confrontate con le carte di isoflusso. L'utilizzo della tecnica termografica è finalizzato ad una valutazione rapida a priori delle dimensioni della maglia di campionamento, una volta comprese le correlazioni fra temperatura del suolo e flusso di biogas.

MONITORING BIOGAS FLUXES FROM SOILS AT SANITARY LANDFILL SITES: THE CASE OF LEGOLI, PECCIOLI (PROVINCE OF PISA, ITALY)

Summary – During May 2004 and January 2005 two soil gas flux surveys have been carried out in the Legoli landfill (Peccioli, Pisa province, central Tuscany) by means of the accumulation chamber method, this static technique allows to determine the flux in relation to the concentration increase through time inside a chamber turned upside-down on the ground. According to D.L. 36/2003 the total biogas diffused from soil have been monitored and evaluated. The CO₂ and CH₄ fluxes have been measured over a 30m x 30m regular grid. These dimensions have been chosen after the thermographic survey carried out before each gas soil flux surveys. Using statistic methodology, direct measurements of CO₂ and CH₄ fluxes from landfills soil allow estimating the total diffuse flux of biogas from soil. Moreover processing data with geostatistical software direct measurements of CO₂ and CH₄ fluxes provide us information about the real characteristics of the impermeable cover in order to recognise the presence of anomalous flux and fractures. During the flux measurement survey, images of the landfill have been taken by a longwave IR radiometer based on an FPA microbolometer sensor the obtained temperature maps from the acquired scenes have been processed. In this work, the correlation between infrared thermography images and biogas flux maps is

discussed; the possibility of using the radiometric information as a guidance for the local flux measurements is also investigated.

Parole chiave: flusso biogas, camera di accumulo, discarica RSU, termografia.

Keywords: biogas flux, accumulation chamber, urban landfill, thermography.

1. INTRODUZIONE

Il biogas che si sviluppa sempre all'interno del corpo rifiuti è dovuto alla degradazione anaerobica di materia organica promossa da famiglie di batteri metanogenici ed è formato da una miscela di CH₄ (55-60%), CO₂ (40-45%) ed altri composti organici solitamente presenti in tracce, spesso tossici e comunque maleodoranti. Le discariche incrementano il contenuto di CH₄ nell'atmosfera: secondo le stime del US-EPA (2001) il CH₄ emesso dalle discariche è circa il 22% del metano totale presente in atmosfera. A tale proposito è importante ricordare che il metano è un gas serra 23 volte più potente del biossido di carbonio (Baird, 1995). Esistono diversi modelli numerici in grado di prevedere la produzione di biogas da una discarica (Findikakis e Leckie, 1979; El-Fadel *et al.*, 1988; Andreottola e Cossu, 1988; Findikakis *et al.* 1987; Manna *et al.*, 1999; Nastev, *et al.*, 2001; Hashemi, *et al.*, 2002) e la stima viene eseguita in funzione essenzialmente della qualità dei rifiuti e della cinetica di degradazione. Questa metodologia è utilizzata sia per dimensionare la parte impiantistica del sistema di aspirazione e combustione del biogas che per simulare scenari utili alla valutazione degli impatti prodotti sull'ambiente dalla discarica stessa. Il problema principale è quello di realizzare appropriati lavori di impermeabilizzazione che evitino la perdita di biogas in atmosfera e permettano di applicare la corretta depressione all'intero corpo discarica per implementare l'efficienza della captazione. Avere a disposizione delle mappe di isoflusso di biogas che mostrano la distribuzione spaziale delle emissioni diffuse dal suolo, risulta estremamente utile per la pianificazione di ogni intervento riguardante la captazione del biogas e la copertura della discarica. Nonostante che il D.L. 36/2003 preveda il monitoraggio delle emissioni diffuse, ad oggi, non esiste un protocollo per quantificare la fuga di biogas dal suolo della discarica. Per risolvere questo problema si può utilizzare il metodo della "soil gas survey"; tuttavia, dato che questa tecnica usa la legge di Fick per correlare il gradiente di concentrazione al flusso è necessaria la conoscenza del coefficiente di diffusione in ogni punto di misura. Poiché la componente advettiva del flusso è rilevante, date le alte pressioni raggiunte dai gas, nelle discariche è preferibile utilizzare misure dirette di flusso. L'esecuzione di misure puntuali del flusso di

* Dott.ssa Brunella Raco, Dott. Roberto Cioni, Dott. Massimo Guidi, Ing. Andrea Scozzari, Dott. Matteo Lelli; Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR di Pisa – Via Moruzzi, 1 – 56124, Pisa – Tel. 050.3153298, e-mail: b.raco@igg.cnr.it

** Ing. Giovanni Lippo; P&C S.r.l. – P.za del Popolo, 10 – Peccioli (PI) – Tel. 050.632124, e-mail: disc_peccioli@belvederespa.it

CO₂ e di CH₄, di campionamenti e di analisi chimiche del biogas permettono da un lato la stima del flusso di inquinanti verso l'atmosfera e dall'altro la costruzione di mappe di isoflusso utilizzando metodi geostatistici.

Negli strati più superficiali della copertura artificiale e/o del suolo il CH₄ viene trasformato in CO₂ per processi di ossidazione (Czepiel *et al.*, 1996). Se lo scopo del lavoro fosse soltanto quello di quantificare l'emissione totale di CH₄ dalla superficie della discarica verso l'atmosfera sarebbe più corretto misurare direttamente il flusso di metano. Se invece, lo scopo è anche quello di evidenziare la presenza di aree con degassamento anomalo o addirittura di fratture nella copertura supposta impermeabile, è più opportuno misurare il flusso di CO₂ e stimare il flusso totale di biogas determinando il rapporto CH₄/CO₂ (Cioni *et al.*, 2002; Cioni *et al.*, 2003). Un approccio simile è stato utilizzato recentemente da Capaccioni *et al.* (2005) in cinque diverse discariche per RSU ed assimilabili ubicate nel territorio della provincia di Arezzo. In questo lavoro sono stati invece misurati contemporaneamente i flussi di CO₂ e CH₄ dal suolo per quantificare direttamente l'emissione diffusa di gas serra in atmosfera. Inoltre, la quantità di biogas non captato è stata stimata utilizzando più di 130 misure del rapporto CH₄/CO₂ effettuate su tutti i pozzi di captazione del biogas presenti sull'impianto di smaltimento.

Questo lavoro si caratterizza anche per la presentazione dei risultati di due campagne di misura del flusso sia di CO₂ che di CH₄ ben separate nel tempo; ciò approssima la procedura necessaria per un monitoraggio come previsto dal D.L. 36/2003.

Le mappe di isoflusso sono state costruite applicando le tecniche della geostatistica ed in particolare il metodo di interpolazione ed estrapolazione del kriging (Krige, 1951; Matheron, 1962; 1965; 1969; 1970). Tali mappe hanno lo scopo di individuare l'eventuale presenza di zone caratterizzate da flusso anomalo e/o da fratture che possono agire come vie di fuga preferenziali per il biogas. Quindi ciò permetterà di verificare le reali caratteristiche della copertura impermeabile riconoscendo le zone dove essa non è efficiente.

Nel presente lavoro si è cercato, da un lato, di misurare l'effettivo flusso di biogas emesso all'interfaccia aria-suolo in conformità al D.L. 36/2003, dall'altro di ottenere la quantità di biogas non captato per riuscire ad avere una misura realistica della produzione totale di biogas dalla discarica; operando in tal modo si eliminano o comunque si riducono le incertezze intrinseche nei modelli teorici di calcolo.

Alle misure puntuali dei flussi è utile abbinare la tecnica della mappatura dei flussi di calore. Queste tecniche lavorano in sinergia: l'una contribuisce a validare ed interpretare con efficacia le informazioni ottenute dall'altra (Scozzari *et al.*, 2004).

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 Localizzazione

Il sito di interrimento controllato di Legoli è situato nel comune di Peccioli (Pisa), in una zona collinare ad elevato valore paesaggistico e scarsamente popolata. Il centro abi-

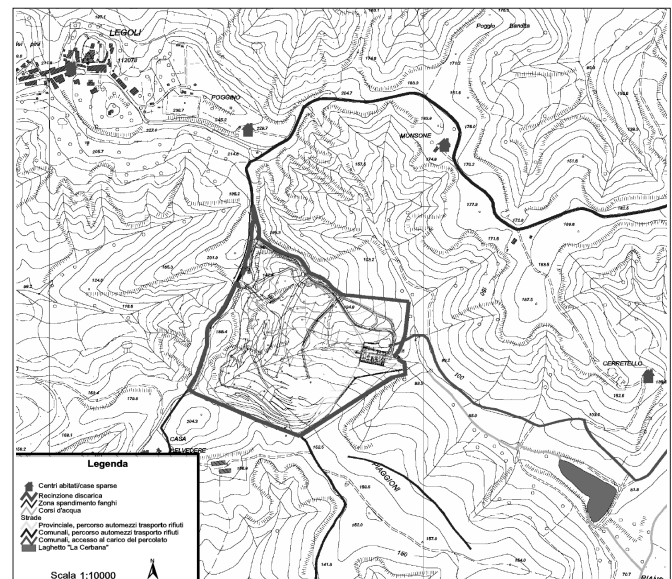


Fig. 1 – Localizzazione della discarica di Legoli (CTR 1:10000, modificato)

tato più vicino è il centro di Legoli (circa 260 abitanti) che dista circa 300 m in direzione Nord-Ovest dal sito, in posizione sopraelevata rispetto alla discarica. Il sito è accessibile dalla Strada Provinciale “delle colline di Legoli” e da questa percorrendo la Strada Comunale Legoli-Ripalta e quindi la Strada Comunale Legoli-Libbiano (Fig. 1).

La zona destinata all'interrimento controllato occupa il fondo e parte dei fianchi di una profonda depressione originata dall'erosione. Indagini geognostiche eseguite sull'area di interrimento hanno rilevato la presenza di argilla grigia compatta con una permeabilità di 10⁻⁹ cm s⁻¹, per una profondità di almeno 25 metri dal piano di campagna. Il sottosuolo costituisce quindi una geomembrana naturale impermeabile e perciò consente la messa a dimora dei rifiuti senza l'inserimento di una membrana di impermeabilizzazione artificiale.

Nell'area destinata alla messa a dimora dei rifiuti non vi sono falde acquifere né sorgenti che possono mettere in comunicazione l'interno della discarica con l'esterno. L'impianto è distante dagli alvei di piena dei fiumi, laghi e torrenti, dai centri abitati e dai punti di approvvigionamento di acque destinate ad uso potabile. Il bacino è attraversato da un torrente nel quale confluiscono le acque meteoriche raccolte dai lotti chiusi e dal piazzale inferiore e che termina nel laghetto artificiale “La Cerbana”, che si trova in direzione Est-Sud-Est ad una quota minore del corpo discarica, all'interno del bacino idrografico della discarica stessa.

L'impianto è stato progettato in modo da avere una durata limitata nel tempo ed è gestito attraverso la realizzazione, in varie fasi temporali, di tredici lotti sovrapposti ed indipendenti che, a loro volta, sono suddivisi in una serie di moduli autonomi l'uno dall'altro che rappresentano l'unità operativa di base del programma di gestione della discarica. Complessivamente l'impianto dovrebbe consentire lo smaltimento di 666.000 tonnellate di rifiuti che verranno in

seguito stoccati in strati sovrapposti dello spessore di 3,8 m, con un'inclinazione del 1-2% verso valle.

Inoltre per eliminare l'impatto negativo di tipo igienico – sanitario di un impianto di smaltimento di rifiuti solidi urbani, sono previste operazioni giornaliere di copertura dei rifiuti. Per tale motivo i lotti di maggiore dimensione sono stati suddivisi in un certo numero di moduli aventi larghezza media di circa 30m; ciò consente un rapido avanzamento giornaliero del fronte e l'immediato ricoprimento dei rifiuti stoccati.

A discarica completata l'aspetto dell'area dovrà essere in armonia con il paesaggio collinare della zona circostante. Pertanto, la messa in posto dei rifiuti è stata progettata in modo da assicurare un'inclinazione della scarpata pari a circa 16°, cioè la stessa entità delle pendenze naturali dei versanti stabili dei rilievi vicini. Lo spessore conferito alla copertura finale consentirà inoltre un'immediata coltivazione del terreno con inerbimento della stessa tramite piantagioni ad apparato radicale debolmente sviluppato. Pertanto, è quindi previsto un immediato riutilizzo dell'area senza successive modifiche del sito.

2.2 Inquadramento geologico locale

La zona in cui è situata la discarica si trova all'interno del Graben della Val d'Era, fossa tettonica instauratasi a partire dal Miocene superiore in seguito a movimenti di tipo distensivo (Mazzanti, 1961; Martini e Sagri, 1993).

I sedimenti più antichi che si sono depositi all'interno del graben sono di tipo lacustre; seguono sedimenti salmastri indicanti una trasgressione marina pliocenica che ha sommerso tutta la zona lasciando un'isola in corrispondenza di Casciana Terme.

I sedimenti del Pliocene superiore indicano una regressione del mare che si ritira definitivamente nel Quaternario antico; seguono depositi di tipo continentale sempre più recenti fino alle alluvioni attuali.

La giacitura delle formazioni è disposta in monoclinale immergente verso la zona più depressa del bacino. Di seguito è riportata la descrizione delle formazioni affioranti nell'area in esame:

- Argille azzurre e cinerine di facies marina (Pliocene inferiore medio).
- Sabbie argillose marine e salmastre e limi talora con livelli torbosi (Pliocene inferiore medio).
- Sabbie a Flabellipecten di facies marina talora con livelli di Cerastoderma di facies salmastra (Pliocene inferiore medio).

In particolare la formazione delle argille azzurre e cinerine presenta delle caratteristiche litologiche uniformi, essendo costituita quasi essenzialmente da argille di colore grigio cenere ed azzurro cinerino, talora leggermente limose e sabbiose, sovraconsolidate, facilmente plasticizzabili: queste, quando non raggiunte dall'ossidazione superficiale, si presentano bianco-grigie nelle frazioni più marnose e bianco-gialle in quelle più sabbiose quando alterate.

Un rilevamento geologico di dettaglio della zona dell'impianto ha evidenziato una buona omogeneità del litotipo affiorante che risulta essenzialmente costituito da argilla con limo, senza intercalazioni con livelli sabbiosi o calcarei (Meoni e Timpanidis, 1993).

3. ACQUISIZIONE E TRATTAMENTO DEL DATO

3.1 Misure di flusso

Le misure di flusso sono state eseguite con il metodo della camera di accumulo, utilizzato nelle scienze agrarie per misurare il flusso di CO₂ dal suolo e quindi il tasso di respirazione fin dagli inizi degli anni 70 (Witkamp, 1969; Kucera and Kirkham, 1971; Kanemasu *et al.*, 1974; Parkinson, 1981). Questo metodo permette di misurare l'incremento di concentrazione di una data specie gassosa all'interno di una camera chiusa eccetto che sul lato a contatto della superficie del suolo. Negli anni 90 la camera di accumulo è stata utilizzata per misurare flussi di N₂O (Kizing and Socolow, 1994), per valutare l'output totale di CO₂ diffuso da aree geotermiche e vulcaniche (Tonani and Miele, 1991; Chiodini *et al.*, 1996; Chiodini *et al.*, 1998) e, nella versione non stazionaria, anche per valutare l'emissione diffusa su discariche (Cossu *et al.*, 1997).

Il biogas è in realtà un miscuglio di gas i cui componenti principali sono CH₄ e CO₂. Per quantificare il flusso totale di biogas occorre quindi determinare i flussi di entrambi i gas oppure misurare il flusso di uno dei due e ricavare quello dell'altro utilizzando i loro rapporti molari (Cioni *et al.*, 2002; Cioni *et al.*, 2003; Capaccioni *et al.*, 2005). Naturalmente se si misura il CO₂ e si valuta il flusso globale di biogas dal rapporto CH₄/CO₂ occorre considerare l'emissione naturale di CO₂ che può provenire dall'attività microbica e radicale sempre presente nella parte più superficiale della copertura (Czepiel *et al.*, 1996).

Il metodo statico della camera di accumulo è stato scelto rispetto ad altri (Trégourès *et al.*, 1999) tenendo conto delle seguenti considerazioni:

- è in grado di fornire misure di flusso dai suoli a prescindere dalla conoscenza delle caratteristiche dei suoli stessi e dalla conoscenza del regime di flusso stesso. Pertanto, essa non richiede alcun coefficiente empirico (che tenga conto delle caratteristiche del suolo) per trasformare il gradiente di concentrazione misurato in flusso (Tonani e Miele, 1991);
- è molto più veloce di tutti gli altri metodi;
- la strumentazione risulta maneggevole e di facile utilizzo.

La strumentazione impiegata è stata messa a punto da IGG-CNR di Pisa, DST Università di Perugia e West Systems ed è attualmente commercializzata dalla West Systems srl. Essa è stata ampiamente descritta e utilizzata in ambito vulcanologico (Chiodini *et al.*, 1996, 1998). L'attrezzatura specifica utilizzata in questo lavoro è costituita da 4 parti principali (Fig. 2):

1. una camera alta 10 cm con una superficie di base di 560 cm²;
2. due strumenti IR non dispersivi;
3. un convertitore analogico-digitale;
4. un computer palmare.

Lo strumento, di fatto, misura continuamente la concentrazione di CO₂ e di CH₄ all'interno di un recipiente (camera di accumulo) posto sul terreno, curando la perfetta adesione del bordo sul suolo. La camera è equipaggiata con una ventola per omogeneizzare i gas all'interno della stessa.

Una piccola pompa a membrana provvede ad aspirare i gas dall'interno della camera: il gas viene fatto passare attraverso una piccola colonna contenente perclorato di magnesio

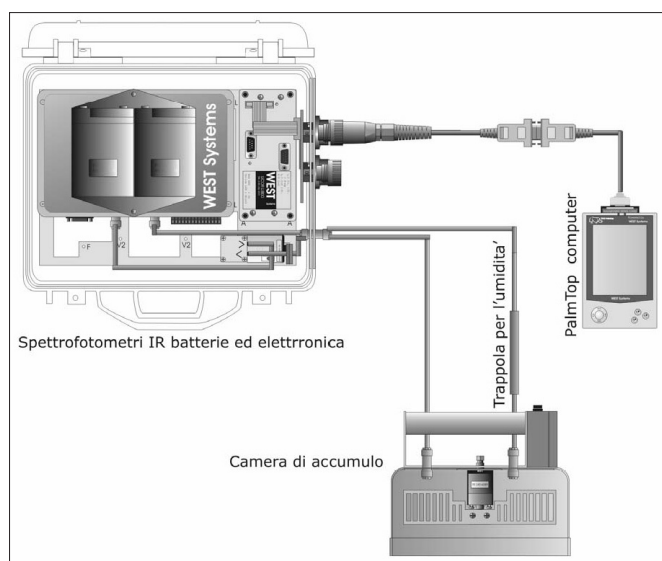


Fig. 2 – Fluxmeter per CO_2 e CH_4 (da www.westsystems.com)

(per eliminare l'umidità) e successivamente inviato alle celle degli spettrofotometri per poi essere di nuovo convogliato nella camera di accumulo.

I valori di concentrazione misurati dagli spettrofotometri sono acquisiti dal convertitore analogico – digitale dotato di interfaccia seriale e quindi inviati al computer che crea una rappresentazione grafica della concentrazione di CO_2 (e CH_4) in funzione del tempo. Il software permette di calcolare, direttamente sul terreno il valore della derivata della funzione nel suo tratto iniziale, cioè il flusso.

Le leggi fisiche che stanno alla base del trasporto di materia mostrano chiaramente che le variazioni di pressione atmosferica, temperatura del suolo e dell'aria, velocità del vento e umidità del suolo possono determinare importanti variazioni di flusso. Se il flusso è di tipo advettivo, ritenendo valida la legge di Darcy, una variazione di pressione atmosferica determina un cambiamento del gradiente di pressione. È quindi lecito attendersi un aumento di flusso quando la pressione atmosferica diminuisce. L'umidità del suolo modifica la permeabilità/porosità del terreno, per cui è ragionevole attendersi variazioni di flusso indotte non solo dalle precipitazioni che producono comunque un certo carico idraulico, ma anche da variazioni di temperatura e/o umidità atmosferica che provocano processi di condensazione/evaporazione. Infine anche elevate velocità del vento possono influenzare le misure di flusso per effetto venturi.

Inoltre, nell'ambito di questo lavoro, si è cercato di minimizzare ulteriormente l'influenza delle condizioni atmosferiche come la pioggia, l'umidità del suolo e dell'aria lavorando in condizioni di tempo stabile e secco. Ciò ha permesso di poter effettuare la correzione per la temperatura dell'aria, mentre non è stato necessario apportare correzioni per la variazione della pressione atmosferica, in quanto essa si è mantenuta pressoché costante nei giorni in cui sono state eseguite le campagne di misura, sia nel maggio 2004 sia nel gennaio 2005.

Quanto sopra è stato ampiamente sperimentato sia per ciò che concerne le misure di concentrazione sia per quelle di flusso (Hinkle and Ryder, 1987; 1988; Hinkle, 1994; King and Minissale, 1994; Pinoult and Baubron, 1996).

La metodologia della camera di accumulo è risultata meno dipendente dalle condizioni atmosferiche rispetto ad altre quali "airborne infrared thermometry", "trace gas", "micro-meteorological", "mass balance2", "Eddy correlation", come alcuni autori (Trégourès *et al.*, 1999) hanno dimostrato confrontando sette diversi metodi per la misura del flusso.

3.2 Carte di isoflusso

La possibilità di disporre di una metodologia che permetta di visualizzare l'andamento di un qualsiasi parametro chimico-fisico su tutta un'area di studio è di notevole sostegno nell'interpretazione e nella correlazione di tutto l'insieme dei dati. In effetti, avere a disposizione una mappa con delle isolinee dei flussi di CO_2 e/o di CH_4 , permette di mostrare, in maniera chiara, la presenza di zone ad elevata permeabilità verticale.

Quando si traccia una linea di isoflusso, di fatto si effettua un'interpolazione di punti sperimentali. Se ciò viene svolto manualmente esiste una parte di interpretazione che è funzione della densità dei dati e del grado di regolarità delle variabili considerate; per questo, le linee tracciate dipendono soggettivamente dall'esperienza acquisita dall'operatore. Se si dispone di pochi dati, si può comunque cercare di dare un'interpretazione quando lavoriamo con strutture ben conosciute. Se invece vogliamo adottare una metodologia oggettivamente riproducibile che tracci le linee di livello, dobbiamo tenere conto delle caratteristiche strutturali del parametro che è stato misurato (Chilés e Chauvet, 1973). Un metodo cartografico infatti, non può creare informazioni, ma deve utilizzare al meglio ed in modo valutabile quelle esistenti.

Infine, occorre sottolineare che non basta tracciare una carta, è importante anche sapere quale confidenza accordarle. Questo è particolarmente importante quando si dispone di dati mal ripartiti; in questo caso, quando si tenta d'interpretare la carta non sappiamo se le informazioni in un certo punto sono vere o se sono state create dalla mancanza di dati. Questo tipo di problema s'incontra spesso sul bordo della carta, quando si deve estrapolare (e non più interpolare): in questi casi bisogna disporre di un parametro che caratterizza l'errore che si commette sostituendo il valore reale sconosciuto con un valore stimato.

I problemi di stima e di tracciamento delle curve di iso-valori esistono da lungo tempo, anche se sono noti diversi metodi che cercano di risolverli. Tuttavia i metodi comunemente usati non analizzano come il valore del parametro sia realmente influenzato dalla sua posizione spaziale e dalla sua relazione con i punti vicini, ma dando per scontato che la grandezza considerata sia una variabile continua delle coordinate spaziali, utilizzano algoritmi di interpolazione di tipo diverso. Tutti questi metodi sono accomunati dalla mancanza di un criterio oggettivo per valutare la "qualità" della mappa, per cui essi non possono quantificare la precisione della stima.

Il metodo che supera questa difficoltà è il kriging, elaborato da George Matheron agli inizi degli anni sessanta (Matheron, 1962; 1965; 1969; 1970) su un'idea di Krige (1951), ampiamente sviluppato dai ricercatori del centro di geostatistica dell'Ecole

des Mines di Fontainebleau (Chauvet, 1982; Chauvet, 1991; Chauvet, 1993; Chauvet e Galli, 1982, Armstrong, 1984a; Armstrong 1984b; Wackernagel, 1995), e presentato da molti autori (Clark, 1979; David, 1977; Davis, 1986). Tale metodologia geostatistica permette, non solo di stimare il valore del parametro studiato in un punto dove non è possibile la sua misura, ma anche di dare l'errore di tale stima. Introducendo il concetto di variabile regionalizzata (cioè una funzione $f(x)$ definita nello spazio e dotata di continuità spaziale), questa metodologia permette altresì di studiare, da un punto di vista prettamente matematico, le correlazioni spaziali di una distribuzione di punti. In estrema sintesi, il metodo del kriging richiede la costruzione del semivariogramma sperimentale, la valutazione del modello matematico che meglio interpreta i dati del semivariogramma e prevede la definizione del miglior intorno da considerare per il processo d'interpolazione. Il metodo del kriging assicura che il valore interpolato non sia affetto da errore rispetto al valor medio e che sia a varianza minima. Le carte di isoflusso presentate in questo lavoro sono state ottenute processando i dati con il programma ISATIS, (Geovariances) sviluppato dalla scuola di Fontainebleau, che

utilizza il metodo del kriging per estrapolare i valori dove non sono state eseguite le misure. Questa scelta è essenzialmente giustificata dalla peculiarità di questo programma, specificatamente sviluppato per la prospezione geochimica: ad esempio, interpretando alla lettera il kriging, fa corrispondere la misura reale al punto campionato a differenza di altri programmi di largo uso che riportano solo i risultati dell'interpolazione.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1 Misure di flusso di CO_2 e CH_4

Le due campagne di misura dei flussi di CO_2 e di CH_4 dal suolo sono state eseguite nel maggio 2004 e nel gennaio 2005. Durante la campagna del maggio 2004 sono state eseguite 109 misure del flusso di CO_2 e CH_4 seguendo una maglia più regolare possibile delle dimensioni 30m x 30m, infittita direttamente sul campo in corrispondenza di zone ad elevati flussi; l'area coperta è risultata di circa 68000 m². L'ubicazione dei 109 punti di misura è riportata in Fig. 3.



Fig. 3 – Ubicazione delle misure di flusso di CO_2 e CH_4 relative alla campagna di maggio 2004

Nella seconda campagna di misure, eseguita nel gennaio 2005, sono state eseguite 155 misure del flusso di CO₂ e CH₄ ancora su una maglia di dimensioni 30m x 30m, coprendo una superficie di circa 130000 m². L'ubicazione dei punti di misura (161) è riportata in Fig. 4. Sei di essi, situati tra casing e perforo, sono stati scartati in quanto considerati non rappresentativi del flusso diffuso dal suolo.

I parametri statistici relativi alle misure eseguite nel maggio 2004 e nel gennaio 2005 sono riportati in Tab. 1.

Dall'analisi della Tab. 1 si nota come i valori massimi misurati nella seconda campagna siano più bassi rispetto a quelli ottenuti nella campagna di misure eseguita a maggio 2004 e la stessa osservazione può essere fatta per i valori della varianza. Quest'ultimo parametro risulta particolarmente interessante dato che fornisce un'idea della dispersione del set di misure in esame: in questo caso il suo abbassamento è probabilmente correlabile con l'incremento di circa il 50% della superficie misurata. Ciò permette di minimizzare l'incidenza di marcati gradienti locali.

Infine, gli istogrammi del logaritmo naturale del flusso di CO₂ e di CH₄ (Fig. 5) mostrano chiaramente per entrambe le specie gassose una distribuzione lognormale polimodale.

4.2 Mappa di isoflusso del Maggio 2004

Il miglior modello costruito con il metodo del "trial and error", che riproduce la forma del semivariogramma sperimentale riportato in Fig. 6 è quello sferico con effetto "nugget", i cui parametri sono stati determinati seguendo i metodi descritti da Clark (1979): raggio d'influenza di circa 50 m, sill 230. Nel modello è presente l'effetto "nugget", in altre parole il semivariogramma non passa per l'origine ("sill" \cong 70). Ricordiamo che la presenza di tale effetto indica che la variabile cambia fortemente il proprio valore su una distanza minore del passo di campionamento (Clark, 1979).

Considerando le informazioni ottenute dal semivariogramma sperimentale è stata costruita la mappa di Fig. 7. Tale mappa evidenzia sei zone caratterizzate da flussi anomalmente elevati. In particolare, tenendo conto di quanto osservato in campagna, si possono fare le seguenti considerazioni caso per caso:

– le zone 1 e 2 risultano caratterizzate da alti flussi di biogas con CO₂ come componente dominante;



Fig. 4 – Ubicazione delle misure di flusso di CO₂ e CH₄ relative alla campagna di gennaio 2005

- nella zona 3 sono stati misurati i flussi più alti, ma bisogna tener presente che al momento della campagna di monitoraggio questa zona era sprovvista di copertura (lotto in coltivazione);
- nelle zone 4 e 5 l'ispezione del terreno ha rilevato la presenza di piccole fratture superficiali. Inoltre in questa area non è ancora presente una copertura definitiva;
- la zona 6 è situata al limite superiore della scarpata, al confine con la strada: il sensibile flusso di CO₂ di questa zona può essere messo in relazione alla rottura di pendenza causata dalla strada stessa, sulla quale circolano i mezzi pesanti.

Nel riquadro di Fig. 7 è riportata anche la mappa della deviazione standard sulla stima del flusso. La stima del valore del flusso di biogas nei punti dove non è stata eseguita la misura è affetta da un errore di ± 12.5 mol m⁻² d⁻¹ e tale dato riflette la grande variabilità spaziale delle misu-

Tab. 1 – Parametri statistici delle misure eseguite nel maggio 2004 e nel gennaio 2005 sull'intera area interessata dall'impianto di smaltimento di Legoli. Dati espressi in mol m⁻² giorno (mol m⁻² d⁻¹)

		N° misure	Media	Minimo	Massimo	Varianza	Dev.Std.
Maggio 2004	Flusso CO ₂	109	4.02	0.68	63.12	61.81	7.86
	Ln Flusso CO ₂	109	0.70	-0.38	4.14	0.97	0.98
	Flusso CH ₄	109	3.83	0.18	84.10	114.12	10.68
	Ln Flusso CH ₄	109	-0.45	-1.69	4.43	2.70	1.64
Gennaio 2005	Flusso CO ₂	155	3.87	0.68	33.74	31.10	5.58
	Ln Flusso CO ₂	155	0.64	-0.38	3.52	1.15	1.07
	Flusso CH ₄	155	3.56	0.18	35.58	37.78	6.15
	Ln Flusso CH ₄	155	0.32	-1.69	3.57	1.83	1.35

re di flusso. Inoltre, dato il valore relativamente alto della deviazione standard, si ha che le zone caratterizzate da alto flusso precedentemente elencate sono significativamente diverse da quelle dove è stato misurato un basso flusso.

Nel maggio 2004 sono state effettuate alcune riprese della discarica, utilizzando un radiometro IR della Inframetrics Thermacam, modello PM295; si tratta di una apparecchiatura basata su di una matrice di microbolometri con risoluzione geometrica di 320x240 pixel e memorizzazione delle scene radiometricamente calibrate su PCMCIA FLASH. La macchina opera nella gamma spettrale tra gli 8 ed i 12 μm , l'esemplare impiegato è dotato di ottica con 25° di HFOV ed ha una risoluzione radiometrica pari a 14 bit. Pertanto, almeno per i dati di flusso di biogas relativi al maggio 2004 è stato possibile il confronto tra la mappa di isoflusso ed un'immagine termografica. La mappa termografica è stata ottenuta dall'unione di più scene riprese da un colle antistante la discarica (Fig. 8), previa compensazione delle deformazioni introdotte dall'ottica.

È ragionevole supporre che un'anomalia termica positiva sia associata ad una maggiore attività di produzione di biogas in una data zona del corpo discarica. Dato però che all'anomalia termica positiva osservata non necessariamente corrisponde un maggior flusso di gas all'interfaccia con l'atmosfera, si deve più correttamente parlare di "potenzialità" a rilasciare biogas verso l'atmosfera.

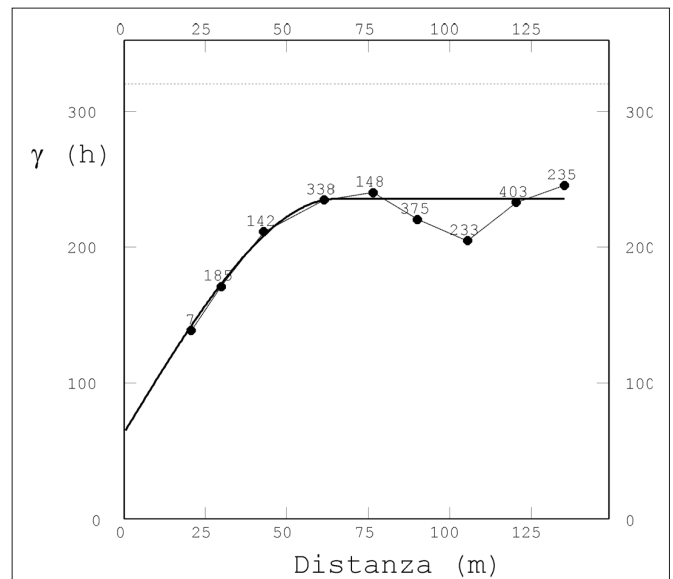


Fig. 6 – La linea tratteggiata rappresenta il semivariogramma sperimentale omnidirezionale relativo alle misure del maggio 2004. I numeri rappresentano le coppie utilizzate per determinare il valore del semivariogramma sperimentale per ogni Lag, infine la linea continua rappresenta il miglior modello matematico

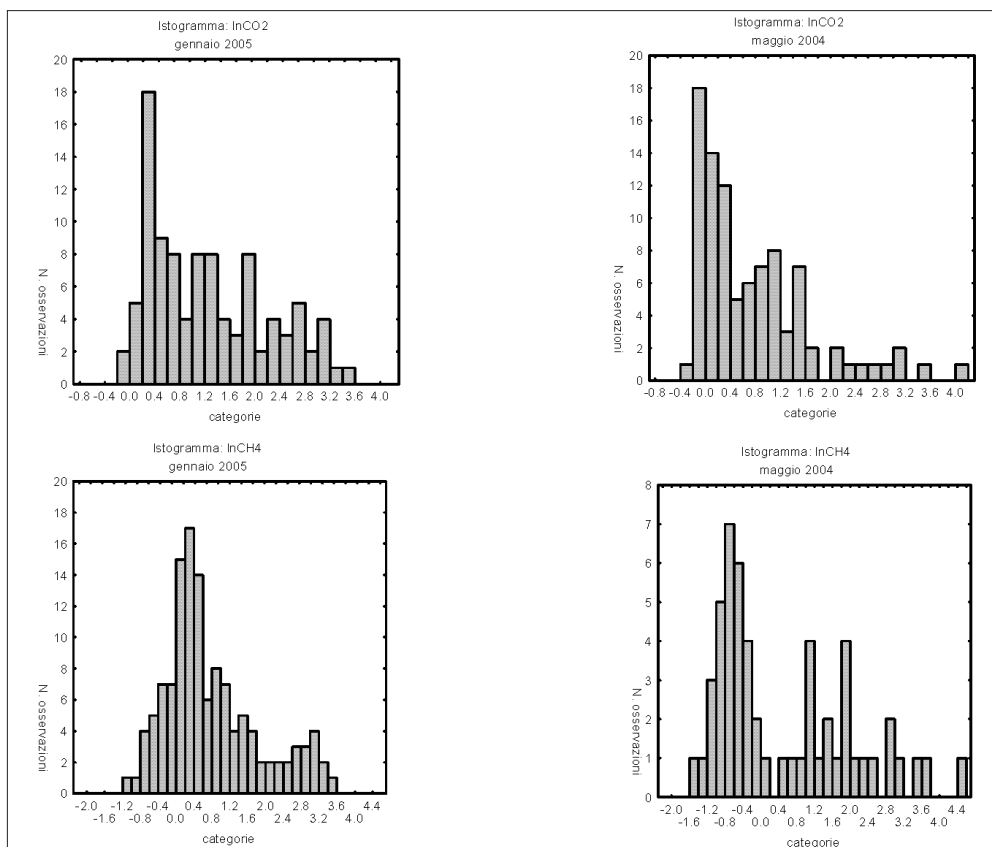


Fig. 5 – Istogrammi del logaritmo naturale del flusso di CO_2 e di CH_4

La qualità dei sistemi di copertura e captazione e la presenza di fratture indotte determina l'eventuale rispondenza tra tale attitudine al rilascio superficiale di gas ed il suo effettivo verificarsi. Si possono cioè realizzare casi di alto flusso di gas e bassa temperatura superficiale laddove si ha una insufficiente captazione, come anche di elevata anomalia termica superficiale senza riscontro nella misura di flusso, laddove invece il sistema di copertura e captazione è efficiente.

Nel caso in questione, l'indagine termografica ha evidenziato tre zone anomale indicate nella mappa di Fig. 8 con i numeri 1-2, 3 e 6.

Le zone con alti valori di flusso (come quelle indicate dai numeri 4 e 5, nella Fig. 7) non evidenziate dalle immagini termografiche sono dovute alla presenza, confermata da un'ispezione sul posto, di emissioni concentrate lungo le numerose fratture presenti su un terreno non compatto. Tali caratteristiche sono pressoché uniche rispetto a tutto il resto della discarica, almeno fino al periodo di osservazione di questo studio. Queste zone, seppure non caratterizzate da una maggiore attitudine a rilasciare biogas rispetto al resto del corpo discarica, stando alle immagini termografiche soffrono probabilmente degli effetti della scarsa efficienza della copertura; in casi come questo è del tutto ragionevole che si abbia un flusso superficiale di gas relativamente elevato, senza una cor-

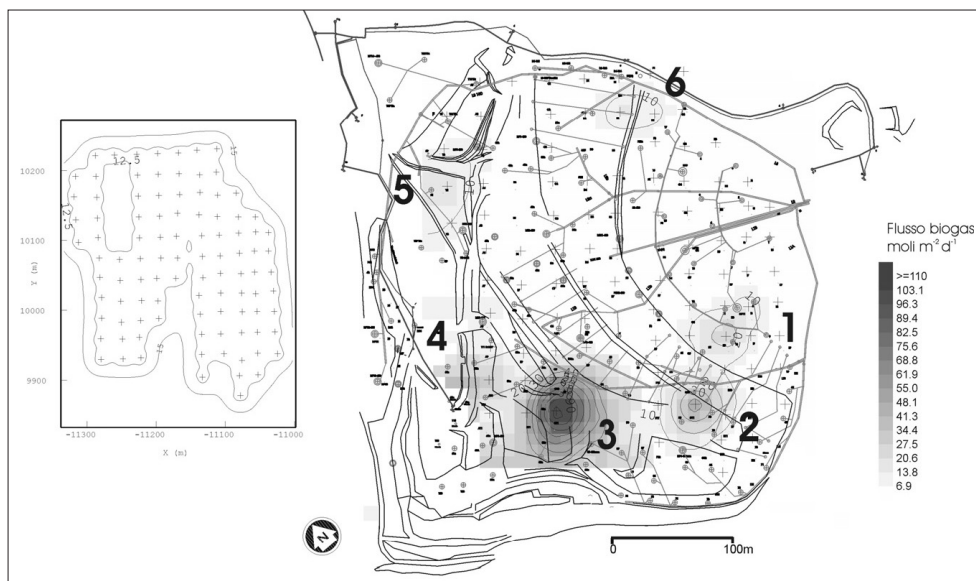


Fig. 7 – Mappa di isoflusso di biogas relativa alle misure del maggio 2004

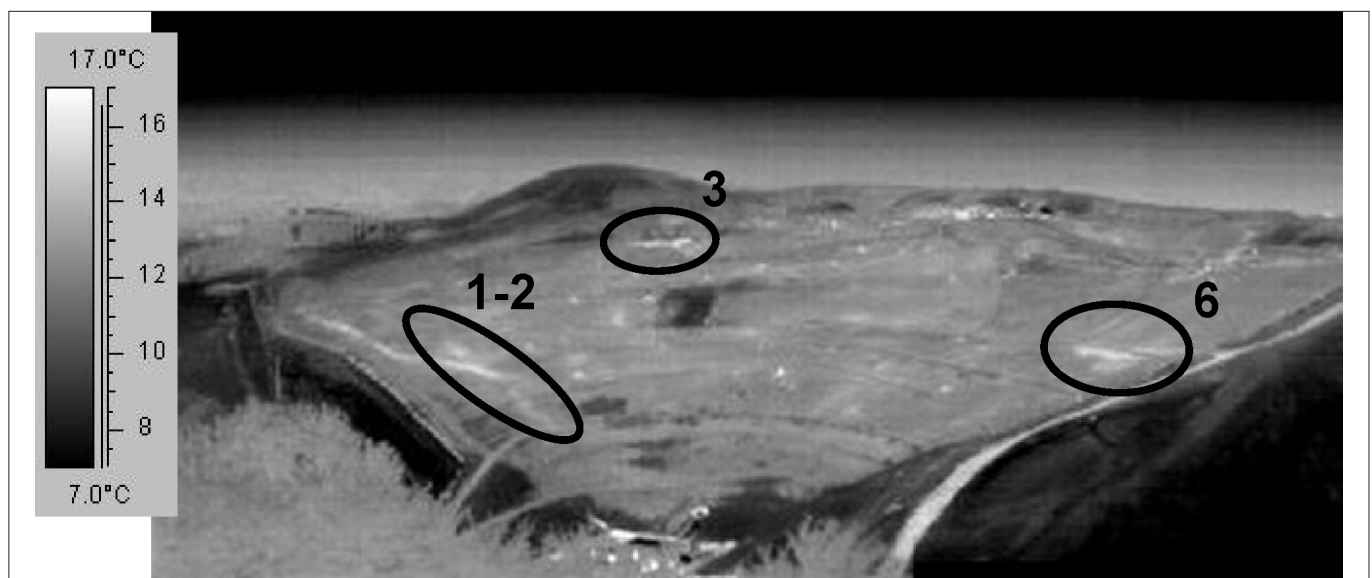


Fig. 8 – Mappa termografica della discarica di Legoli (maggio 2004, vista dal colle antistante)

rispondente anomalia termica superficiale. Come regola generale, l'anomalia termica è legata alla presenza del gas nel corpo della discarica, ma non al suo eventuale rilascio locale in atmosfera.

4.3 Mappa di isoflusso del Gennaio 2005

Elaborando le misure eseguite nel gennaio 2005 è stato ottenuto il semivariogramma di Fig. 9 e la mappa di isoflusso riportata in Fig. 10.

Come modello matematico rappresentativo del semivariogramma è risultato migliore ancora quello sferico con raggio d'influenza di circa 50 m, ed effetto nugget.

Dall'analisi della mappa di isoflusso riportata in Fig. 10, oltre a piccole zone caratterizzate da alti flussi e ubicate in prossimità dei pozzi di captazione, si notano tre aree aventi anch'esse elevati valori del flusso:

- La zona indicata con la lettera X corrisponde alla zona 5 individuata durante la campagna di maggio (vedi Fig. 7 per confronto) e si trova nei pressi della scalinata dove non è stata ancora messa in posto la copertura impermeabile definitiva.
- Le zone Y e Z si trovano in un'area dove non è ancora presente la copertura impermeabile definitiva. Questa area infatti si trova a ridosso della zona coperta da rifiuti freschi e pertanto ancora in coltivazione.

In Fig. 10 è riportata anche la mappa della deviazione standard e dall'elaborazione dei dati effettuata attraverso la metodologia del kriging, risulta che l'errore sulla stima del flusso di biogas nei punti dove non è stata eseguita la misura è pari a $\pm 8 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

4.4 Stima del flusso di biogas diffuso

Le mappe di isoflusso sono state ottenute utilizzando il metodo del kriging, tuttavia la stima globale di biogas

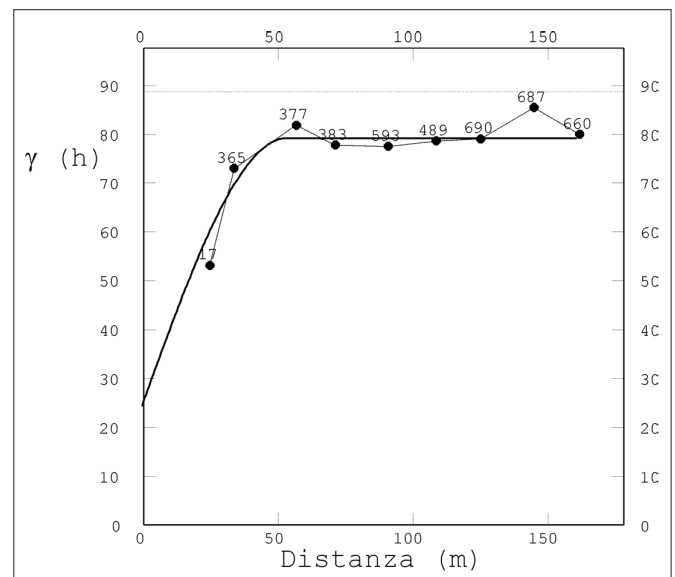


Fig. 9 – Semivariogramma sperimentale omnidirezionale relativo alle misure del gennaio 2005 e relativo modello matematico

emesso dal corpo della discarica non può essere fatta utilizzando questa tecnica essenzialmente per due motivi (Journel and Huijbregts, 1978):

- generalmente non è possibile assumere la stazionarietà o una singola media di forma conosciuta sull'intera area di studio. Ciò è valido solo per un limitato intorno (*local quasi-stationarity*);
- anche nel caso in cui fosse verificata la stazionarietà sull'intera area di studio di solito ci sono troppi dati per costruire e quindi risolvere la matrice di calcolo del kriging. Inoltre la

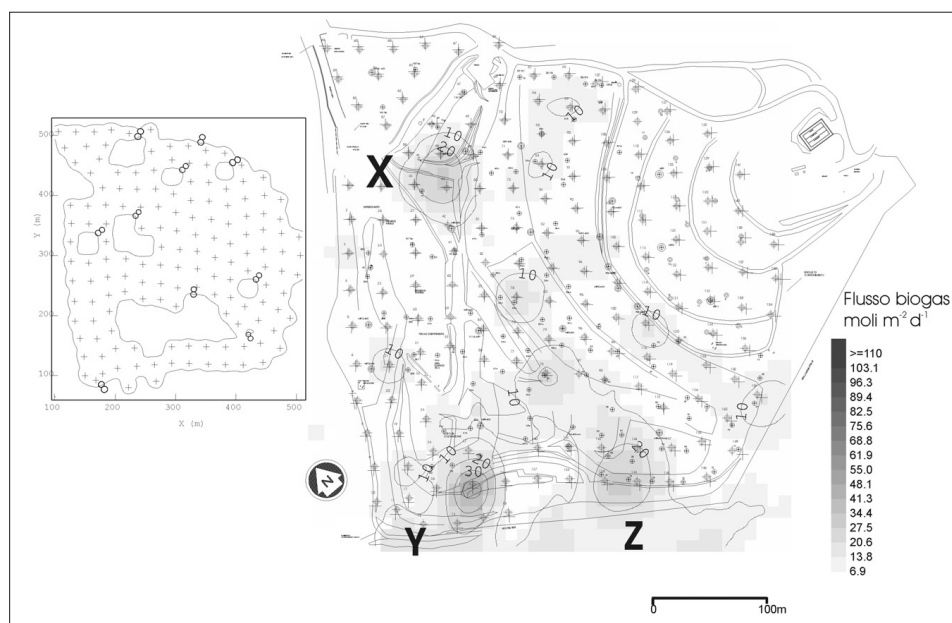


Fig. 10 – Mappa di isoflusso di biogas relativa alle misure del gennaio 2005

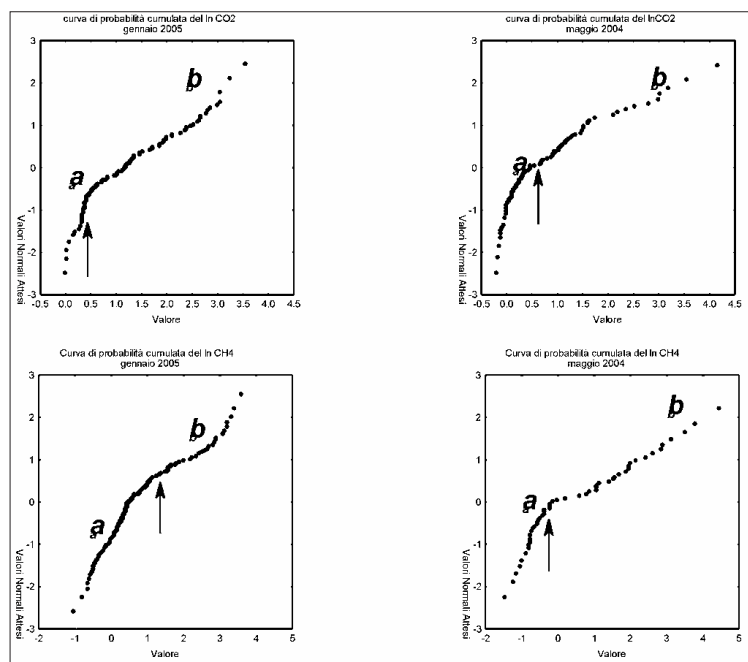


Fig. 11 – Curve di probabilità logaritmica cumulata per ln flusso CO_2 e per ln flusso CH_4

costruzione di questa matrice implicherebbe che il semivariogramma sia conosciuto su una distanza h pari alle dimensioni dell'area di studio, mentre è noto che l'affidabilità del semi-variogramma sperimentale è limitata ad una distanza pari a metà delle dimensioni dell'area investigata.

Per questi motivi, a differenza dell'approccio riportato in Capaccioni *et al.* (2005), per stimare il flusso totale del biogas diffuso dal suolo è stata utilizzata la procedura descritta da Sinclair (1974; 1991) e l'estimatore di Sichel (Sichel, 1966). Tale metodologia, utilizzata in varie occasioni anche da Chiodini *et al.* (1998), prevede il riconoscimento delle diverse popolazioni di dati presenti nel set di misure attraverso la costruzione delle curve di probabilità cumulata. Poiché abbiamo a che fare con distribuzioni lognormali, si ha la necessità di trovare la media dei valori non logaritmici. Per questo scopo, si utilizzano le tabelle di Sichel e l'estimatore t (Sichel, 1966). Infine, sempre attraverso le stesse tabelle di Sichel, si stima l'intervallo di confidenza al 95%.

Le curve di probabilità cumulata relativa al logaritmo naturale del flusso di CO_2 dal suolo (Fig. 11) mostrano, in entrambe le campagne di misura, una distribuzione polimodale che consiste nella combinazione di 2 popolazioni (*a* e *b*). La stessa cosa si può asserire per le curve di probabilità cumulata relative al logaritmo naturale del flusso di CH_4 . Per tutte le curve non sono stati considerati i valori nulli.

Le caratteristiche statistiche delle popolazioni riconosciute sulla base delle curve di probabilità cumulata sono riportate in Tab. 2. Una volta individuate le caratteristiche delle varie famiglie, sono stati utilizzati i coefficienti di Sichel per calcolare, per ogni popolazione, la media e la propria deviazione standard. Relativamente alle misure eseguite a maggio si ha:

- un flusso totale di CO_2 di 7959 $Kg\ d^{-1}$ pari a 169 $N\ m^3\ h^{-1}$ (i limiti superiore ed inferiore di tale stima al 95% di confidenza, sono rispettivamente 223 e 140 $N\ m^3\ h^{-1}$ di CO_2);
- un flusso totale di CH_4 di 2537 $Kg\ d^{-1}$ di CH_4 pari a 148 $N\ m^3\ h^{-1}$ per l'intera zona. I limiti superiore ed inferiore di tale stima (al 95% di confidenza) sono rispettivamente 268 e 103 $N\ m^3\ h^{-1}$ di CH_4 .

Per la campagna di gennaio 2005:

- un flusso emesso dall'intera zona studiata di circa 16500 $Kg\ d^{-1}$ di CO_2 pari a circa 350 $N\ m^3\ h^{-1}$. I limiti superiore ed inferiore di tale stima (al 95% di confidenza) sono 441 e 294 $N\ m^3\ h^{-1}$ di CO_2 ;
- un flusso di CH_4 di circa 4500 $Kg\ d^{-1}$ di CH_4 pari a 265 $N\ m^3\ h^{-1}$. I limiti superiore ed inferiore di tale stima (al 95% di confidenza) sono rispettivamente 350 e 216 $N\ m^3\ h^{-1}$ di CH_4 .

I valori ottenuti a gennaio risultano molto più elevati, ma bisogna tener conto del fatto che essi si riferiscono all'intera superficie occupata dall'impianto di smaltimento, cioè circa 130000 m^2 . Al contrario, le misure eseguite nel maggio 2004 si riferiscono ad una superficie più piccola (circa 68000 m^2): per ragioni logistiche (lavori di impermeabilizzazione) non è stato possibile effettuare le misure del flusso di biogas sull'intera area della discarica. Una volta normalizzati i dati alla stessa superficie, i flussi misurati nelle due campagne rientrano nell'intervallo di confidenza.

I valori ottenuti da questa elaborazione statistica (Tab. 3) rappresentano il flusso di gas serra (CH_4+CO_2) che raggiunge l'atmosfera e cioè circa 317 (243÷491) $N\ m^3\ h^{-1}$ a maggio 2004 e circa 615 (510÷791) $N\ m^3\ h^{-1}$ a gennaio 2005.

Tab. 2 – Caratteristiche statistiche delle famiglie individuate

		% sul totale	Media	Media+σ	Media-σ	Flusso Kg d ⁻¹	Limiti al 95% di confidenza	
Maggio 2004	Ln Flusso CO ₂							
	a	53.76	0.10	0.30	-0.10	1634	1726	1563
	b	46.24	1.31	2.13	0.49	6325	8777	5034
						7959	10503	6597
	Ln Flusso CH ₄							
	a	54.55	-0.70	-0.35	-1.06	159	186	142
b	45.45	1.67	2.72	0.62	2378	4419	1620	
					2537	4605	1763	
Gennaio 2005	Ln Flusso CO ₂							
	a	25.25	0.25	0.42	0.09	1117	1200	1060
	b	74.75	1.44	2.31	0.57	15406	19605	12789
						16523	20805	13849
	Ln Flusso CH ₄							
	a	48.41	-0.04	0.36	-0.44	615	683	565
b	51.59	1.34	2.32	0.35	3932	5323	3131	
					4547	6006	3696	

4.5 Stima del biogas non captato e taratura del modello di produzione

4.5.1 Il rapporto molare CH₄/CO₂

Per misurare il rapporto CH₄/CO₂ e caratterizzare chimicamente il biogas, sono stati campionati ed analizzati i gas di 8 linee di captazione del biogas, il gas di due pozzi ed i gas del suolo campionato in diversi punti della discarica ad una profondità di circa 25 cm (9 campioni). Sui campioni di gas raccolti sono state determinate, per via gas-cromatografica, le concentrazioni di CO₂, CH₄, N₂, O₂ e H₂S. Nella Tab. 4 sono mostrati i risultati analitici e i rapporti molari CH₄/CO₂.

Come atteso, i risultati delle analisi chimiche hanno mostrato che nei gas del suolo campionati nelle zone caratterizzate da recente copertura definitiva, il valore del rapporto CH₄/CO₂ è basso (campioni E2, F10 e D8). Al contrario, tale rapporto assume valori elevati (simili comunque a quelli osservati nei pozzi) nei gas campionati in zone caratterizzate da copertura impermeabile non definitiva (campioni Z1, D3 e E4).

Il rapporto molare medio CH₄/CO₂ mostra, comunque, una elevata variabilità:

1. per i pozzi e le linee di captazione varia tra 1.1 e 1.5 con un valore medio di 1.3 e una deviazione standard di 0.12;
2. nelle misure di flusso eseguite in superficie varia tra un minimo di 0.22 e un massimo di 3.05, con un valore medio di 0.86 e una deviazione standard di 0.53.

Per una migliore comprensione della variabilità del rapporto CH₄/CO₂ sull'intero corpo della discarica sono state prese in considerazione le analisi dei componenti maggiori (CH₄, CO₂ e O₂) di 131 campioni di biogas messe a disposizione dalla

Tab. 3 – Quantità di biogas emessa in maniera diffusa dal suolo della discarica di Legoli (Peccioli)

	Flusso N m ³ h ⁻¹	Limiti al 95% di confidenza	
		Superiore	Inferiore
Flusso CO ₂			
Maggio 2004	169	223	140
Gennaio 2005	350	441	294
Flusso CH ₄			
Maggio 2004	148	268	103
Gennaio 2005	265	350	216
TOTALE			
Maggio 2004	317	491	243
Gennaio 2005	615	791	510

società di gestione della discarica, la Belvedere SpA. Il rapporto molare medio CH₄/CO₂ varia tra un minimo di 0.14 e un massimo di 1.7 con un valore medio di 1.18 e una deviazione standard di 0.24. Nelle Figg. 12a e 12b sono rappresentati, per un confronto statistico della distribuzione delle 2 serie di misure, gli istogrammi relativi al rapporto CH₄/CO₂ nel gas dei pozzi e quello relativo al gas emesso dal suolo. Il valore medio rappresentativo del rapporto CH₄/CO₂, calcolato su tutti i campioni con contenuto di ossigeno minore del 10% (131), risulta essere 1.2. Questo valore è stato scelto come valore rappresentativo del rapporto CH₄/CO₂ profondo.

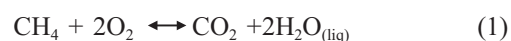
Tab. 4 – Dati analitici relativi ai gas campionati a maggio 2004

	#	CO ₂ Vol %	CH ₄ Vol %	O ₂ +Ar Vol %	N ₂ Vol %	H ₂ S ppm	CH ₄ /CO ₂
Maggio 2004							
Legoli linee							
	VA1	36.8	47.0	3.3	12.9	83	1.27
	VA2	37.0	53.3	1.3	8.4	37	1.44
	VA3	37.1	53.7	1.3	7.9	67	1.45
	L1A	35.9	43.5	4.2	16.4	60	1.21
	L1B	39.8	54.5	1.0	4.7	42	1.37
	L1D	38.6	47.4	2.7	11.3	33	1.23
	L1E	32.0	49.1	n.a.	n.a.	42	1.53
	B1	37.9	49.2	2.2	10.7	50	1.30
Legoli pozzi							
	P26	43.5	55.5	0.1	0.9	50	1.26
	P35	30.5	35.4	4.9	29.2	n.r.	1.16
Suolo							
	65	7.6	n.r.	20.1	72.3	n.r.	
	80	30.7	30.8	5.9	32.6	2	1.00
	145	23.5	25.4	8.9	42.2	n.r.	1.08
	151	18.4	n.r.	2.9	78.7	n.r.	
Copertura non definitiva							
Alto flusso	Z1	29.7	24.4	6.4	39.5	n.r.	1.17
Medio flusso	D3	28.5	33.4	4.0	34.0	n.r.	1.48
Basso flusso	E4	13.7	20.3	14.1	51.8	n.r.	0.82
Copertura definitiva nuova							
Alto flusso	E2	8.6	3.2	12.9	75.3	n.r.	0.36
Medio flusso	F10	0.2	n.r.	21.7	78.1	n.r.	
Basso flusso	D8	10.9	4.2	15.0	69.9	n.r.	0.38
Copertura definitiva vecchia							
Alto flusso	H9	21.9	26.0	7.8	44.3	n.r.	1.18
Medio flusso	F7	14.6	n.r.	7.0	78.4	n.r.	
Basso flusso	I5	1.9	n.r.	20.4	77.7	n.r.	

4.6 Processi di trasformazione del metano in CO₂ nella copertura

Il rapporto CH₄/CO₂ nel biogas all'interfaccia aria-suolo è stato ottenuto dalle contemporanee misure dei flussi e risulta significativamente diverso da quello misurato nei pozzi di captazione; presenta inoltre una notevole variabilità spaziale. Si ipotizza che tale variabilità sia dovuta all'ossidazione del metano a biossido di carbonio ad opera dei batteri che può avvenire nella parte superiore della copertura, permeata dall'ossigeno atmosferico. Alla luce di queste considerazioni, il valore del flusso di biogas stimato sommando i flussi di CO₂ e di CH₄ potrebbe essere diverso dalla differenza tra quello prodotto dal processo fermentativo e quello captato dall'impianto predisposto. In generale, il primo stadio dell'ossidazione del metano è la sua trasformazione in metanolo attraverso un enzima (metano-mono-oxigenasi; MMO); le fasi successive riguardano la trasformazione di metanolo a

formaldeide, da questa ad acido formico ed infine a CO₂. La reazione complessiva può quindi essere così scritta:



La velocità a cui il metano si ossida dipende da numerosi fattori chimico-fisici tra i quali 1) la temperatura (la temperatura ottimale è di circa 36°C), b) la concentrazione di ossigeno, c) il contenuto di carbonio organico, d) i nutrienti disponibili, e) la presenza di umidità nel suolo (Le Mer *et al.*, 2001). Seppur grossolanamente, una stima del biogas non captato può essere ottenuta moltiplicando il flusso totale di CO₂ ottenuto da misure puntuali sulla copertura della discarica per il rapporto CH₄/CO₂ misurato nei pozzi di captazione che intercettano appunto il biogas "profondo". Questa procedura però non tiene conto della possibile trasformazione del metano in CO₂ all'interno della copertura. Ne segue che utilizzando il rapporto CH₄/CO₂ suddetto si sovrastima la quantità di biogas non

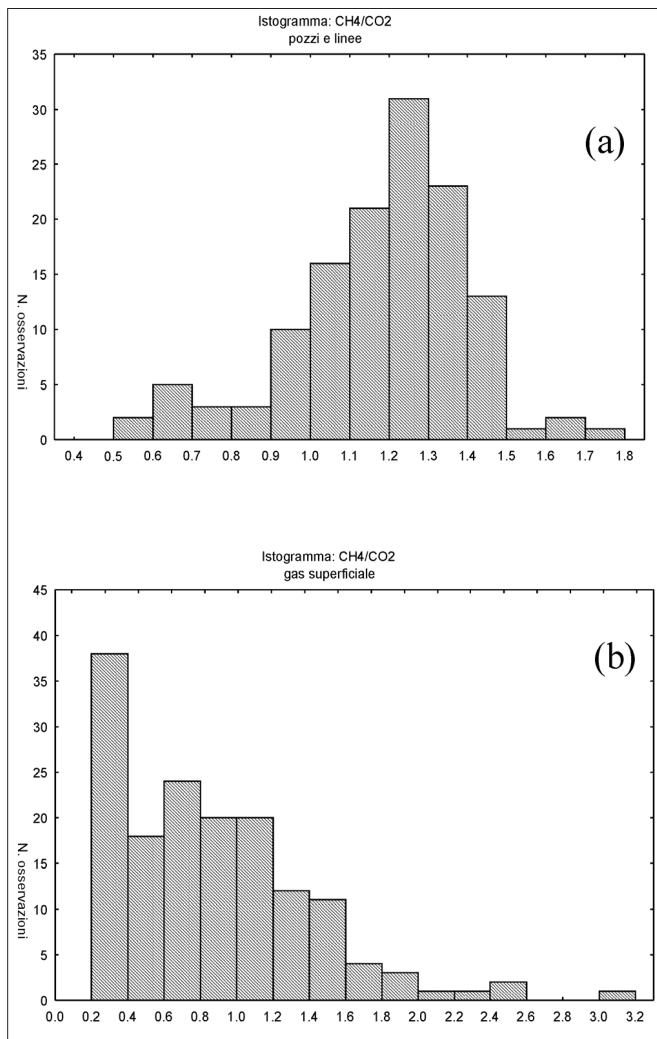
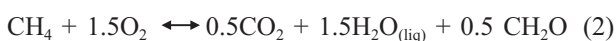


Fig. 12 – (a) Istogramma del rapporto CH₄/CO₂ calcolato per i pozzi e le linee di captazione; (b) istogramma del rapporto CH₄/CO₂ calcolato per i gas del suolo

captato. In questo caso, moltiplicando i valori di flusso di CO₂ misurato all'interfaccia aria-suolo per il valore del rapporto CH₄/CO₂ scelto (1.2), stimiamo in circa 770 (647÷970) N m³ h⁻¹ la quantità di biogas non captato (Tab. 5).

In realtà non tutto il metano si trasforma in CO₂; secondo alcuni autori, una parte non trascurabile del CH₄ si trasforma in biomassa in accordo alla seguente reazione (De Visscher *et al.*, 2003):



dove CH₂O rappresenta genericamente la biomassa formata. Si noti che in questo caso, da una mole di metano si forma mezza mole di CO₂.

Ciò suggerisce un diverso modo per stimare la quantità di biogas non captato. Tenendo conto della reazione (2) ed assumendo il CH₄/CO₂ sia quello medio misurato nei pozzi e nelle linee (1.2), si può scrivere il seguente sistema di equazioni:

Tab. 5 – Quantità massima di biogas emessa dal corpo della discarica di Peccioli e quindi non captata dall'impianto, non tenendo conto della trasformazione del metano in CO₂

	Flusso N m ³ h ⁻¹	Limiti al 95% di confidenza	
		Superiore	Inferiore
Flusso CO ₂ misurato			
Gennaio 2005	350	441	294
Flusso CH ₄ stimato			
Gennaio 2005	420	529	353
TOTALE non captato			
Gennaio 2005	770	970	647

Tab. 6 – Quantità stimata di biogas non captata dall'impianto della discarica di Peccioli, tenendo conto della trasformazione del metano in CO₂

	Flusso N m ³ h ⁻¹	Limiti al 95% di confidenza	
		Superiore	Inferiore
Flusso CO ₂ misurato			
Gennaio 2005	350	441	294
Flusso CH ₄ misurato			
Gennaio 2005	265	350	216
Flusso CO ₂ profondo			
Gennaio 2005	302	385	251
Flusso CH ₄ profondo			
Gennaio 2005	362	462	302
TOTALE non captato			
Gennaio 2005	664	847	553

$$\varphi_{\text{CO}_2, \text{m}} = \varphi_{\text{CO}_2, \text{p}} + 0.5(\varphi_{\text{CH}_4, \text{p}} - \varphi_{\text{CH}_4, \text{m}})$$

$$\varphi_{\text{CH}_4, \text{p}} / \varphi_{\text{CO}_2, \text{p}} = 1.2$$

dove: $\varphi_{\text{CO}_2, \text{m}}$ è il flusso di CO₂ misurato e $\varphi_{\text{CO}_2, \text{p}}$ è il flusso di CO₂ profondo.

Risolvendo tale sistema si ottiene:

$$\varphi_{\text{CO}_2, \text{p}} = (\varphi_{\text{CO}_2, \text{m}} + 0.5 \varphi_{\text{CH}_4, \text{m}}) / 1.6$$

La quantità di biogas non captato, calcolato in base alla precedente equazione è 664 N m³ h⁻¹ (Tab. 6).

Questo valore è leggermente più elevato rispetto a quello ottenuto elaborando le misure di flusso eseguite in superficie ($615 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, Tab. 3). Tuttavia, occorre sottolineare che ciascuna stima rientra ampiamente nell'intervallo di confidenza al 95% dell'altra.

4.7 Il modello di produzione

Per valutare la produzione di biogas dalla discarica di Legoli si è utilizzato il modello sviluppato da Andreottola e Cossu (1988). Questo modello considera la discarica come un insieme di celle, costituite da rifiuti depositati, compattati e ricoperti da uno strato di terreno. Le celle hanno un volume variabile a seconda del livello di dettaglio che si vuole raggiungere nell'applicazione modellistica. Le dimensioni minime della cella corrispondono al volume deposto giornalmente, mentre le dimensioni massime corrispondono a quelle di un intero strato di rifiuti o del quantitativo di rifiuti conferiti in un anno.

La cella può essere considerata come un reattore biologico di tipo batch, in cui gli unici elementi di input sono rappresentati dalle infiltrazioni di acque meteoriche e dagli eventuali apporti gestionali e gli output dalla produzione di percolato. Tale reattore è rappresentato da tre fasi: solida, liquida e gassosa. La fase solida è costituita dai rifiuti solidi; la fase liquida dall'umidità dei rifiuti e dagli apporti esterni; la fase gassosa dal volume dei vuoti della massa di rifiuti.

Dal punto di vista biologico la fase solida costituisce il substrato per l'eterogenea popolazione di microrganismi che vivono nella fase liquida. Questi, in seguito al metabolismo dei composti biodegradabili presenti nei rifiuti solidi e trasferiti per via chimica o enzimatica alla fase liquida, generano dei prodotti gassosi (principalmente metano e biossido di carbonio) al termine della catena metabolica.

Alla luce di tali considerazioni e per una corretta modellazione del processo di metanogenesi, il modello tiene conto dei seguenti aspetti:

- eterogeneità delle fasi presenti, in particolar modo della fase solida e liquida, nonché dei meccanismi di idrolisi del substrato, ossia del suo trasferimento dalla fase solida a quella liquida;
- eterogeneità dei substrati presenti, classificati in frazione organica rapidamente, mediamente e lentamente biodegradabile.

Il modello matematico di calcolo è stato suddiviso quindi in due sottomodelli:

- stechiometrico;
- biochimico.

Essi tengono conto dell'eterogeneità delle fasi, delle caratteristiche chimico-fisiche dei rifiuti (modello stechiometrico) e dell'eterogeneità dei substrati (modello biochimico).

I punti di criticità legati alla modellazione della produzione del biogas sono dovuti, oltre alle incertezze causate dalla schematizzazione del processo, alla difficoltà di conoscere le composizioni merceologiche del rifiuto stesso, data la nota eterogeneità dei rifiuti conferiti in discarica.

Il modello è stato implementato utilizzando i quantitativi dei rifiuti conferiti in discarica negli anni; per quello che riguarda le composizioni merceologiche è stato fatto riferimento a percentuali medie per RSU, stante la difficoltà di conoscere esattamente la composizione dei rifiuti conferiti.

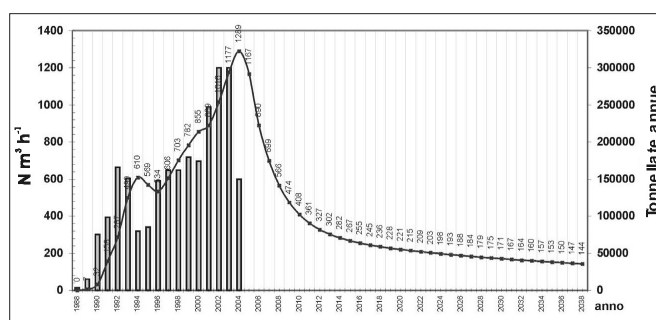


Fig. 13 – Andamento temporale della produzione di biogas dalla discarica di Legoli e dei rifiuti conferiti

Tab. 7 – Confronto tra i flussi specifici di biogas

Discariche senza aspirazione funzionante		
	$\text{N l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$	Superficie (m^2)
Amiat 1998 (**)	17.8	700000
Discarica 1 (***)	14.33	101000
Discariche con aspirazione funzionante		
Amiat 2001 (**)	8.05	500000
Legoli 2005	4.7	130000
Legoli 2004	4.7	68000
Legoli 2001 (*)	5.8	66500
Amiat 2001 (**)	8.05	500000
Discarica 2 (***)	5.66	19650
Discarica 3 (***) maggio	3.2	13000
Discarica 3 (***) Ottobre	2.8	13000

(*) Cioni et al., 2003; (**) Cioni et al., 2002; (***) Raco et al., 2005.

Le composizioni merceologiche utilizzate hanno tenuto conto del progressivo impoverimento dell'indifferenziato nelle componenti raccolte per mezzo della raccolta differenziata.

La risposta del modello ha generato una stima della produzione di biogas per l'anno 2004 pari a $1289 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$.

La curva di Fig. 13 tiene conto del programma di conferimento fino al 2006 (anno di chiusura) della discarica attualmente in esercizio.

Il dato prodotto si scosta dal dato derivato dalle misurazioni del biogas diffuso e captato di circa l'8-10 %.

Gli elementi di maggiore incertezza del modello sono i dati di input (percentuale delle frazioni merceologiche) intesi come valori medi annuali.

5. CONCLUSIONI

L'emissione totale di gas serra emessa quotidianamente dall'intero impianto di Legoli è risultata di $317 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ a maggio 2004 e di $615 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ a gennaio 2005 (vedi Tab. 3), mentre i flussi specifici medi relativi alle diverse superfici della discarica indagate risultano pressoché identici ($4.7 \text{ N l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, Tab. 7).

Nella stessa Tabella sono riportati, per confronto, i dati di flusso specifico relativi ad altre discariche RSU italiane ottenuti con la stessa metodologia d'indagine.

Se confrontiamo i flussi specifici riportati in Tab. 7, notiamo che la quantità di biogas di $615 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ è comunque da considerarsi bassa. Tale stima corrisponde infatti ad un flusso specifico di $4.7 \text{ N l h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, uguale a quello relativo alla campagna di maggio 2004, nonostante abbia coperto l'intera superficie dell'impianto di smaltimento.

Per quanto concerne la distribuzione spaziale delle misure di flusso si può asserire che le aree interessate da elevati valori di flusso sono risultate di piccole dimensioni ed in generale prospicienti i pozzi di captazione e dreni e/o vicine alla zona ancora in coltivazione. Il confronto con le immagini termografiche ha confermato le osservazioni di cui sopra.

A causa dei processi fermentativi che trasformano il CH_4 in CO_2 (o in uno dei composti intermedi del processo ossidativo completo, vedi reazioni 1 e 2), il biogas emesso in atmosfera potrebbe non essere banalmente uguale a quello non captato. La stima della quantità di biogas persa dall'impianto di captazione, non tenendo conto della trasformazione del CH_4 in CO_2 , e quindi sicuramente sovrastimando i dati, risulta essere di $770 (647\div 970) \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$ di biogas non captato. Invece, considerando la trasformazione del CH_4 in CO_2 , in accordo alla reazione (2) si ottengono $664 (553\div 847) \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$. Considerando che la portata media mensile di biogas ai motori risulta di $700 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$, il biogas prodotto è circa $1400 \text{ N m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Un altro importante aspetto è l'integrazione tra diverse tecniche di indagine non invasiva (camera di accumulo e radiometria IR), infatti esse portano informazioni su parametri di tipo diverso, che ubbidiscono a leggi fisiche diverse. Poiché le due fonti informative sono solo parzialmente correlate, lo sforzo richiesto in fase di interpretazione (vantaggiosamente) è quello di utilizzare i due set di dati per una reciproca validazione dove è dimostrato che vi sia correlazione, ed estrarre informazione addizionale laddove tale correlazione non si manifesta.

Nello specifico, si deduce che possono esistere zone di anomalia termica alle quali non corrispondono elevati valori di flusso superficiale, come anche zone di alto flusso senza un corrispettivo in termini di temperatura superficiale, a seconda dell'efficacia del sistema di captazione; tale tipo di valutazione è di enorme importanza nel quadro di una corretta gestione del sito di discarica e del suo massimo sfruttamento energetico.

In estrema sintesi questo metodo di monitoraggio ha permesso di:

1. ottenere mappe di isoflusso che possono essere utilizzate per migliorare l'efficienza della copertura e dell'impianto di captazione;
2. stimare la quantità di gas serra emessi in atmosfera;
3. verificare il modello di produzione utilizzato;
4. ottemperare al D.L. 36/2003.

BIBLIOGRAFIA

Andreottola G., Cossu R. (1988) *Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato*, RS Rifiuti Solidi, Vol. II, n. 6, 473-483.

Armstrong M. (1984a) *Problems with universal Kriging*, Math. Geol., 16, n. 1, 101-108.

Armstrong M. (1984b) *Problems with universal Kriging*, Math. Geol., 16, n. 3, 305-316.

Baird C. (1995) *Environmental Chemistry*. W.H. Freeman and Company, New York, 484 pp.

Bogner J.E., Spokas K.A. e Burton E.A. (1997) *Kinetics of methane oxidation in a landfill cover soil: temporal variations, a whole-landfill oxidation experiment, and modelling of net CH_4 emissions*, Environ. Sci. Technol., 31, 2504-2514.

Blaħa D., Barlett K., Czepiel P., Harris R., Crill P. (1999) *Natural and anthropogenic methane sources in New England*, Atmospheric Environment 33, 243-255.

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

Clark I. (1979) *Practical Geostatistics*, Department of Mineral Resources Engineering, Royal School of Mines, Imperial College of Science and Technology, London, p. 129.

Chiodini G., Frondini F., Raco B. (1996) *Diffuse emission of CO_2 from the Fossa crater, Vulcano Island (Italy)*, Bull. Volcanol., 58, 41-50.

Chiodini G., Cioni R., Guidi M., Marini L., Raco B. (1998) *Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas*, Applied Geochemistry, 13, 543-552.

Chauvet P. (1982) *The variogram cloud*, Johnson TB & Barnes RJ (Ed.) 17th APCOM, Society of Mining Engineers, New York, 757-764.

Chauvet P. (1991) *Aide mémoire de géostatistique linéaire*, Chaiers de Géostatistique, Fascicule 2. Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, pagg. 210.

Chauvet P. (1993) *Processing data with a spatial support: geostatistics and its method*, Chaiers de Géostatistique, Fascicule n. 4, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, pagg. 57.

Chauvet P., Galli A. (1982) *Universal Kriging*, Publication n. C - 96, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.

Chiles J.P. e Chauvet P. (1973) *Application du krigeage a la cartographie des fonds marins*, Cahiers de Geostatistiques, Ecole de Mines de Paris, Fontainebleau.

Cioni R., Guidi M., Raco B., Guercio M., Corsi R. (2002) *CO_2 flux from soil: a methodology to estimate the diffuse biogas*, Proc. of the 7th Int. Symp. on Environmental Issue and Waste Management in Energy and Mineral Production, SWEMP pp. 163-174.

- Cioni R., Guidi M., Raco B., Giamberini S., and Daddi P.** (2003) *Measurement of biogas emissions from air-soil interface in the MSW landfill of Legoli (Pisa, Italy)*, Proc. of the Ninth Int. Waste Management and Landfill Symposium. SARDINIA 2003
- Czepiel P.M., Mosher B., Crill P.M. e Harriss R.C.** (1996) *Quantifying the effect of oxidation on landfill methane emissions*, Journal of Geoph. Res. 101, 16721-16729.
- Cossu R., Muntoni A., Chiarantini L., Massacci G., Serra P., Scolletta A., Sterzi G.** (1997) *Biogas emissions measurements using static and dynamic flux chambers and infrared method*, Proceedings Sardinia 97, sixth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari 13-17 October, CISA.
- Damiani A., Gandolla M.**, (1992) *Gestione del biogas da discariche controllate*, Istituto per L'ambiente.
- David M.** (1977) *Geostatistical ore reserve estimation*, Elsevier Amsterdam.
- Davis J. C.** (1986) *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, Inc. Second Edition, New York, pp. 646.
- De Visscher A., Van Cleemput O.** (2003) *Simulation model for gas diffusion and methane oxidation in landfill cover soil*, Waste Management, 23, 581-591.
- El-Fadel M., Findikakis A. N., Leckie J.O.**, (1988) *A numerical model for methane production in managed sanitary landfills*, Waste Management & Research, 7, 31-42.
- Findikakis A.N., Leckie J.O.**, (1979) *Numerical simulation of gas flow in sanitary landfills*, Journal of Environmental Engineering Division, ASCE, 105, N. EE5, 927-945.
- Findikakis A.N., Papelis C., Halvadakis C.P., Leckie J.O.** (1987) *Modelling gas production in managed sanitary landfills*, Waste Management e Research, 6, 115-123.
- Hashemi M. Kavak H. I. Tsotsis T. T. and Sahimi M.**, (2002) *"Computer simulation of gas generation and transport in landfills – I: quasi -steady- state condition"* Chemical Engineering Science, 57, 2475-2501.
- Hinkle M.** (1994) *Environmental conditions affecting concentrations of He, CO₂, O₂ and N₂ in soil gases*, Applied Geochemistry, 9, 53-63.
- Hinkle M., Ryder J.L.**, (1987) *Meteorological variables and concentrations of helium, carbon dioxide, and oxygen in soil gases collected regularly at a single site for more than a year*, U.S.Geol. Surv.. Open-File report. 87-449.
- Hinkle M., Ryder J.L.**, (1988) *Effect of meteorological changes on concentration of helium, carbon dioxide and oxygen, in soil gases*, Soc. Mining Eng., SME Ann. Mtg. Phenix, Arizona Preprint number 88-9.
- Journal A.G., Huijbregts Ch. J.**, (1978) *Mining geostatistics*, Academic Press.
- Kanemasu E.T. Power W.L., Sij J.W.** (1974) *Field chamber measurements of CO₂ flux from soil surface*, Soil Science, 118, 4, 233-237
- King C.Y., Minissale A.** (1994) *Seasonal variability of soil gas radon concentration in central California*, Radiat. Meas., 23, 683-692.
- Kising A.P., Socolow R.H.** (1994) *Human impact on the nitrogen cycle*, Physics Today, 47-11, 24-31.
- Krige D.G.**, (1951) *A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand*, J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afr., 52, 119-139.
- Kucera C., Kirkham D. R.**, (1971) *Soil respiration studies in tall grass Prairie in Missouri*, Ecology, 52, 912-915.
- Le Mer J., Roger P.** (2001) *Production, oxidation, emission and consumption of methane by soil : a review*, Waste Management, 23, 7, 573-580.
- Manna L., Zanetti M.C., Genon G.** (1999) *Modelling biogas production at landfill site*, Resources, Conservation and Recycling, 26, 1-14.
- Martini I.P., Sagri M.**, (1993) *Tectonosedimentary characteristic of Late Miocene – Quaternary extensional basins of the Northern Apennines*, Earth Sci. Rev., 34, 197-233.
- Matheron G.** (1962) *Traité de géostatistique appliquée*, Technip, Paris.
- Matheron G.**, (1965) *Les variables Regionalisées et leur estimation*, Masson, Paris, pag. 305.
- Matheron G.**, (1969) *Le Krigeage universel*, Fascicule n. 1, Les Cahiers du Centre De Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, pag. 83.
- Matheron G.**, (1970) *The theory of regionalized variables and its applications*, Fascicule n. 5, Les Cahiers du Centre De Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 211 pagg.
- Mazzanti R.**, (1961) *Geologia della zona di Montione tra le valli dell'Era e dell'Elsa (Toscana)*, L.A.C., Firenze.
- Meoni C., Timpanidis D.**, (1992) *Progetto di ottimizzazione della discarica controllata per rifiuti solidi urbani ed assimilabili di Legoli, Peccioli, Pisa: ampliamento finalizzato al recupero e riutilizzo ottimale del biogas a fini energetici*, Allegato B, Allegato C, pagg. 33.
- Nastev M. Therien R. Lefebvre R. and Gelinat P.**, (2001) *"Gas production and migration in landfills and geological materials"*, Journal of Contaminant Hydrology, 52, 187-211.
- Parkinson K.J.** (1981) *An improved method for measuring soil respiration in the field*, J. Appl. Ecology, 18, 221-228.
- Pinoul J.L., Baubron J.C.** (1996) *Signal processing of soil gas radon, atmospheric pressure, moisture, and soil temperature*

data: a new approach for radon concentration modelling, *J. Geophys. Res.*, 101, 3157-3171.

Raco B., Guidi M., Scozzari A., Lelli M. (2005) *Misure di biogas dal suolo di discariche RSU*, Rapporto Interno IGG-CNR. Area della Ricerca di Pisa.

Scozzari A., Raco B., Lelli M., Lippo G. (2004) *Integrazione di metodologie non invasive per il monitoraggio di discariche RSU*, Atti della 8ª Conferenza Nazionale ASITA- Roma, 14-17 Dicembre 2004.

Sichel H.S., (1966) *The estimation of means and associated confidence limits for small samples for lognormal population*, Proc. 1966 Symp. South African Institute of Mining and Metallurgy.

Sinclair A.J., (1974) *Selection of threshold values in geochemical data using probability graphs*, *Journal of Geochemical Explorat.*, 3, 129-149.

Sinclair A.J., (1991) *A fundamental approach to threshold estimation in exploration geochemistry: probability plots revisited*, *Journal of Geochemical Explorat.*, 41, 1-22.

Tonani F., Miele G. (1991) *Methods for measuring flow of carbon dioxide through soils in volcanic setting*, Napoli '91. International Conference on Active Volcanoes and Risk Mitigation. Napoli, 27 August-1 September. (abstract).

Trégourès A. et al., (1999) *Comparison of seven methods for measuring methane flux at a municipal solid waste landfill site*. *Waste Management Research*, 17, 453-458.

U.S. Environmental Protection Agency, (2001) *EPA-430-R01007*, December 2001.

Wackernagel H., (1995) *Multivariate geostatistics*, Springer – Verlag, Berlin, p. 256.

Witkamp M., (1969) *Cycles of temperature and carbon dioxide evolution from litter and soil*, *Ecology*, 50, 922-924.

www.westsystems.com. West Systems Carbon dioxide flux meter handbook, release 3.0 (2001).

CURRICULA

Raco Brunella – Cittadina italiana, nata a Pontedera (PI) l'8 marzo 1964. Laureata in Scienze Geologiche con lode nel 1988, presso l'Università di Pisa. Dal 1989 al 1993 ha vinto tre borse di studio del CNR che hanno avuto come oggetto la geochimica applicata alla sorveglianza vulcanica e all'esplorazione geotermica. Ha ottenuto il titolo di Dottore di Ricerca nel 1997 con una tesi che ha riguardato la stima del flusso di gas attraverso mezzi porosi. Dal 1997 al 2001 con una borsa di studio post-dottorato ha svolto attività di ricerca sulla contaminazione ambientale sia del suolo che delle acque. Dal 2001 è ricercatrice presso l'Istituto di Geoscienze e Georisorse del CNR di Pisa. Dal 2004 è professore a contratto presso la

Facoltà di Scienze MFN dell'Università di Pisa, CdL in Scienze Ambientali.

Cioni Roberto – Nato a Livorno il 4 Settembre 1946. Nel 1976 si laurea in Scienze Geologiche all'Università di Pisa (110/110 e lode). Nello stesso anno viene assunto dal CNR in qualità di ricercatore e dal 1989 è inquadrato come I° ricercatore. Dal 1981 ad oggi ha coperto diversi incarichi quali ad esempio i) Membro di una Commissione Ministeriale per lo studio dei fenomeni del bradisismo flegreo, ii) Membro del Consiglio Scientifico del Gruppo Nazionale per la Vulcanologia in qualità di Responsabile della linea B (Sorveglianza geochimica dei vulcani attivi e fenomeni chimici precursori delle eruzioni), iii) Responsabile del reparto di Geochimica dei Fluidi dell'IGGI e dell'IGG sez. di Pisa dal 1997 al 2004. È autore di oltre 80 pubblicazioni su riviste internazionali e nazionali.

Guidi Massimo – Nato a Pisa il 28 settembre 1947, laureato in chimica presso l'Università di Pisa nel 1972, è stato assunto presso l'Istituto di Geocronologia e Geochimica Isotopica dal 1° Marzo 1996. Da allora ha svolto attività di ricerca scientifica nell'ambito della geochimica dei fluidi, occupandosi di temi riguardanti la geochimica dei gas e delle acque sotterranee (interazione acqua roccia). In particolare, ha dato un contributo decisivo alla progettazione e messa in opera di stazioni di monitoraggio geochimico automatico di fluidi, e alla messa a punto dei software di gestione e di trattamento dati. Dal 2005 è professore a contratto presso la Facoltà di Scienze MFN dell'Università di Pisa, CdL in Scienze Ambientali.

Scozzari Andrea – Ha ricevuto la laurea in ingegneria elettronica presso l'Università di Pisa nel 1992. Dopo circa dieci anni di esperienza industriale, entra nel Consiglio Nazionale delle Ricerche. I suoi interessi di ricerca riguardano lo sviluppo di strumentazione di monitoraggio geochimico-ambientale. È anche assistente dei corsi di elaborazione delle immagini e di sistemi di telerilevamento presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa.

Lelli Matteo – Nato a Livorno il 16 Luglio 1973 si è laureato con lode in Scienze Geologiche all'Università di Pisa nel 1999. Ha conseguito il titolo di dottore in ricerca in Scienze della Terra nel 2005 con una tesi riguardante l'impatto ambientale dei vulcani sulle acque freatiche e sull'atmosfera. Dal 1999 lavora presso l'Istituto di Geoscienze e Georisorse del C.N.R. di Pisa, occupandosi dello studio delle caratteristiche chimiche ed isotopiche delle emissioni gassose dai suoli nei sistemi naturali e/o modificati dall'attività antropica. Attualmente, presso lo stesso Istituto del C.N.R., si occupa dello studio di discariche RSU, finalizzato alla stima della emissione globale di gas.

Giovanni Lippo – Laureato in Ingegneria Civile, Idraulica, nel 1984 presso l'Università degli Studi della Calabria. Dal 1998 è Direttore Tecnico della società di Ingegneria Ambientale P&I Srl di Firenze. Ha progettato numerosi impianti di trattamento/recupero di rifiuti urbani e speciali. In particolare si è specializzato nella progettazione e gestione di impianti di discariche per rifiuti urbani e speciali. Da 2002 ricopre il ruolo di Responsabile Tecnico della discarica per rifiuti non pericolosi dell'Isola D'Elba. Dal 2003 ricopre il di Direttore Tecnico e Responsabile Tecnico della discarica per Rifiuti non pericolosi del comune di Peccioli (PI).