

COMMITTENTE:  
HERATECH S.p.A.

# Discarica del Cassero Serravalle Pistoiese (PT)

## Misure di emissioni di biogas dalla superficie della discarica anno di riferimento 2023



REV.	PAR.	PAG.	MOTIVO	DATA
0	//	//	Prima emissione Studio 23IFS-017	17/11/2023
1	//	//	Correzione di alcuni errori	12/12/2023
2	//	//	Aggiunta leggenda alle mappe di pagina da 11 a 13	19/12/2023

REV.	DATA	ELABORAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE
0	19/12/2023	Vanzini Daniele	Marco Farina	Vanzini Daniele

Diritti D'Autore	In conformità alle leggi di protezione dei diritti d'autore, il contenuto di questa scheda non potrà essere copiato, fotocopiato, riprodotto, tradotto o trasferito ad alcun supporto elettronico o elettronicamente leggibile, in tutto o in parte, senza previa autorizzazione.
------------------	---

## INDICE

1	PREMESSA E SCOPO DEL DOCUMENTO .....	3
2	Generalità.....	4
3	Inquadramento dell'area di studio.....	5
4	Approccio alla STIMA DELLE EMISSIONI di biogas .....	6
4.1	Indagine termografica .....	6
4.2	Misurazione delle emissioni diffuse mediante camera statica non stazionaria .....	8
4.2.1	Scelta dei punti di misura .....	8
5	RISULTATI OTTENUTI .....	10
5.1	Indagine termografica .....	10
5.2	Indagine emissione diffuse .....	14
5.3	Risultati delle misure dell'area con copertura definitiva.....	16
5.3.1	Carte isoflusso della discarica con copertura definitiva.....	25
5.4	Risultati delle misure dell'area con copertura provvisoria.....	27
5.4.1	Carte isoflusso della discarica con copertura provvisoria .....	37
5.5	Fori e altri elementi con emissioni di biogas.....	39
5.6	Emissioni complessive.....	41
5.7	Stima dell'efficienza del sistema di captazione .....	42
6	Conclusioni.....	45
6.1	Zona con copertura definitiva.....	45
6.2	Zona con copertura provvisoria. ....	45

## 1 PREMESSA E SCOPO DEL DOCUMENTO

Il presente documento riporta i risultati dell'attività di monitoraggio dell'autocontrollo che ha la finalità di verificare l'eventuale emissione e la diffusione in atmosfera di biogas dal terreno, dall'ammasso di rifiuto attraverso la copertura della discarica e di valutare la corretta realizzazione, la qualità e la tenuta nel tempo del sistema di copertura, nonché l'efficienza del sistema di captazione del biogas dal corpo di discarica. Le misurazioni in oggetto del presente monitoraggio comprendono zone con copertura temporanea e definitiva consistono nella valutazione del biogas emesso dalla superficie della discarica attraverso una prima valutazione mediante ripresa termografica destinata all'individuazione di anomalie termiche e successivamente da una campagna per verificare la quantità emessa di metano, anidride carbonica, acido solfidrico e di composti organici volatili attraverso camera di accumulo statica non stazionaria posizionata su una griglia regolare e sui punti significativi rilevati durante la ripresa termografica o rilevati durante le misure stesse.

Le attività termografiche sono state svolte nella giornata del 25 Settembre 2023, in particolare nel pomeriggio del primo giorno sono state rilevate le immagini ortofotografiche mediante drone a pilotaggio remoto (APR), mentre alla sera si sono acquisite le corrispettive immagini termografiche anch'esse con la stessa modalità di ripresa (drone APR).

Successivamente dopo le elaborazioni delle precedenti immagini e in un periodo con condizioni meteorologiche idonee sono state eseguite le misure di emissione diffuse che sono state completate nelle giornate dal 02 al 06 Ottobre 2023.

## 2 GENERALITÀ

Il gas di discarica è una miscela complessa di sostanze generate a seguito di trasformazioni chimico, fisiche e biologiche che coinvolgono la massa di rifiuti.

I processi biologici che portano alla formazione di biogas sono inizialmente di tipo aerobico in considerazione del fatto che il rifiuto appena compattato ha ancora una riserva interstiziale di ossigeno in grado di garantire queste trasformazioni, successivamente, una volta che l'Ossigeno sarà stato consumato, entreranno in gioco fenomeni di fermentazione della sostanza organica con produzione di Anidride Carbonica e Acidi organici, a cui seguirà la fermentazione metanigena ad opera di batteri anaerobici e che si protrarrà per un periodo prolungato (diversi anni).

Lo scopo del monitoraggio sarà quindi di verificare l'integrità della copertura della discarica e conseguentemente l'efficienza di captazione del biogas poiché il biogas diffuso in atmosfera costituisce un elemento di contaminazione ambientale e di mancato recupero energetico, effetti riconducibili principalmente a componenti tipici, di natura gassosa quali: Metano ( $\text{CH}_4$ ) e Anidride Carbonica ( $\text{CO}_2$ ), entrambi gas ad effetto serra. Inoltre, una copertura non perfetta, oltre all'esalazione di Metano e Anidride Carbonica, componenti inodori del biogas, è causa anche di emissione di composti che, seppur presenti in tracce, possono avere impatto odorigeno. La mitigazione dell'impatto ambientale, ottenuta mediante delle opere efficaci di copertura è di primaria importanza nella corretta gestione della discarica, e al tempo stesso, rappresenta un ulteriore strumento per il controllo del quantitativo di biogas recuperato.



### 3 INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area del sito della discarica è posta nella parte centro-meridionale del territorio comunale di Serravalle Pistoiese, ai piedi della dorsale del Montalbano, a una quota media di circa 85 metri sul livello del mare, in prossimità della località Casalguidi; nella Figura 1 si riporta la posizione generale del sito mentre in Figura 2 la vista dall'alto.

Figura 1: Vista generale, posizione del sito della discarica.



Figura 2: Vista di dettaglio della discarica di Seravalle Pistoiese.

0 50 100 150 200 m



## **4 APPROCCIO ALLA STIMA DELLE EMISSIONI DI BIOGAS**

### **4.1 Indagine termografica**

Il corpo della discarica è stato indagato attraverso delle riprese termografiche per verificare la potenziale emissiva delle zone oggetto di copertura definitiva e provvisoria della discarica.

Tale lavoro è stato condotto a supporto della campagna di misura delle emissioni diffuse.

La termografia è un metodo che consente di passare dalla misura senza contatto della radiazione infrarossa alla distribuzione di temperatura superficiale su un corpo.

Per effettuare correttamente la conversione tra radianza ricevuta dal sensore dello strumento e distribuzione di temperatura superficiale, sono necessari una serie di conoscenze, analisi ed impostazioni che sono oggetto di specifica formazione.

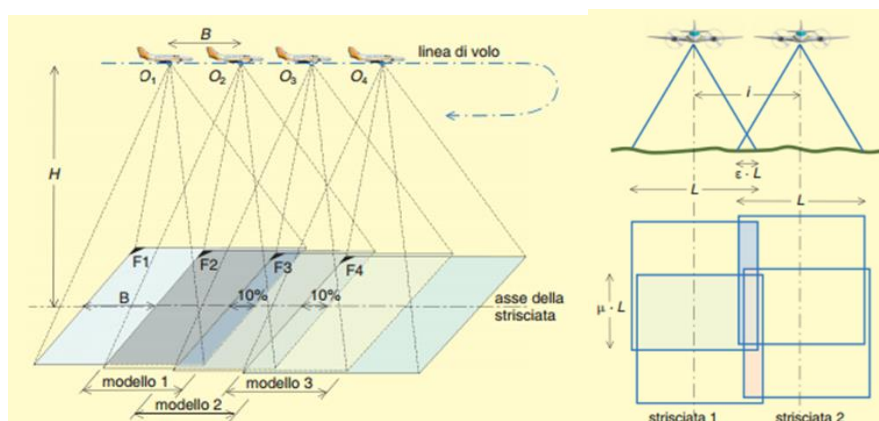
Lo strumento (termocamera a infrarossi) rileva infatti non solo la radiazione termica emessa dall'oggetto indagato, ma anche la radiazione che esso riflette, ed eventualmente trasmette. Dal momento che solo la radiazione emessa fornisce informazioni sulla reale temperatura superficiale dell'oggetto, è necessario che l'operatore sia in grado di distinguere tra i diversi contributi radiativi rilevati dallo strumento, per evitare di incorrere in errori.

Una delle applicazioni della termografia consiste nell'ispezione delle superfici delle discariche dove in corrispondenza di migrazioni di gas dal sottosuolo si rileva un aumento delle temperature superficiali. Al fine di aumentare la sensibilità delle riprese le misure avvengono nel periodo notturno dove i gradienti termici fra le superfici attraversate dai biogas e quelle non interessate sono maggiori.

Altre applicazioni sono la verifica d'impianti tecnologici a servizio della captazione del biogas dove per le temperature del gas che scorre all'interno, s'instaurano temperature di equilibrio sulle superfici delle tubazioni che rilevano lo stato di funzionamento.

Durante il volo le riprese termografiche avvengono con una velocità di acquisizione di 8 frame al secondo con risoluzione di 640 x 512 pixel con altezze di volo tipiche da 30 a 50 metri, in questo modo si hanno dei frame con una buona sovrapposizione sulla direzione di volo, la successiva "strisciata" viene pianificata in modo che ci sia una sovrapposizione dei frame anche lateralmente come visibile in Figura 3.

Figura 3: Esempio di sovrapposizione dei frame durante il volo APR.

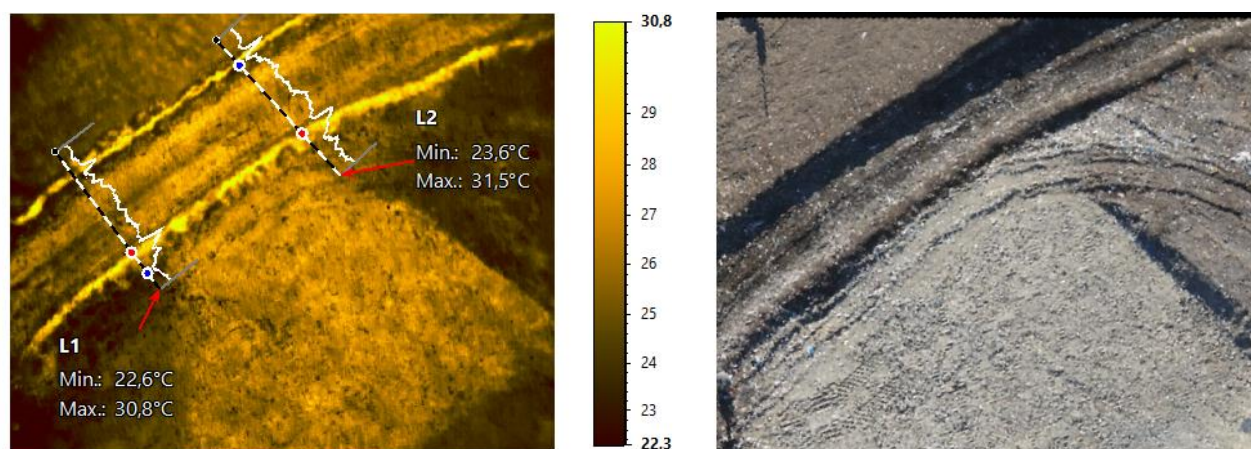


In post elaborazione i frame (così come quelli ortofotografici) vengono assemblati in un'unica immagine tramite uso di software di fotogrammetria; questo permette di mantenere la risoluzione originaria, di ampliare l'angolo di ripresa e di avere una vista d'insieme dell'intera superficie da indagare.

Parallelamente, gli stessi frame vengono verificati mediante software specifico per la valutazione delle anomalie termiche come ad esempio (non relativa alla discarica in oggetto) visibile in Figura 4 in cui risaltano due percorsi preferenziali del biogas (immagine termica di sinistra) su una pista di movimentazione rifiuti ben visibile nel corrispettivo frame visibile (immagine di destra).

Le anomalie termiche riscontrate sono state analizzate in dettaglio con la collaborazione dei gestori dell'impianto.

Figura 4 Immagine termica visibile della stessa porzione discarica.





## 4.2 Misurazione delle emissioni diffuse mediante camera statica non stazionaria

La misura dei flussi di metano viene eseguita utilizzando una cappa di accumulo statico non stazionario che consiste in una semisfera in materiale inerte che isola una porzione di superficie da indagare, gli eventuali gas emessi si accumulano nel volume interno della stessa camera provocando un incremento progressivo delle concentrazioni che possono essere misurati con opportuni strumenti o sensori specifici per le sostanze da indagare.

I dati così misurati possono essere utilizzati per determinare il tasso di incremento in ppm/sec attraverso una post elaborazione che verifica se esiste una curva interpolante fra i dati in concentrazione e il tempo trascorso oppure se i dati non sono correlabili o non incrementali.

Dai dati calcolati in questo modo e attraverso le costanti tipiche della cappa utilizzata si possono poi ricavare i dati di flussi relativi alla superficie della discarica indagata.

Le misure vengono replicate in punti georeferenziati a maglia regolare sull'intera superficie della discarica, in questo modo poi possono essere utilizzati per estrarre, mediante tecniche interpolanti, carte di isoflusso e determinare l'emissione media dell'area indagata.

Le caratteristiche dei sensori utilizzati sono elencate in Tabella 1.

Tabella 1 Sensori/analizzatori utilizzati.

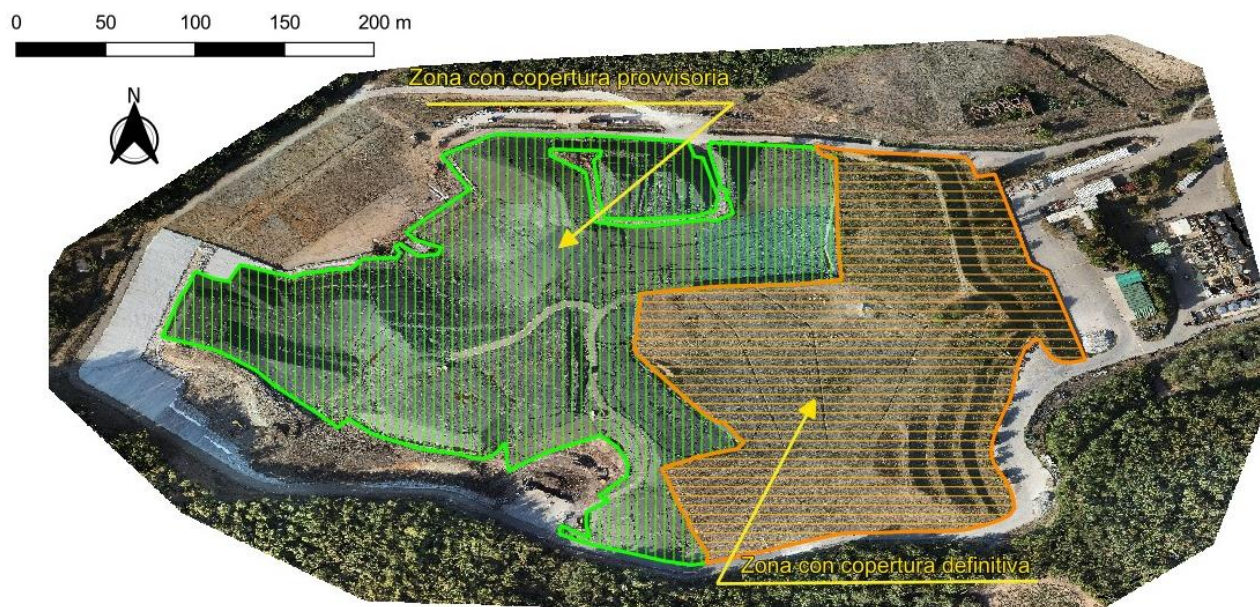
Sensore /strumento	Tipo strumento	Range
Gas-Tec	Detector FID per CH <sub>4</sub>	100, 1.000 e 10.000ppm
MiniPID 2	Detector PID per COV	0-40.000 ppb
MSH Dynament Limited	Detector NDIR per CO <sub>2</sub>	0-5000 ppm
MSH Dynament Limited	Detector NDIR per CH <sub>4</sub>	0-50000 ppm
RTE 1004	Sensore elettrochimico per H <sub>2</sub> S	0-100 ppm

### 4.2.1 Scelta dei punti di misura

L'area oggetto dell'indagine è la porzione di discarica che corrisponde all'area con copertura definitiva e all'area con copertura provvisoria (teli) come visibile in Figura 5. Le aree corrispondenti alle zone in coltivo dei rifiuti sono state escluse dalla presente indagine.

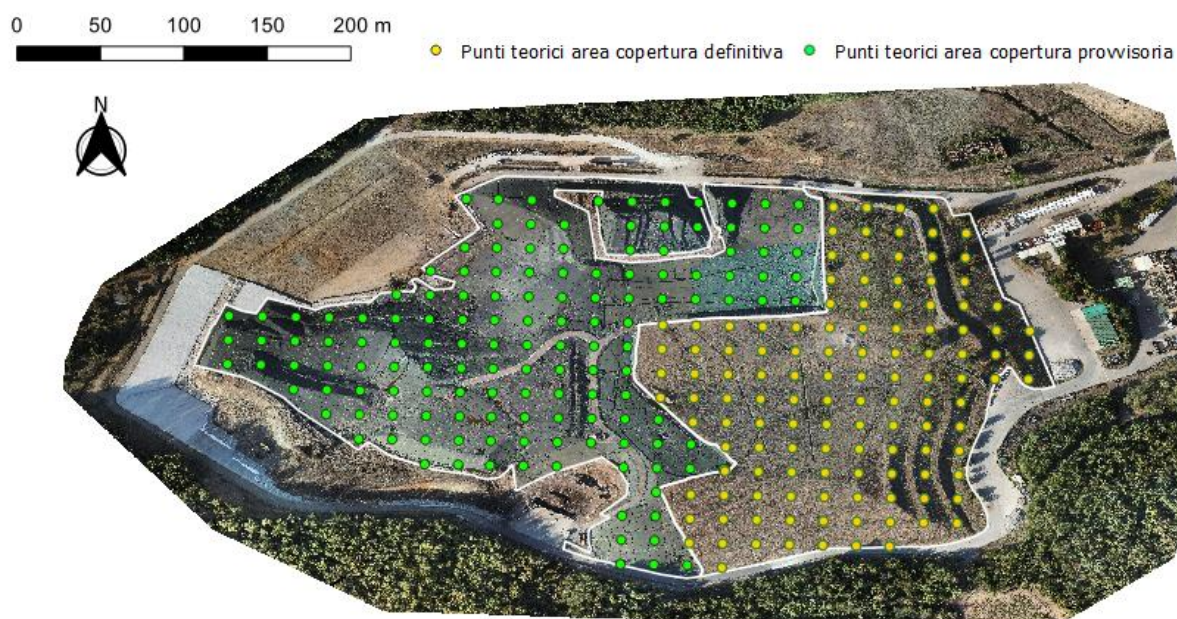


Figura 5 Zone della discarica oggetto dell'indagine.



Le due aree sono state poi suddivise in subaeree quadrate di lato di 20 metri come appare in Figura 6 i cui vertici sono oggetto delle misure. Va precisato che la posizione indicata è relativa alla progettazione dell'intervento e alcuni punti sono stati riposizionati nei casi in cui non sia possibile effettuare le misure (per esempio in corrispondenza di campi di pendenza oppure per presenza di impianti ecc).

Figura 6: Divisione della discarica in aree equivalenti.



## 5 RISULTATI OTTENUTI

### 5.1 Indagine termografica

Le riprese termografiche hanno rilevato alcune evidenze sia nelle zone con copertura temporanea sia in quelle con copertura definitiva. Si osservano per esempio aree con temperature superficiali più elevate (con un delta di 2°C rispetto alle aree equivalenti) probabilmente per la presenza di terreni con maggior umidità e in second'ordine la possibilità di flussi ridotti di biogas.


Nelle prossime pagine si riportano le viste generali delle riprese termiche.

Le evidenze rilevate sono state meglio indagate attraverso i campionamenti delle emissioni diffuse e sono state segnalate al gestore con cui sono state contestualizzate per individuare e risolvere le eventuali criticità.



Figura 7 Immagine termica dell'area indagine, vista generale.

0 50 100 150 200 m



Scala in °C

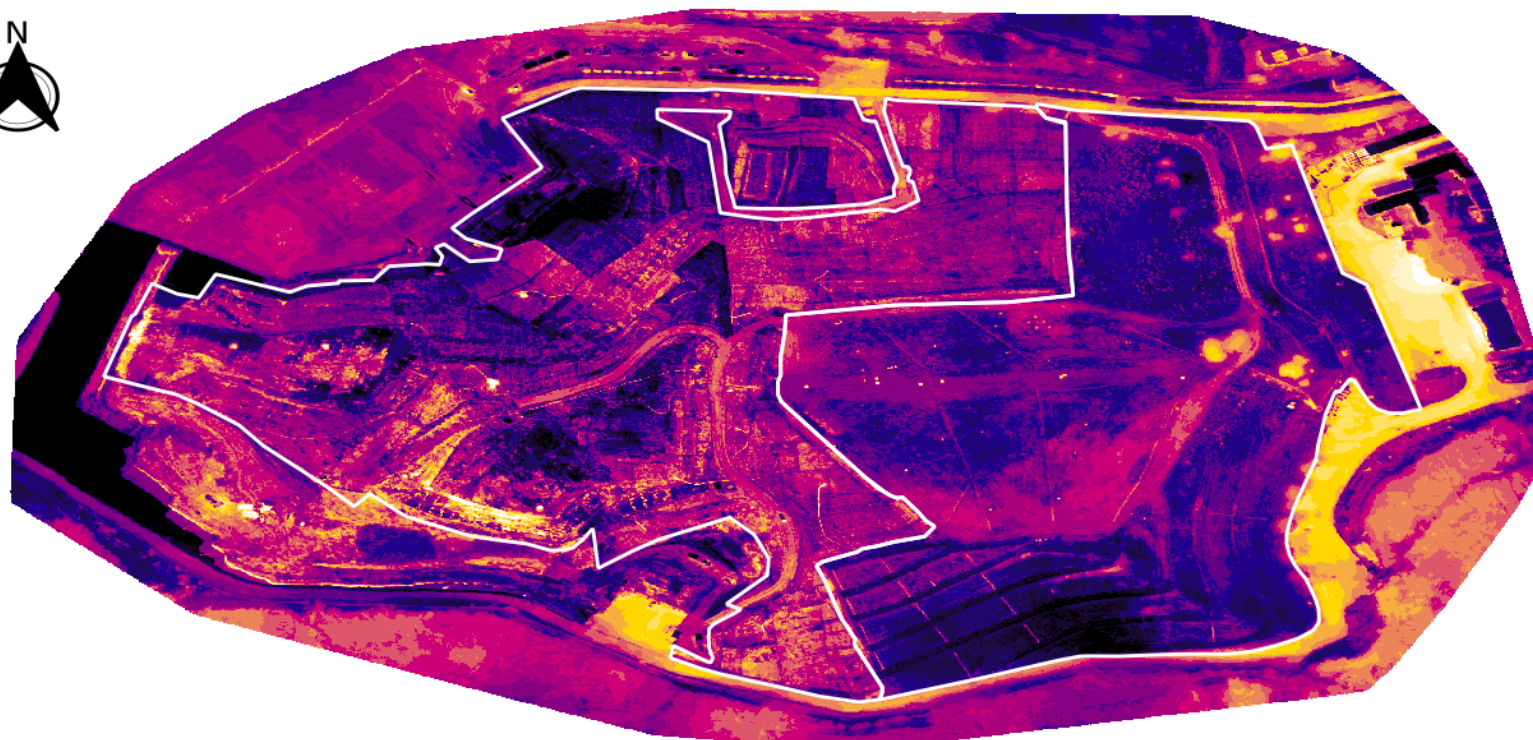
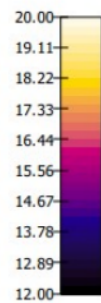




Figura 8 Dettaglio Nord ovest della discarica.

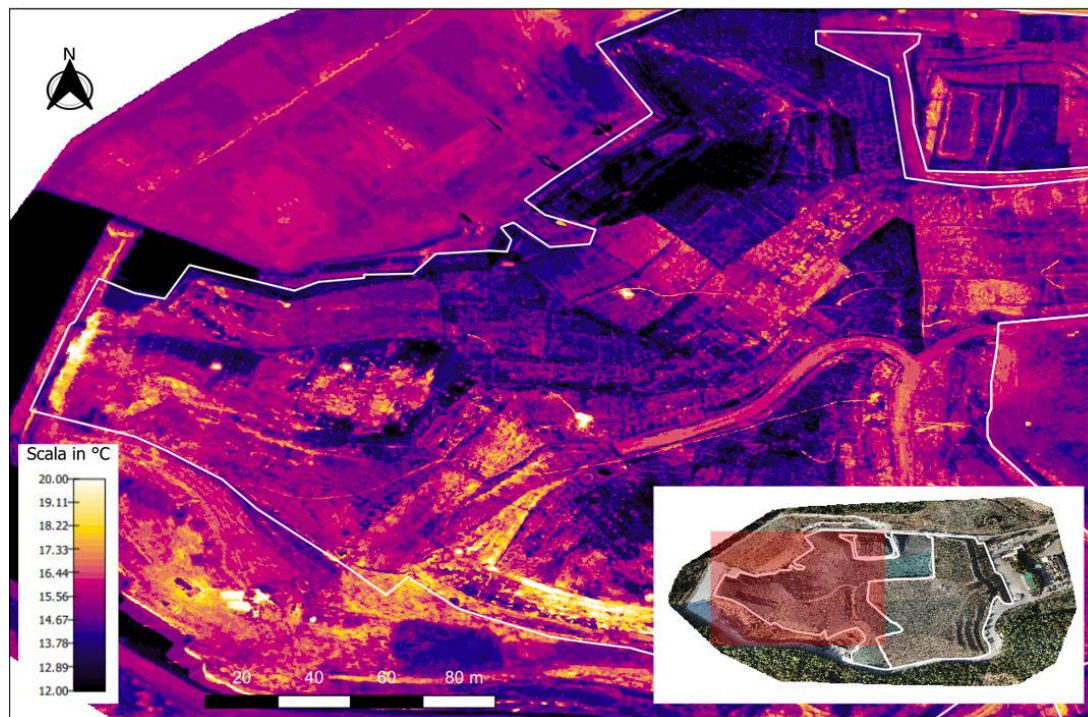


Figura 9: Dettaglio Sud ovest della discarica.

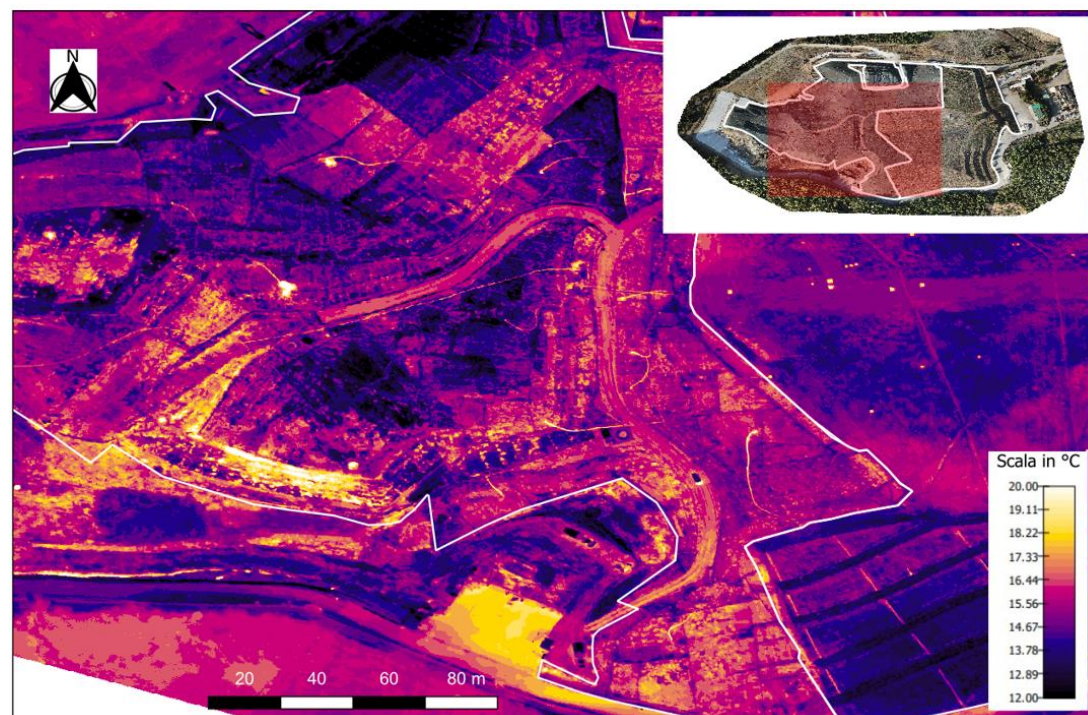




Figura 10: Dettaglio nord est della discarica.

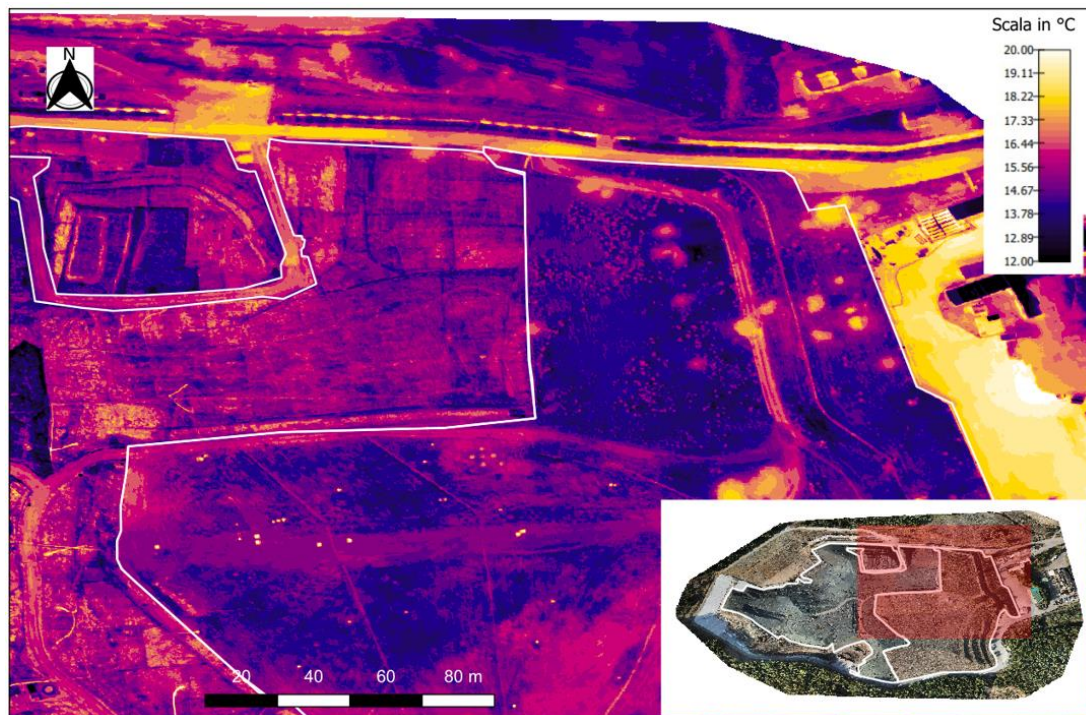
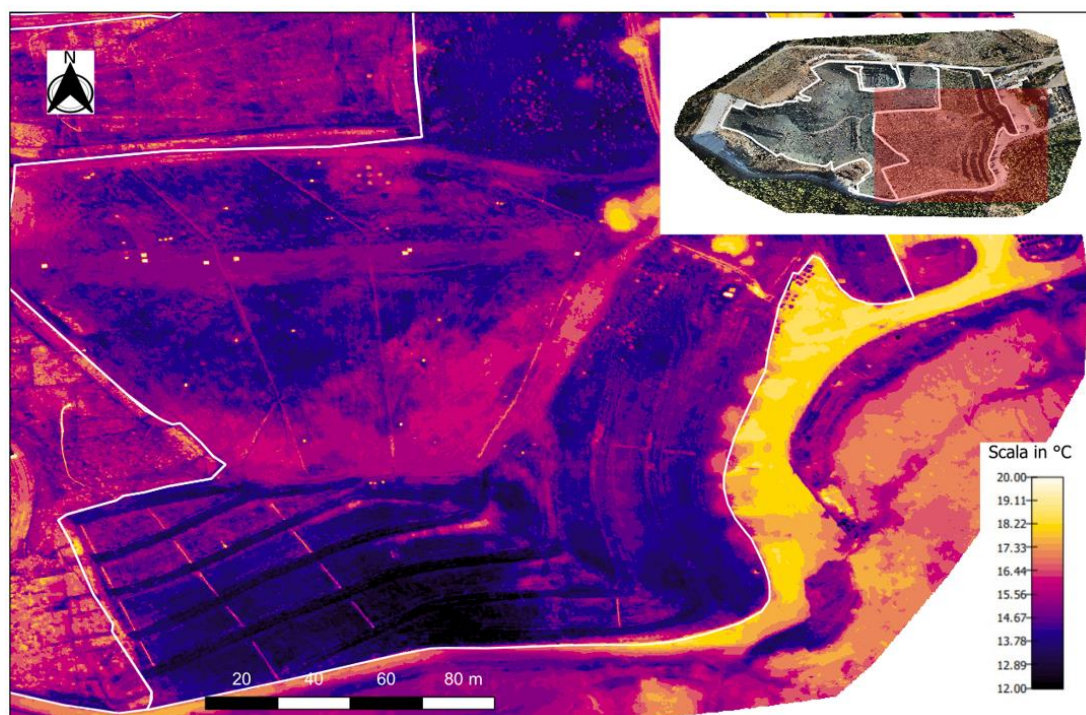


Figura 11: Dettaglio sud est della discarica.





## 5.2 Indagine emissione diffuse

L'obiettivo dell'indagine è la quantificazione delle emissioni complessive di metano, anidride carbonica, acido solfidrico e composti organici fotoionizzabili emesse attraverso le aree della discarica corrispondenti alla copertura definitiva e all'area con copertura provvisoria.

La superficie complessiva interessata, al momento del monitoraggio è stata di circa 107.134 m<sup>2</sup>, dei quali 59.029 m<sup>2</sup> con copertura temporanea, e 48.105 m<sup>2</sup> facenti parte della zona con copertura definitiva mentre altre aree destinate alla coltivazione del rifiuto sono escluse dal presente monitoraggio.

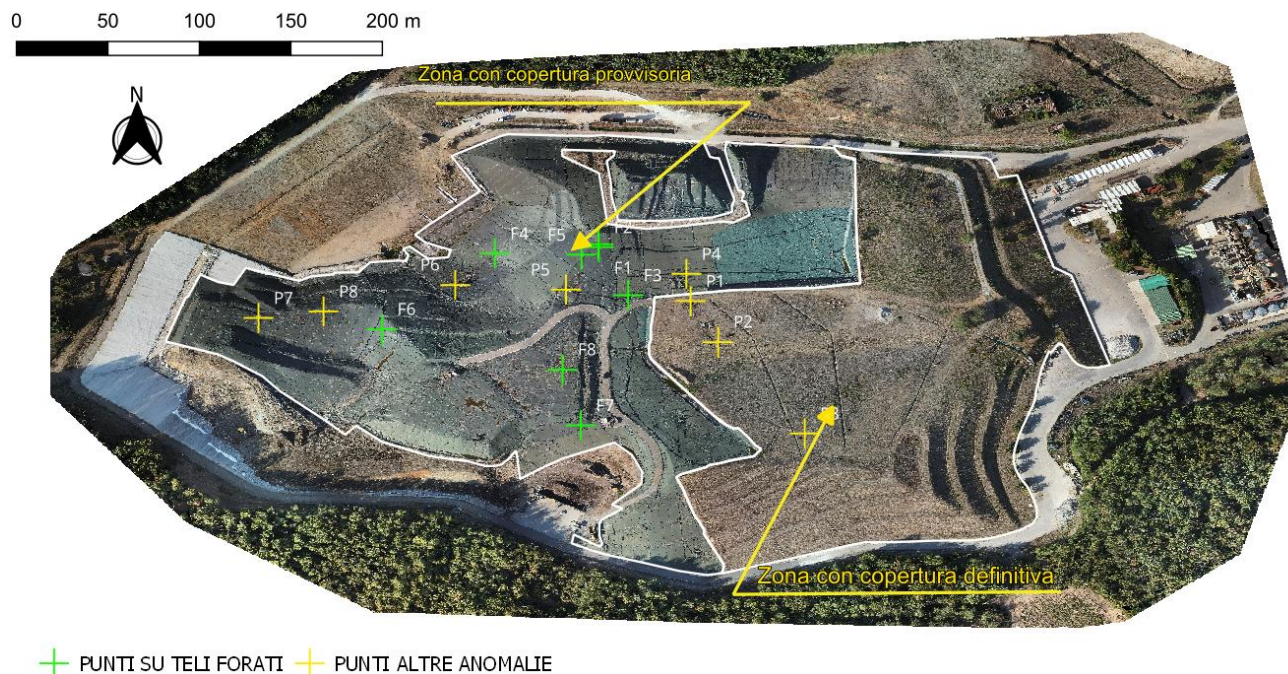
Nella Figura 12 si riportano i punti effettivi misurati, in verde quelli con copertura provvisoria mentre in giallo sono quelli relativi alla copertura definitiva.

Figura 12 Posizione dei punti di misura.



Durante la campagna di misura sono state individuate alcune anomalie che corrispondono a dei fori in corrispondenza dei teli di ricopertura oppure delle crepe nel terreno o la presenza di elementi con perdite, la cui posizione di queste anomalie è visibile in Figura 13.

Figura 13 Posizione delle anomalie.





### 5.3 Risultati delle misure dell'area con copertura definitiva.

Nell'area relativa alla discarica con copertura definitiva sono stati posizionati 122 punti di misura con una maglia regolare di circa 20 metri, nella Figura 14 e Figura 15 si riportano le emissioni in scala di colori mentre i descrittori dei risultati numerici ottenuti sono elencati in Tabella 2.

Figura 14 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di CH<sub>4</sub>.

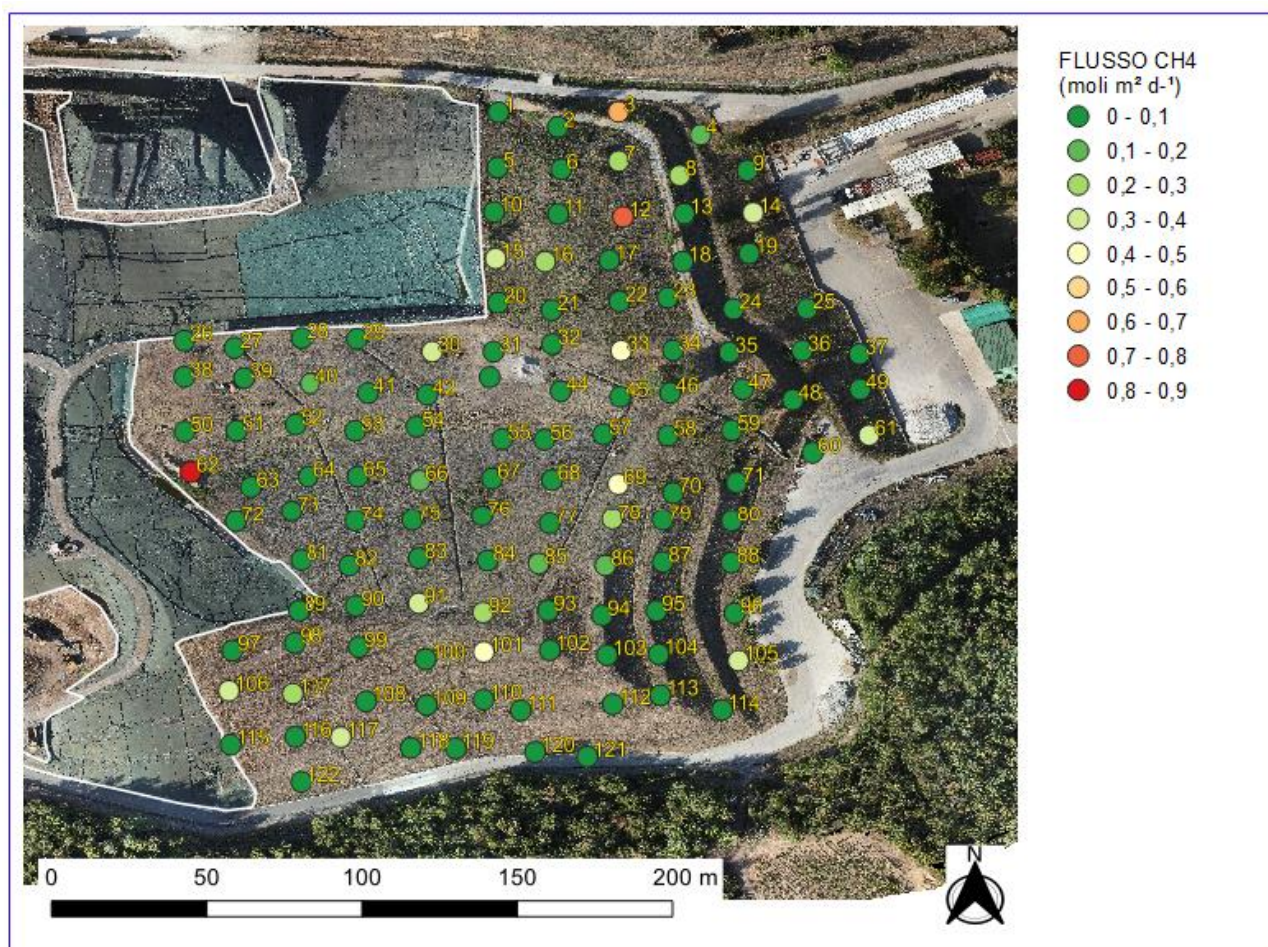




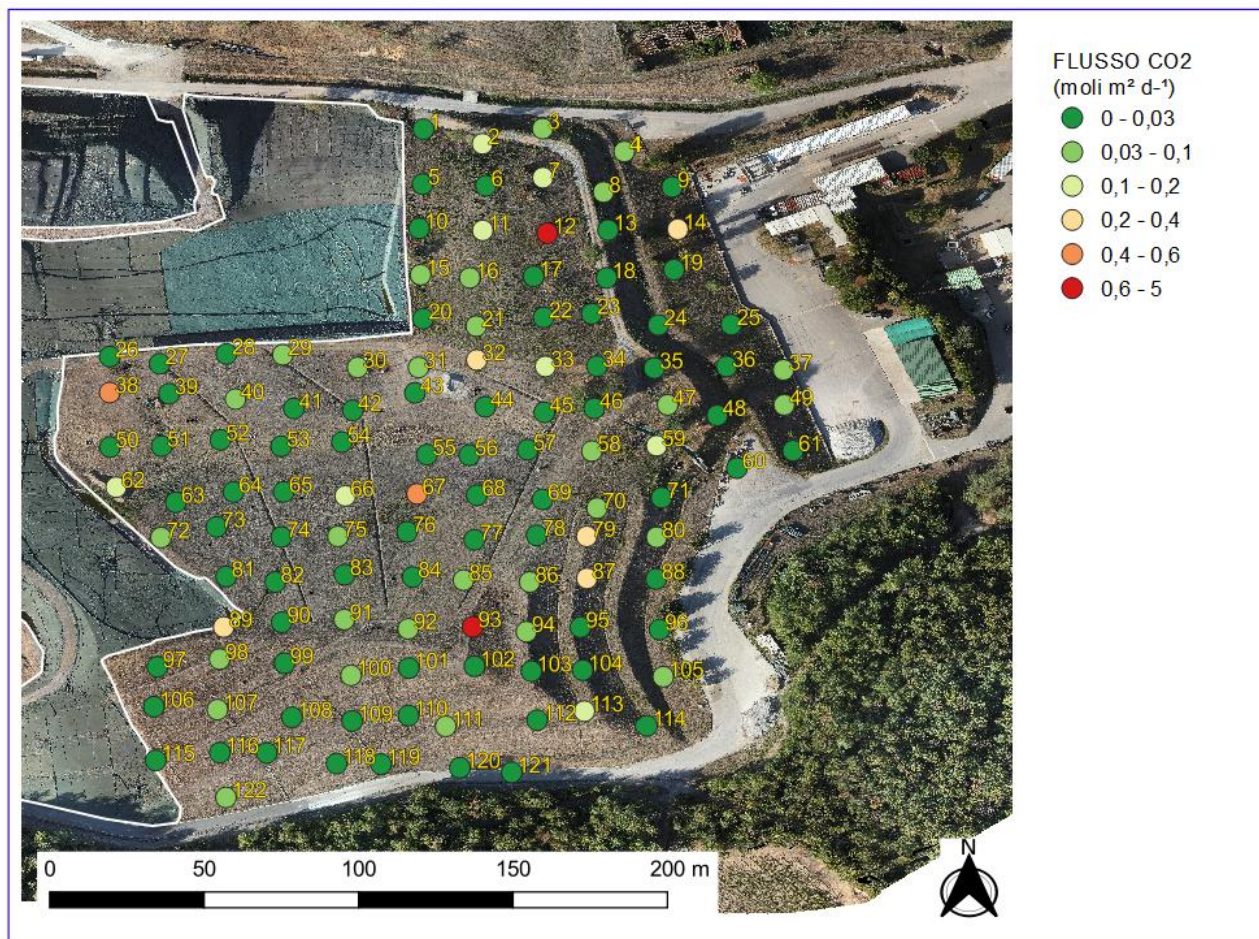
Figura 15 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di CO<sub>2</sub>.



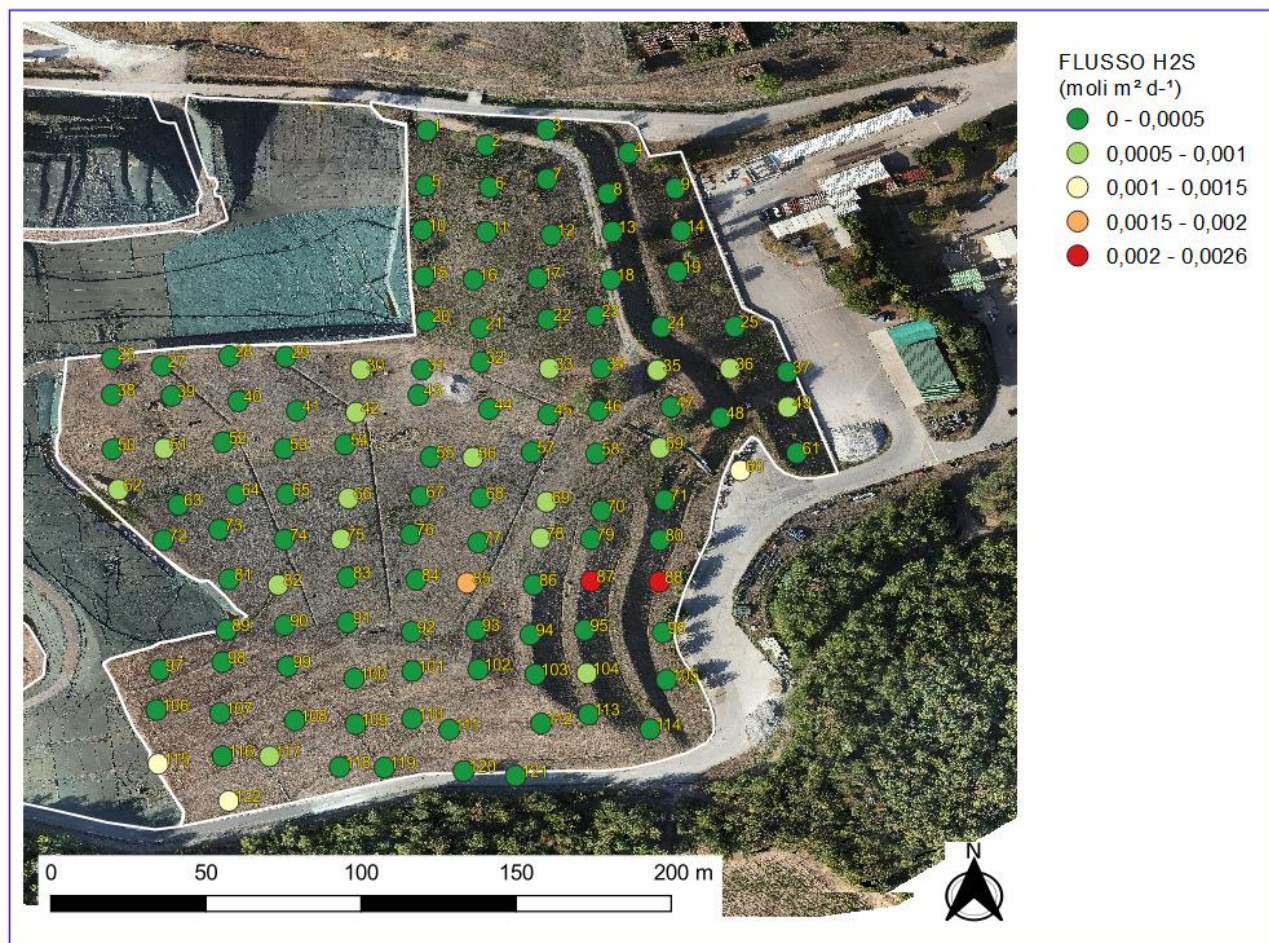
Figura 16 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di H<sub>2</sub>S.



Figura 17 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di COV.

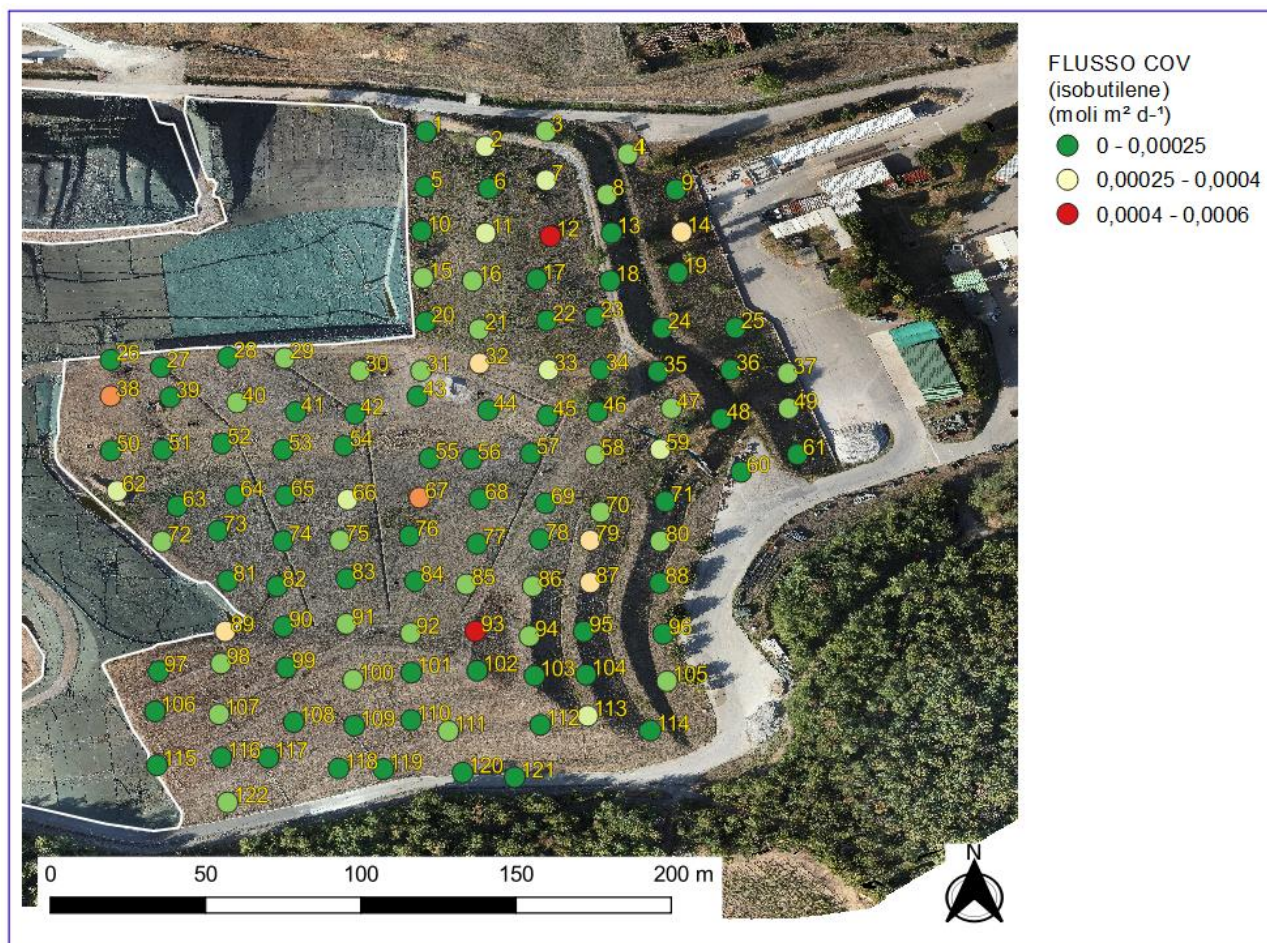


Tabella 2 Valori misurati sull'area con copertura definitiva.

Parametro	Unità di misura	N° punti misurati	N° dati > L.o.Q.	Valore medio	Valore mediana	Valore minimo	Valore massimo	Deviazion e standard
Flusso CH <sub>4</sub>	Moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	122	27	0,071	0,000	0,000	0,821	0,159
Flusso CO <sub>2</sub>		122	62	0,085	0,000	0,000	4,118	0,386
Flusso H <sub>2</sub> S		122	34	0,00023	0,0000	0,0000	0,00261	0,00045
Flusso COV <sup>1</sup>		122	4	0,00001	0,0000	0,0000	0,00059	0,00008

**Nota 1 il valore misurato è espresso in isobutilene.**

Mentre in Tabella 3 sono riportati i valori logaritmici (ln) corrispettivi di flusso misurato relativo ai punti con valori superiori al L.O.Q..

Tabella 3 Valori di flusso trasformati in logaritmo.

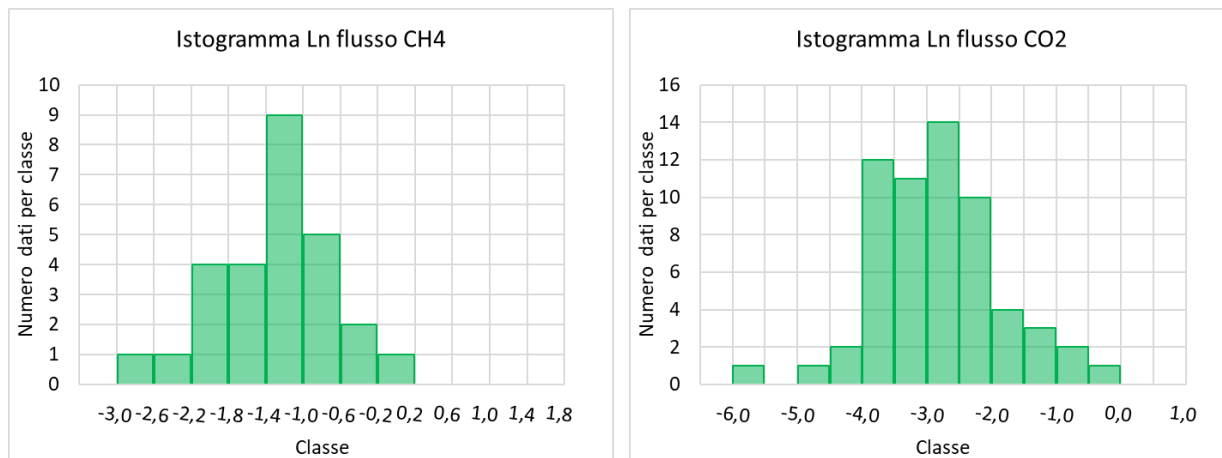
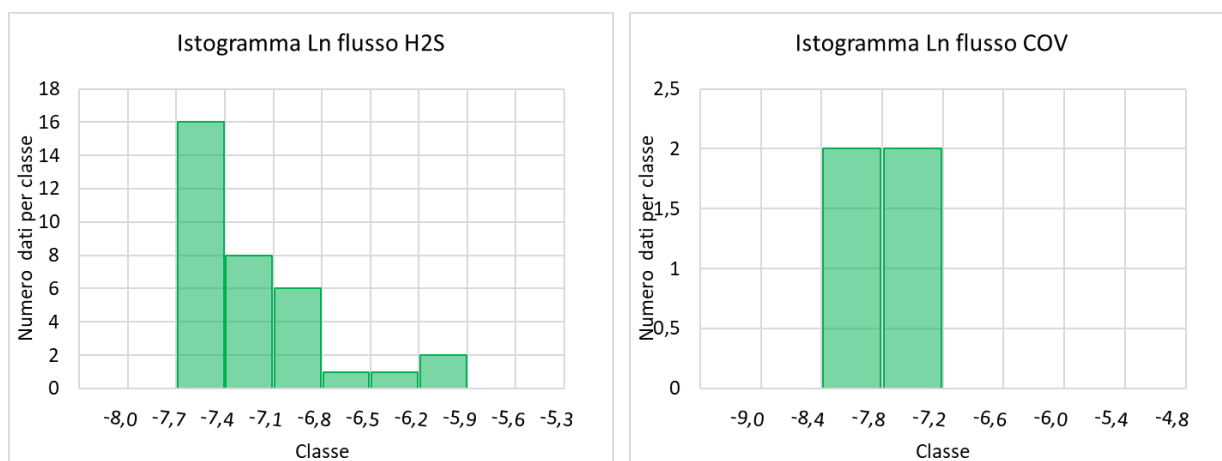
Parametro	Unità di misura	N° dati > L.o.Q.	Valore medio	Valore mediana	Valore minimo	Valore massimo	Deviazion e standard
Flusso CH <sub>4</sub>	Ln Moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	27	-1,316	-1,200	-2,995	-0,197	0,642
Flusso CO <sub>2</sub>		62	-2,756	-2,912	-5,775	-1,415	1,134
Flusso H <sub>2</sub> S		34	-7,221	-7,313	-7,699	-5,950	0,447
Flusso COV <sup>1</sup>		4	-7,843	-7,833	-8,266	-7,439	0,343

Sono possibili solo alcune elaborazioni grafiche e statistiche che, alla luce della numerosità dei dati inferiori al L.o.Q. (soprattutto per il l'acido solfidrico e composti organici) possono essere poco significative.

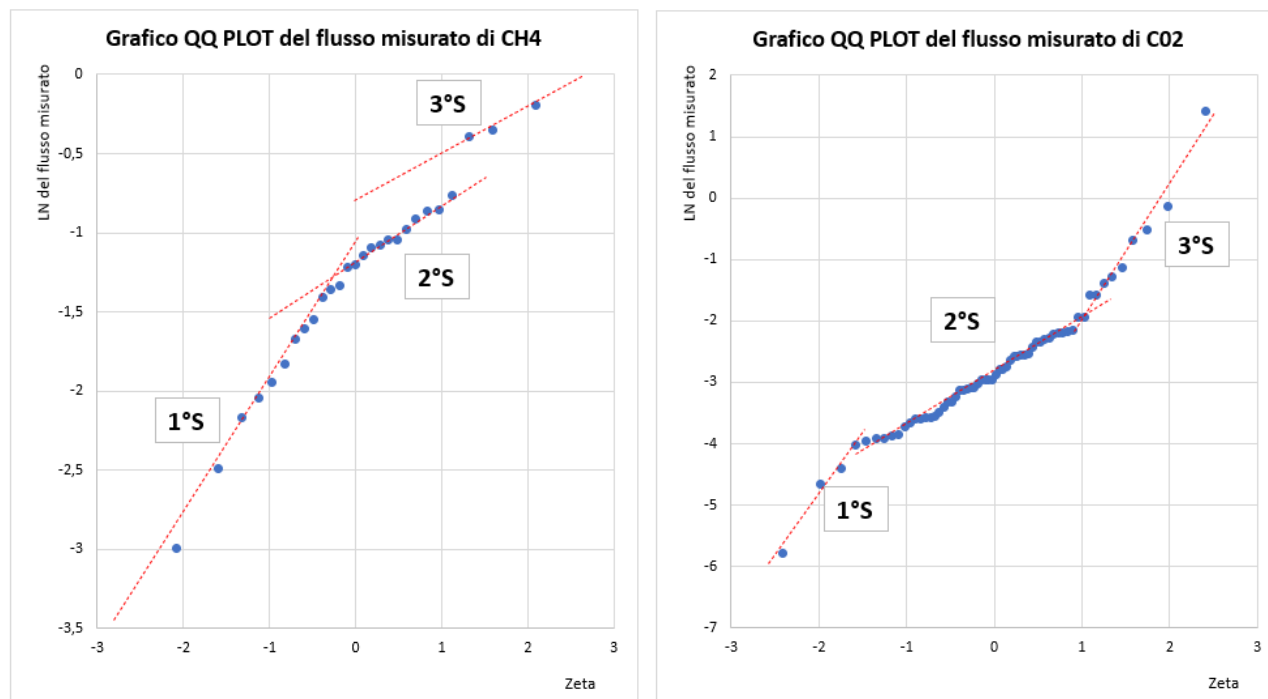
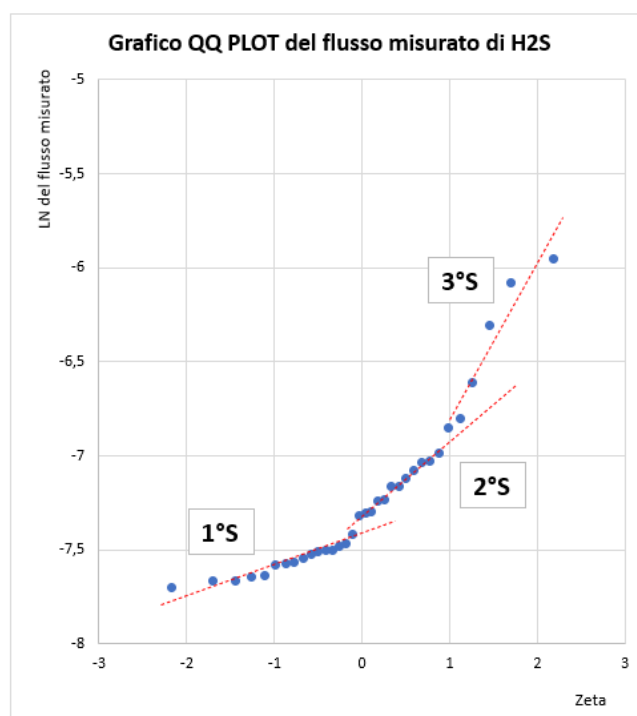
In particolare è significativo analizzare la distribuzione in istogrammi dei dati log trasformati ripartendoli in classe di egual ampiezza (ampiezza ottimale calcolata dall'algoritmo di Scott), in questo modo si possono visualizzare eventuali outliers e la forma della distribuzione permette l'individuazione di popolazioni di dati diverse.

Nella Figura 18 si riporta la distribuzione dei dati relativi al CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> dove la distribuzione dei dati del metano suggerisce la distribuzione polimodale. Per i dati di acido solfidrico e composti organici il numero dati esigui non danno informazioni significative.



Figura 18 Istogramma del logaritmo naturale dei flussi misurati di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.Figura 19 Istogramma del logaritmo naturale dei flussi misurati di H<sub>2</sub>S e COV.

Ulteriore informazione sui dati misurati può essere ricavata dall'utilizzo dei grafici QQ-Plot utilizzando sempre i dati log trasformati in confronto con le curve di probabilità cumulate così come rappresentate nella Figura 20 dove si conferma l'ipotesi polimodale dei dati misurati.

Figura 20 Grafico QQ Plot dei dati misurati di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> log trasformati.Figura 21 Grafico QQ Plot dei dati misurati di H<sub>2</sub>S log trasformati.

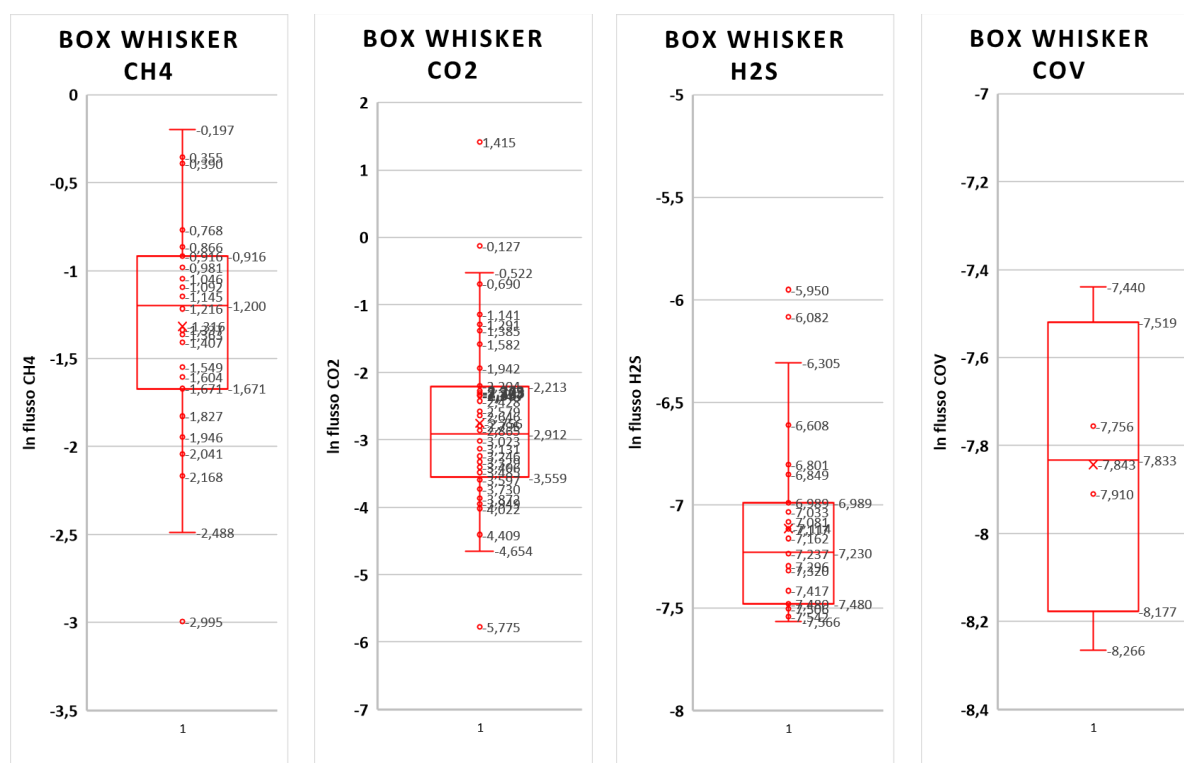
\* Non si riporta il grafico QQ Plot dei composti organici volatili per il ridotto numero di dati rilevabili.

M48 Rev 0 del 15/01/2016

Per la ricerca degli outliers si può ricorrere ai diagrammi box plot che forniscono la visualizzazione grafica della distribuzione dei dati mediante diagrammi "Box Whisker" dove viene riportata una "scatola" verticale caratterizzata da tre linee orizzontali rappresentanti, dal basso all'alto, il primo quartile, la mediana e il terzo quartile, oltre a due linee verticali che si allungano dalla scatola (Dette baffi o Whisker) al cui interno sono presenti i valori non outliers (la lunghezza di queste linee non deve superare 1,5 volte la distanza interquartile); nel caso specifico sono stati utilizzati per il metano tutti i data set dei valori maggior del L.o.Q. così come per l'anidride carbonica.

Dalla rappresentazione dei box whisker, vista la presenza di diverse popolazioni di dati i cui esponenti più elevati sono ben correlati, si ritiene di escludere la presenza di outliers vista la presenza di dati polimodali che verranno trattati con diverse curve interpolanti e che in questo modo garantiscono un dato cautelativamente più elevato.

Figura 22 Scatola a box della serie completa con valori &gt; L.o.Q.



In base alle famiglie rilevate di dati possiamo calcolare il flusso specifico della zona con ricopertura definitiva (superficie 48105 m<sup>2</sup>); i dati calcolati sono illustrati in Tabella 4 ed espressi in singolo contributo e come somma di tutte le famiglie dei singoli dataset.

Tabella 4 Valori riepilogativi delle misure effettuate.

Parametro	Identif. dati	Numero dati	Flusso medio (moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Flusso totale (moli/d-1)	Totale (moli/d-1)	Totale m <sup>3</sup> /h
CH <sub>4</sub>	Dati < L.o.Q	95	0,0015	56,1	3453,9	3,23
	1° S	11	0,1621	702,4		
	2° S	13	0,3572	1829,1		
	3° S	3	0,7332	866,3		
CO <sub>2</sub>	Dati < L.o.Q	60	0,002	35,4	4119,6	3,85
	1° S	4	0,011	16,8		
	2° S	49	0,061	1172,2		
	3° S	9	0,817	2895,1		
H <sub>2</sub> S	Dati < L.o.Q	88	0,0003	8,7	19,7	0,02
	1° S	16	0,0005	3,3		
	2° S	12	0,0008	3,7		
	3° S	6	0,0017	4,0		
VOC in isobutilene	Dati < L.o.Q	118	0,000125	5,8	6,5	0,01
	1° S	4	0,00041	0,6		

**Nota :** I valori di concentrazione riscontrati inferiori ai limiti di rilevabilità concorrono all'espressione delle somme e, conseguentemente, delle medie riportate nel rapporto di prova nella misura L.R./2 come indicato da "Rapporti ISTISAN 04/15" edito da Istituto Superiore della Sanità.

Il valore complessivo di emissione di biogas calcolato è di 7,1 m<sup>3</sup>/h con un rapporto molare fra CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pari a 0,83.



### 5.3.1 Carte isoflusso della discarica con copertura definitiva.

I dati misurati georeferenziati permettono un'elaborazione geostatistica utilizzando l'interpolazione IDW (Inverse Distance to Power) con fattore di potenza pari a 2 ed in assenza di fattore di smoothing (Capaccioni et al. 2005 A,B); in questo modo si possono generare delle griglie di dati che possono essere utilizzati per generare delle immagini con la rappresentazione dei contour con linee di isovalore, i dati di partenza e di interpolazioni sono espressi in moli  $\text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ .

Nelle Figura 23 Figura 24 sono riportati le isoconcentrazioni calcolate, dove appare evidente che i valori più elevati sono registrati nella parte più a nord e al centro della discarica.

Figura 23 Mappa dei flussi di  $\text{CH}_4$ .

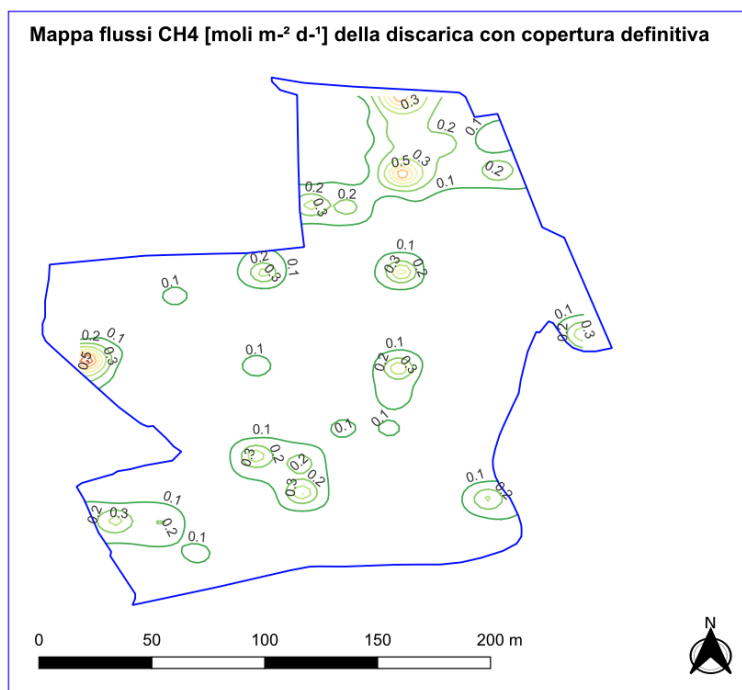
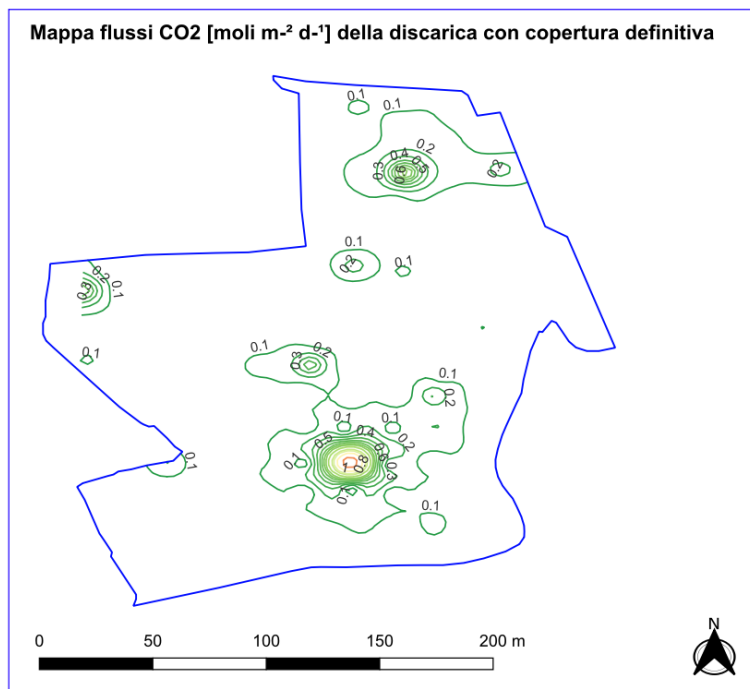
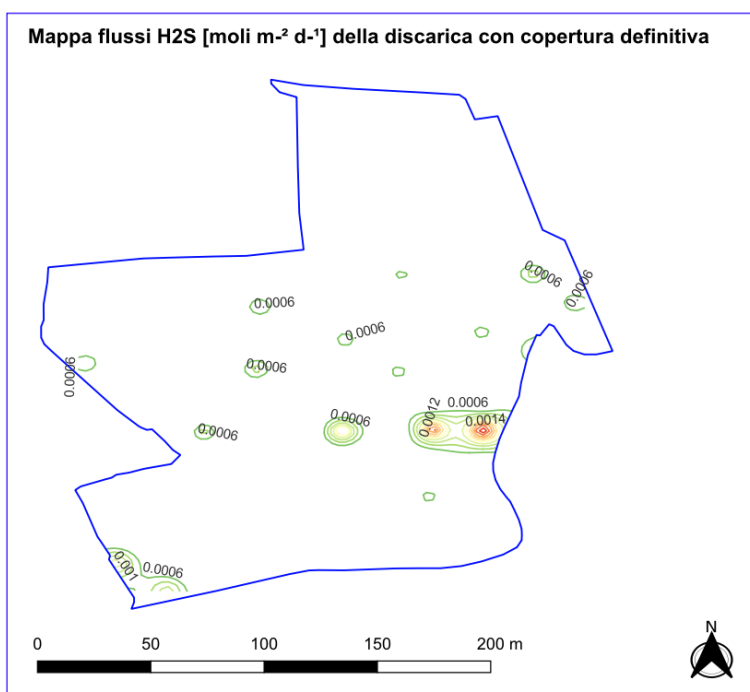


Figura 24 Mappa dei flussi di CO<sub>2</sub>.Figura 25 Mappa dei flussi di H<sub>2</sub>S.

## 5.4 Risultati delle misure dell'area con copertura provvisoria

Nell'area relativa alla discarica con copertura provvisoria sono stati posizionati 139 punti di misura con una maglia regolare di circa 20 metri, da Figura 26 a Figura 29 si riportano le emissioni misurate in scala di colori, mentre i descrittori dei risultati numerici ottenuti sono elencati in Tabella 5.

Figura 26 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di CH<sub>4</sub>.

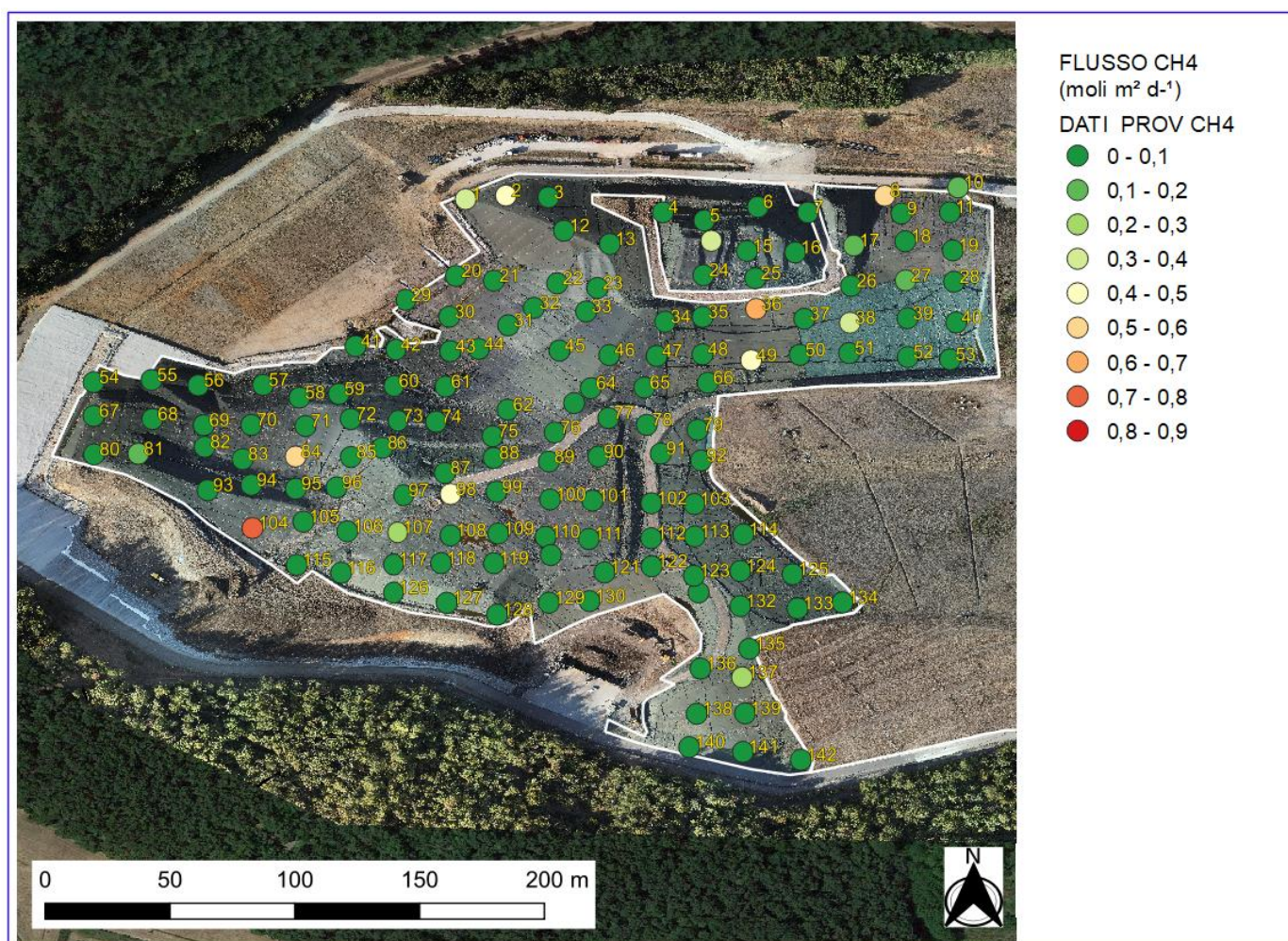




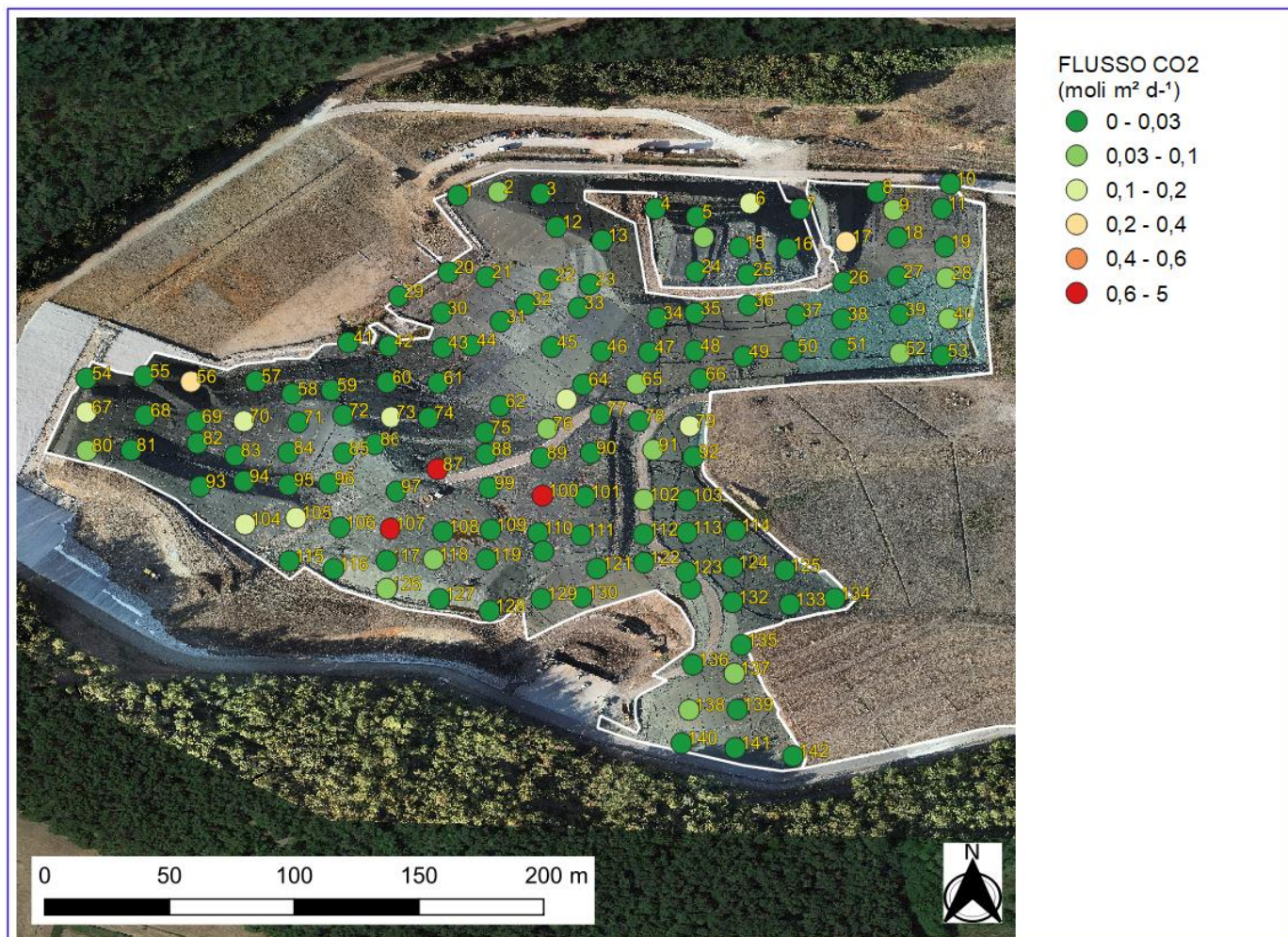
Figura 27 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di CO<sub>2</sub>.



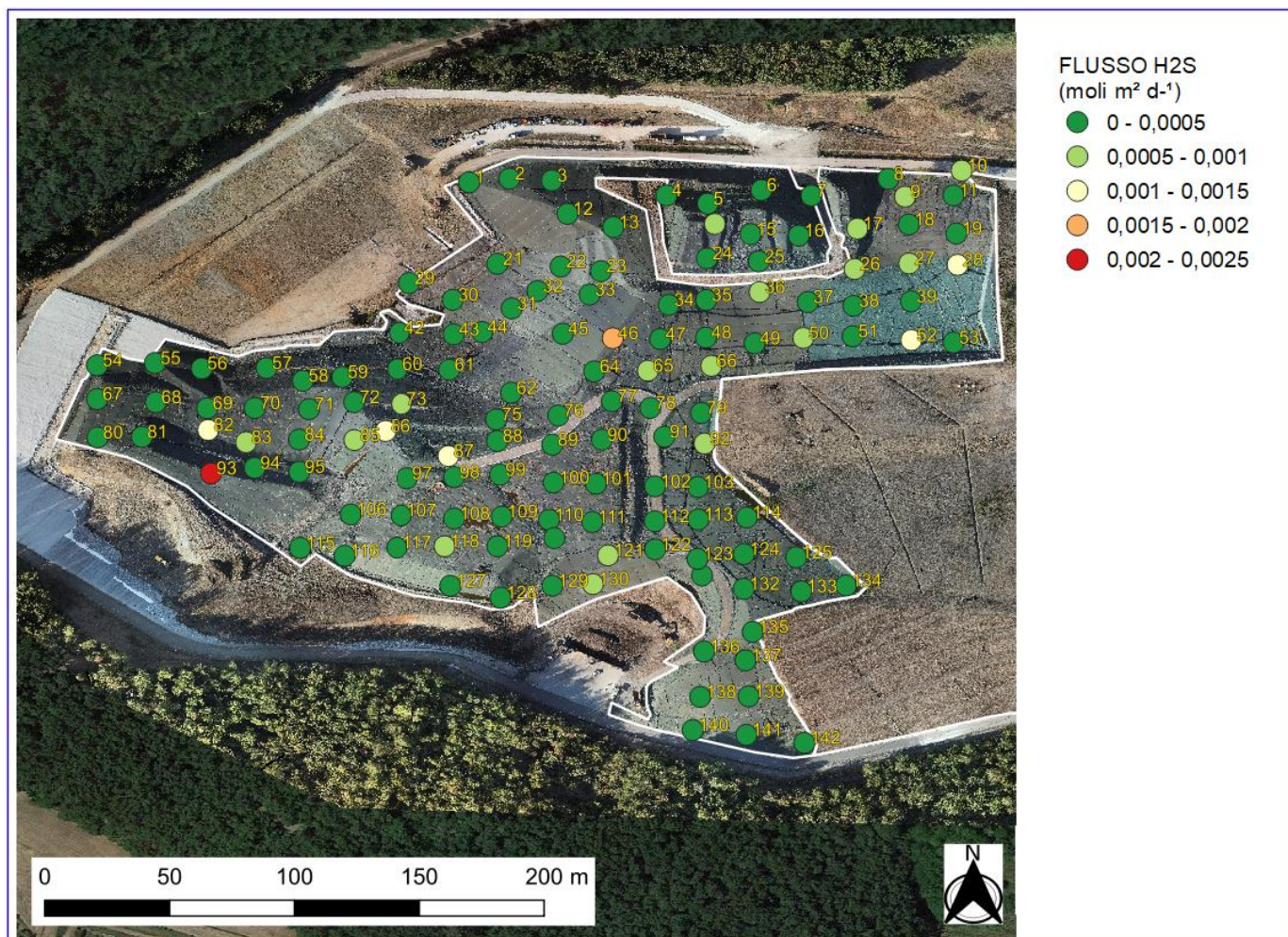
Figura 28 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di H<sub>2</sub>S.



Figura 29 Mappa dei punti con rappresentazione a scala di colori delle classi di emissione di COV.

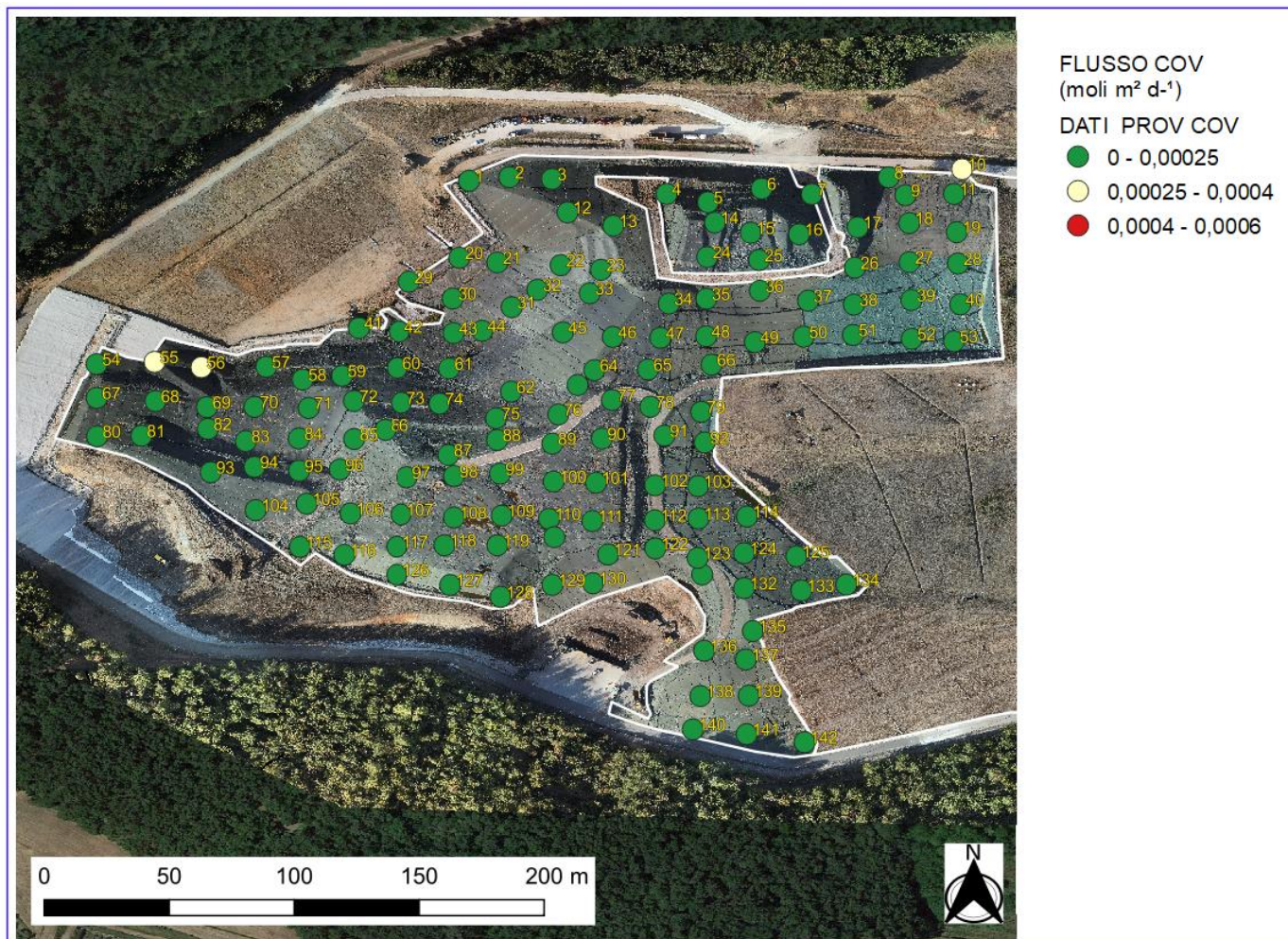


Tabella 5 Valori misurati sull'area con copertura provvisoria

Parametro	Unità di misura	N° punti misurati	N° dati > L.o.Q.	Valore medio	Valore mediana	Valore minimo	Valore massimo	Deviazioni e standard
Flusso CH <sub>4</sub>	Moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	139	19	0,046	0,000	0,000	0,784	0,137
Flusso CO <sub>2</sub>		139	38	0,095	0,000	0,000	5,776	0,582
Flusso H <sub>2</sub> S		139	36	0,0004	0,0000	0,0000	0,0044	0,0009
Flusso COV <sup>1</sup>		139	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000

Nota 1 il valore misurato è espresso in isobutilene.

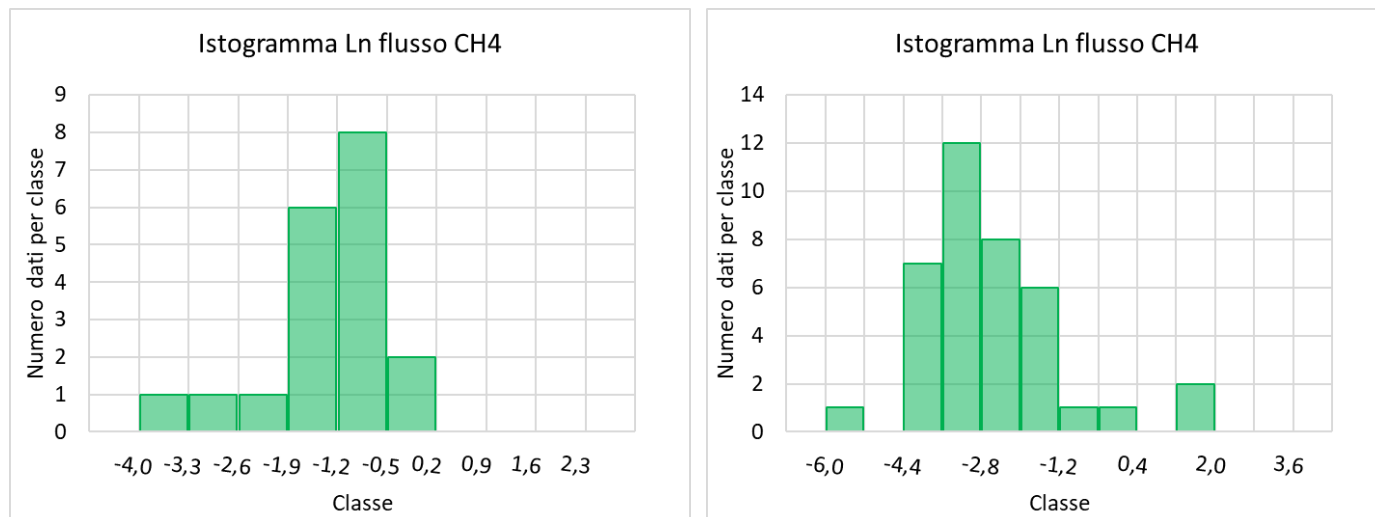
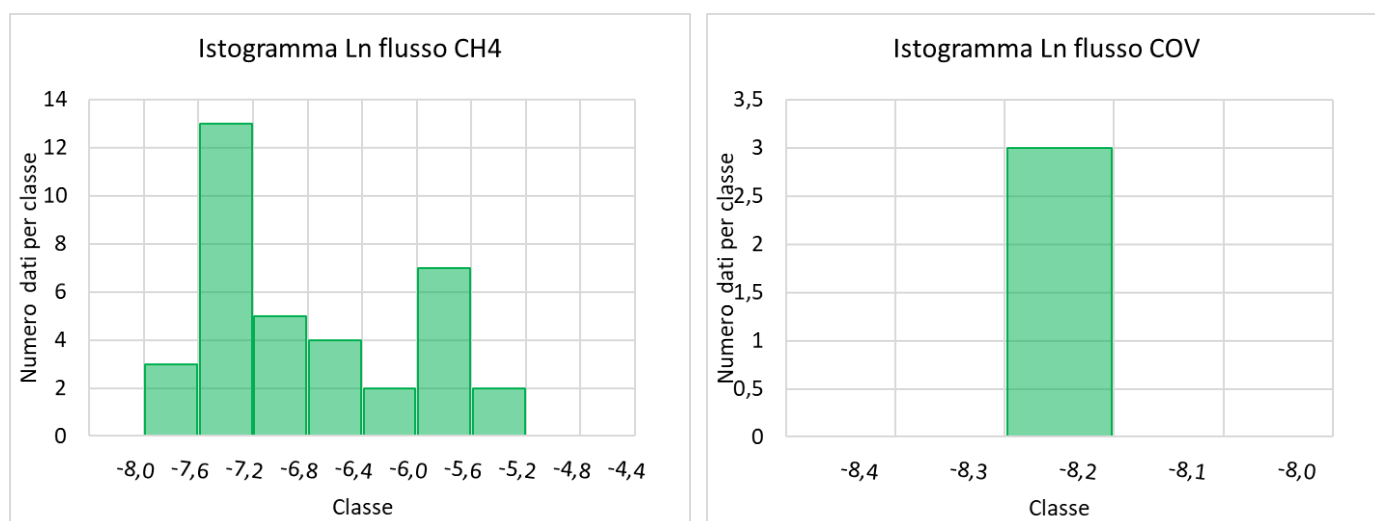
Mentre in Tabella 6 sono riportati i valori logaritmici (ln) corrispettivi di flusso misurato relativo ai punti con valori superiori al L.O.Q.

Tabella 6 Valori di flusso trasformati in logaritmo.

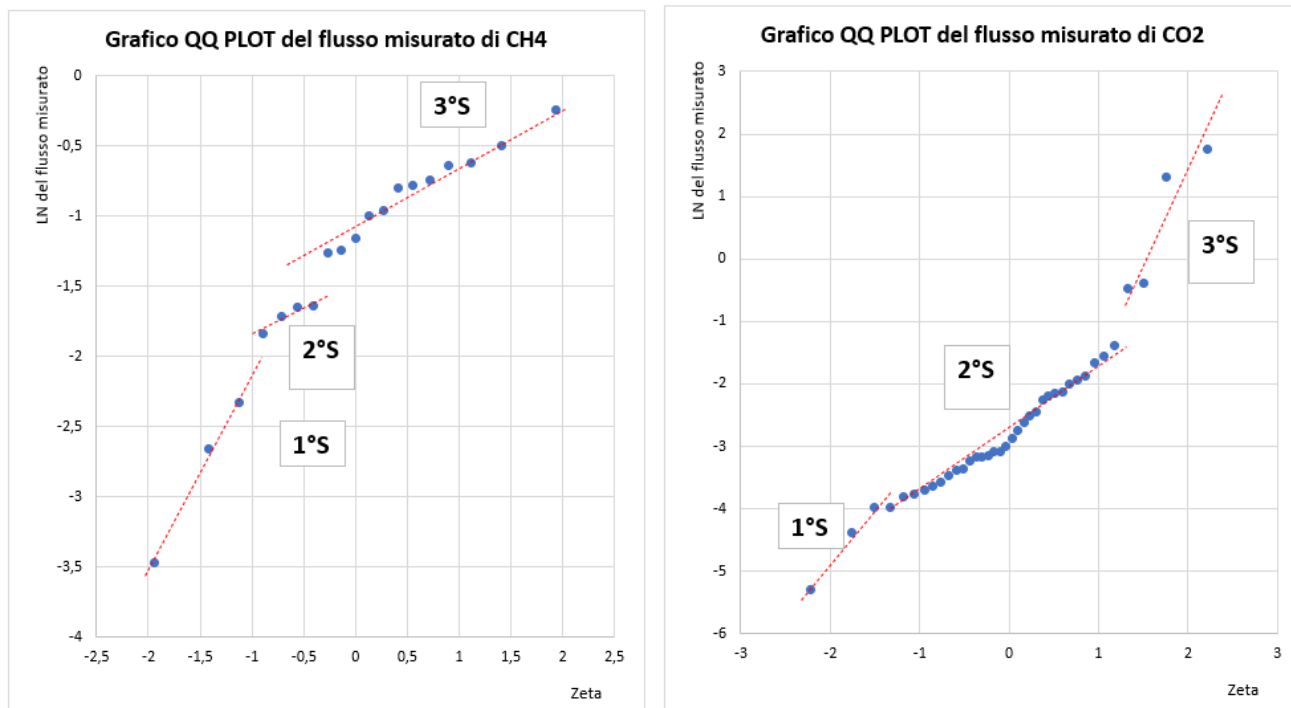
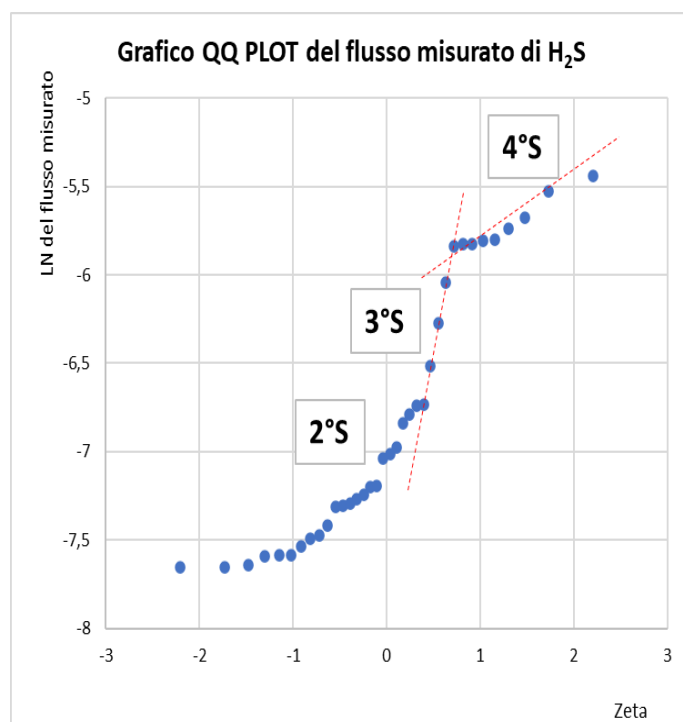
Parametro	Unità di misura	N° dati > L.o.Q.	Valore medio	Valore mediana	Valore minimo	Valore massimo	Deviazioni e standard
Flusso CH <sub>4</sub>	Ln Moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	19	-1,328	-1,159	-3,468	-0,243	0,816
Flusso CO <sub>2</sub>		38	-2,588	-2,928	-5,283	1,754	1,407
Flusso H <sub>2</sub> S		36	-6,802	-7,026	-7,656	-5,437	0,739
Flusso COV <sup>1</sup>		3	-8,257	-8,258	-8,258	-8,257	0,000

Sono possibili solo alcune elaborazioni grafiche e statistiche che alla luce della numerosità dei dati inferiori al L.o.Q. (soprattutto per l'acido solfidrico e composti organici volatili) possono essere poco significative. In particolare è significativo analizzare la distribuzione in istogrammi dei dati log trasformati ripartendoli in classe di egual ampiezza (ampiezza ottimale calcolata dall'algoritmo di Scott), in questo modo si possono visualizzare eventuali outliers e la forma della distribuzione permette l'individuazione di popolazioni di dati diverse.



Figura 30 Istogramma del logaritmo naturale dei flussi misurati di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>.Figura 31 Istogramma del logaritmo naturale dei flussi misurati di H<sub>2</sub>S e COV.

Ulteriore informazione sui dati misurati può essere ricavata dall'utilizzo dei grafici QQ-Plot utilizzando sempre i dati log trasformati in confronto con le curve di probabilità cumulate così come rappresentate nella Figura 32 dove si conferma l'ipotesi polimodale dei dati misurati.

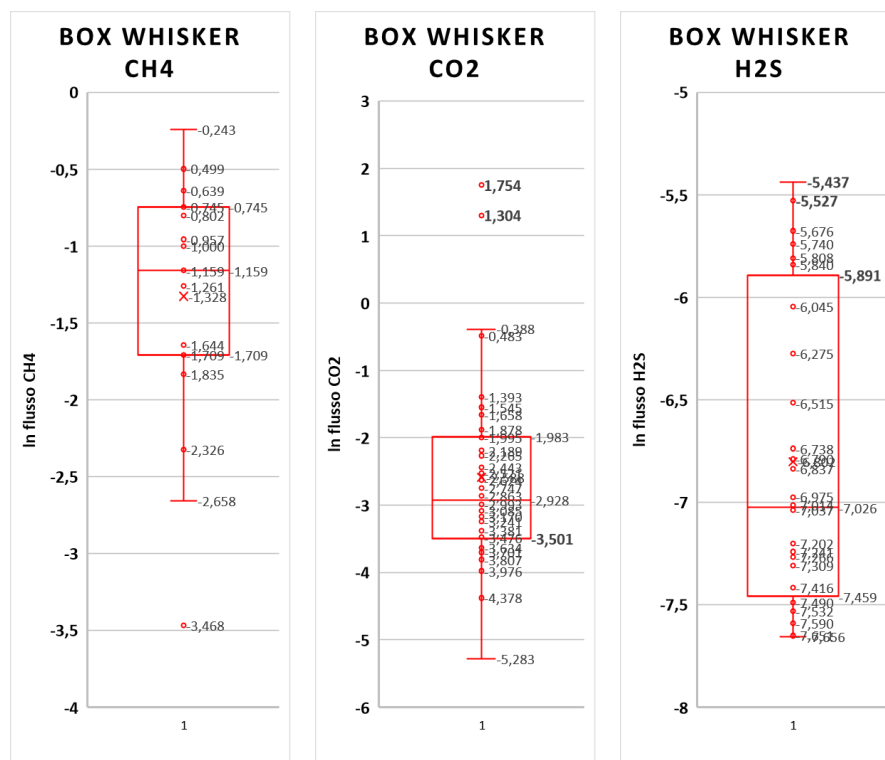
Figura 32 Grafico QQ Plot dei dati misurati di CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> log trasformati.Figura 33 Grafico QQ Plot dei dati misurati di H<sub>2</sub>S log trasformati.

Dai diagrammi Box Whisker dei dati alla ricerca di outliers sono stati utilizzati per il metano tutti i data set dei valori maggior del L.o.Q. mentre per l'anidride carbonica sono stati prima verificati l'intero data set (59 dati) poi solo i dati della serie di dati appartenenti alla serie più elevata (10 dati).

Per i dati di metano si esclude la presenza di outliers mentre per l'anidride carbonica, vista la presenza di diverse popolazioni di dati i cui esponenti più elevati sono ben correlati, si ritiene, anche per questo parametro, di escludere la presenza di outliers.



Figura 34 Scatola a box della serie completa con valori > L.o.Q. di CH<sub>4</sub> (a SX); della serie completa con valori > L.o.Q. di CO<sub>2</sub>(Centro); della serie completa con valori > L.o.Q. di H<sub>2</sub>S(a DX);



In base alle famiglie rilevate di dati possiamo calcolare il flusso specifico della zona con ricopertura provvisoria (superficie 59.029 m<sup>2</sup>); i dati calcolati sono illustrati in Tabella 7 ed espressi in singolo contributo e come somma di tutte le famiglie dei singoli dataset.

Tabella 7 Valori riepilogativi delle misure effettuate.

Parametro	Identif. dati	Numero dati	flusso medio (moli m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Flusso totale (moli /d-1)	Totale (moli /d-1)	Totale m <sup>3</sup> /h
CH <sub>4</sub>	Dati < L.o.Q	120	0,0015	76,4	2794,9	2,61
	1° S	4	0,0897	152,3		
	2° S	3	0,1898	241,8		
	3° S	12	0,4561	2324,3		
CO <sub>2</sub>	Dati < L.o.Q	101	0,0015	64,3	5686,3	5,31
	1° S	3	0,0121	15,5		
	2° S	31	0,0789	1039,1		
	3° S	4	2,6888	4567,4		
H <sub>2</sub> S	Dati < L.o.Q	103	0,00025	10,9	33,4	0,03
	1° S	6	0,00049	1,3		
	2° S	17	0,00078	5,6		
	3° S	5	0,00197	4,2		
	4° S	8	0,00336	11,4		
VOC in isobutilene	Dati < L.o.Q	136	0,000125	7,2	7,5	0,01
	1° S	3	0,00026	0,3		

**Nota:** I valori di concentrazione riscontrati inferiori ai limiti di rilevabilità concorrono all'espressione delle somme e, conseguentemente, delle medie riportate nel rapporto di prova nella misura L.R./2 come indicato da "Rapporti ISTISAN 04/15" edito da Istituto Superiore della Sanità.

Il valore complessivo di emissione di biogas calcolato è di 7,96 m<sup>3</sup>/h con un rapporto molare fra CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> è pari a 0,49 indice che rileva ossidazione del metano a favore dell'anidride carbonica.

#### 5.4.1 Carte isoflusso della discarica con copertura provvisoria

Con la stessa procedura riportata in capitolo 5.3.1 sono stati elaborati i dati per rappresentare delle mappe di isoconcentrazione che sono riportate nelle Figura 35, Figura 36 e Figura 37 dove vengono visualizzate le eventuali aree più emissive.

Figura 35 Mappa dei flussi di metano della area con copertura provvisoria.

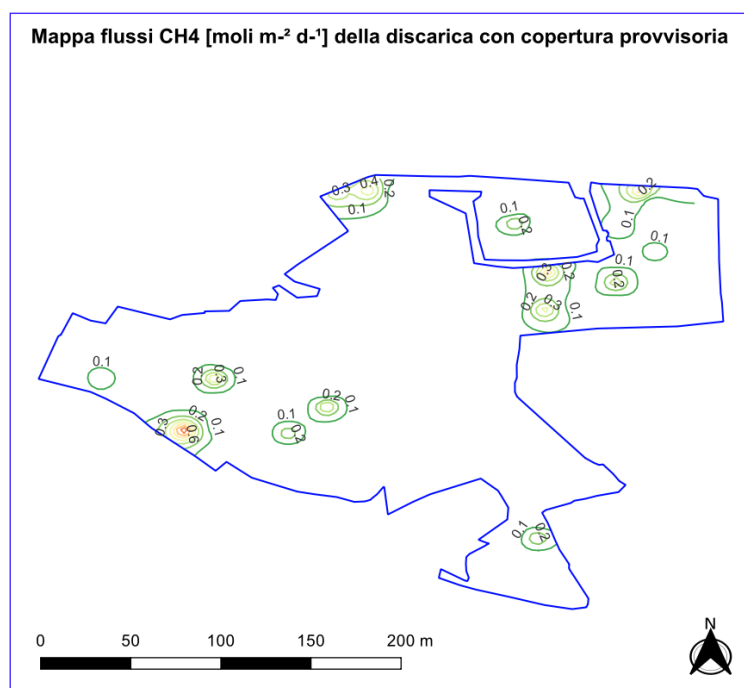




Figura 36 Mappa dei flussi di anidride carbonica della area con copertura provvisoria.

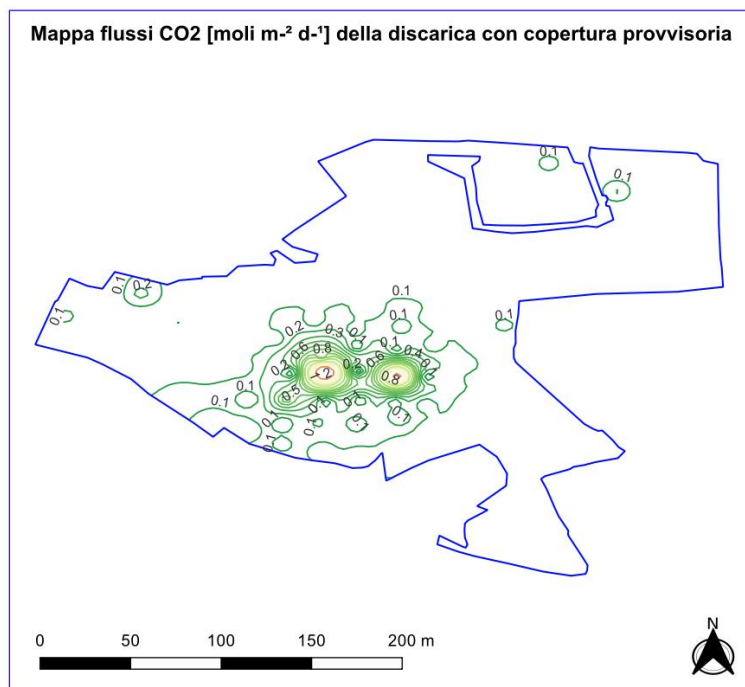
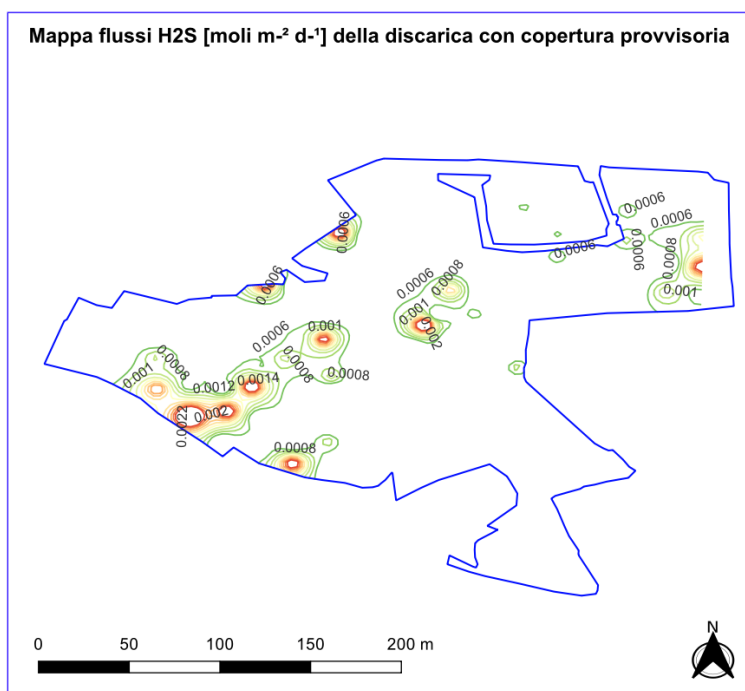


Figura 37 Mappa dei flussi di acido solfidrico della area con copertura provvisoria.



## 5.5 Fori e altri elementi con emissioni di biogas.

E' stata verificata la presenza di crepe e di altre vie preferenziali presenti oltre ad una valutazione delle parti dell'impianto di captazione che possa avere delle emissioni (pozzetti, tubazione ecc)

Dalla verifica visiva sono stati individuati sedici elementi la cui maggior parte nella zona con copertura provvisoria (13 dei 16 rilevati) sui tutti i punti sono stati determinati i flussi emissivi.

Considerando che tutti i fori hanno dimensioni ridotte e che pertanto sono confinabili all'interno della cappa, è stato possibile misurarli con la stessa procedura utilizzata per le precedenti determinazioni sulle aree di copertura definitiva o provvisoria. I dati rilevati sono stati riassunti in Tabella 8.

Tabella 8 Flussi misurati sui fori presenti sui teli.

Sigla Foro	X WGS 84	Y WGS 84	Copertura discarica	Flusso CH <sub>4</sub> Moli d-1	Flusso CO <sub>2</sub> Moli d-1	Flusso H <sub>2</sub> S Moli d-1	Flusso COV Moli d-1
F1	43°52,89974'	10°53,32637'	Provvisoria	1,14	4,45	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F2	43°52,89858'	10°53,32654'	Provvisoria	3,05	7,16	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F3	43°52,87896'	10°53,33857'	Provvisoria	0,15	0,26	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F4	43°52,89600'	10°53,28413'	Provvisoria	0,06	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F5	43°52,89546'	10°53,31946'	Provvisoria	2,87	10,88	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F6	43°52,86498'	10°53,23807'	Provvisoria	29,35	50,75	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F7	43°52,82590'	10°53,31919'	Provvisoria	0,13	0,53	< L.O.Q.	< L.O.Q.
F8	43°52,84853'	10°53,31174'	Provvisoria	2,40	0,35	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P1	43°52,87657'	10°53,36402'	Definitiva	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P2	43°52,85979'	10°53,37528'	Definitiva	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P3	43°52,82257'	10°53,41064'	Definitiva	0,02	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P4	43°52,88769'	10°53,36230'	Provvisoria	2,46	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P5	43°52,88125'	10°53,31315'	Provvisoria	0,16	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P6	43°52,88309'	10°53,26791'	Provvisoria	18,20	< L.O.Q.	< L.O.Q.	0,02
P7	43°52,86967'	10°53,18761'	Provvisoria	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.	< L.O.Q.
P8	43°52,87236'	10°53,21417'	Provvisoria	72,95	19,74	< L.O.Q.	0,01
Totale copertura provvisoria <sup>Nota</sup>				132,93	94,12	0,003	0,032
Totale copertura definitiva <sup>Nota</sup>				0,02	0,0004	0,0002	0,0004

**Nota:** I valori di concentrazione riscontrati inferiori ai limiti di rilevabilità concorrono all'espressione delle somme e, conseguentemente, delle medie riportate nel rapporto di prova nella misura L.R./2 come indicato da "Rapporti ISTISAN 04/15" edito da Istituto Superiore della Sanità.

Va considerato che ogni anomalia ha la sua superficie specifica di emissione che va considerata nel calcolo del valore da assegnare nel caso di flussi non rilevabili.



## 5.6 Emissioni complessive.

Dai dati esposti nei precedenti capitoli si possono ricavare i flussi emissivi complessivi dell'intera discarica ad esclusione delle zone in coltivo, nella Tabella 9 si raccolgono i dati caratteristici di ogni area e la loro somma.

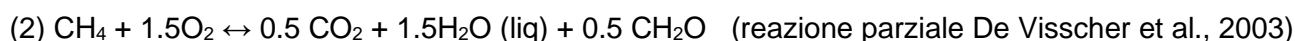
Tabella 9 Quadro riassuntivo delle emissioni diffuse.

Area discarica	Unità misura	Flusso CH <sub>4</sub>	Flusso CO <sub>2</sub>	Flusso H <sub>2</sub> S	Flusso COV
Zona con copertura definitiva	Moli d-1	3453,9	4119,6	19,7	6,5
Anomalie nella copertura definitiva	Moli d-1	0,022	0,0004	0,0002	0,0004
Totale zona con copertura definitiva	Moli d-1	3453,9	4119,6	19,7	6,5
	m <sup>3</sup> /h	3,23	3,85	0,018	0,006
Zona con copertura provvisoria	Moli d-1	2794,9	5686,3	33,4	7,5
Anomalie nella copertura provvisoria	Moli d-1	132,93	94,12	0,003	0,032
Totale zona con copertura provvisoria	Moli d-1	2927,8	5780,4	33,4	7,6
	m <sup>3</sup> /h	2,73	5,40	0,031	0,007
Totale discarica (escluso zona in coltivo)	Moli d-1	<b>6381,7</b>	<b>9900,0</b>	<b>53,1</b>	<b>14,0</b>
	m <sup>3</sup> /h	<b>5,96</b>	<b>9,25</b>	<b>0,050</b>	<b>0,013</b>
Rapporto metano e biossido di carbonio				<b>0,64</b>	

## 5.7 Stima dell'efficienza del sistema di captazione

Al fine di calcolare il rendimento complessivo dell'impianto di captazione è necessario conoscere la quantità di biogas che viene captato e di quello che viene rilasciato in atmosfera.

Al fine del calcolo bisogna premettere che, mentre la quantità captata è misurata in continuo mediante flange tarate montate allo scopo sulla linea di aspirazione, quello rilasciato in atmosfera non corrisponde a quello misurato dalle coperture perché lungo il percorso dagli strati profondi della discarica alla superficie subisce processi di ossidazione che variano il rapporto fra il contenuto di metano e l'anidride carbonica, le reazioni più probabili tratte da letteratura possono essere:



In questo caso le variazioni del rapporto  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  dipendono da diversi fattori quali umidità e tenore di ossigeno nel suolo, temperatura e il materiale organico che possono favorire le colonie batteriche.

Considerando che, nello stesso periodo in cui è stato fatto il presente monitoraggio, il committente ha incaricato un laboratorio per la caratterizzazione merceologica del biogas captato permettendoci di definire il rapporto  $\text{CH}_4/\text{CO}_2$  presente nel biogas profondo.

Nella Tabella 10 si riportano i dati forniti dal committente relativi alla composizione chimica mentre in Tabella 11 la quantità estratta di biogas misurato.

Tabella 10 Risultati analitici del biogas della discarica.

Rapporto di prova N°	Laboratorio che ha curato le analisi	Data campionamento	Metano	Biossido di carbonio
			(UNI EN ISO 6974-6 2007)	
23/000567026	Chelab srl	17/10/2023	22,35%	19,38 %

Tabella 11 Portata media di biogas estratto in concomitanza del monitoraggio delle emissioni diffuse.

Parametro	Periodo di riferimento	Unita misura	Valore
Portata estratta media	Giorni: 02/10/2023; 03/10/2023; 04/10/2023; 06/10/2023	m³/h	321

Per calcolare la quantità iniziale di biogas che poi si trasforma in quello misurato sulle ricoperture utilizziamo le due formule precedentemente illustrate in combinazione con i dati misurati sulle ricoperture e alle analisi chimiche relative alla composizione media del biogas profondo e relativo rapporto fra i due componenti principali.

In particolar modo nella Tabella 12 si riportano i valori calcolati di biogas non captato attraverso le due formule indicate.

Tabella 12 Quantità stimata di biogas non captato, tenendo conto delle reazioni (1) e (2).

Tipo di dato	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	Biogas (CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub> )
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h
Quantità misurata	5,96	9,25	15,21
Quantità non captata secondo la formula 1	8,14	7,06	15,21
Quantità non captata secondo la formula 2	8,94	7,75	16,70

Considerando le quantità captate si possono calcolare i rendimenti dell'impianto di estrazione del biogas considerando la seguente formula:

$$(3) \text{ Rendimento}(\eta) = \frac{\text{Biogas estratto}}{\text{Biogas estratto} + \text{non captato}} \times 100$$

In base alla formula possiamo calcolare i due valori estremi di rendimento di captazione riportati (vedi Tabella 13).

Tabella 13 Dati rendimenti di estrazione biogas.

Tipo di dato	Biogas non captato	Biogas captato	Rendimento estrazione
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	%
Quantità misurata	15,21	321	95,5
Quantità non captata secondo la formula 1	15,21	321	95,5
Quantità non captata secondo la formula 2	16,70	321	95,1

I dati riscontrati sono in linea con i dati storici registrati negli ultimi anni (vedi Tabella 14).



Tabella 14 dati storici rendimenti di estrazione biogas.

Anno di riferimento	Formula 1	Formula 2
2018	94 %	92 %
2019	95 %	93 %
2020	87 %	85 %
2021	95 %	95 %
2022	94 %	94 %
2023	96 %	95 %

## 6 CONCLUSIONI

L'obiettivo dell'indagine è la quantificazione delle emissioni complessive di biogas nelle sue costituenti principali  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  e altri composti caratteristici ( $\text{H}_2\text{S}$  e COV); a tal fine sono state effettuate preliminarmente delle riprese termografiche destinate all'individuazioni di anomalie termiche indice di possibile percorso preferenziale di migrazione del biogas dal sottosuolo e successivamente da una campagna per verificare la quantità emessa di metano, anidride carbonica, acido solfidrico e di composti organici volatili attraverso camera di accumulo statica non stazionaria posizionata su una griglia regolare e sui punti significativi rilevati durante la ripresa termografica o rilevati durante le misure stesse.

Dalle due indagini si possono trarre le osservazioni riportate nei successivi paragrafi.

In riferimento al rendimento di captazione del biogas, si segnala che i valori riscontrati sono allineati a quanto rilevato nei dati dei tre anni precedenti.

### 6.1 Zona con copertura definitiva.

L'area in oggetto si sviluppa per circa 48105 m<sup>2</sup> e presenta una superficie regolare con ridotte anomalie termiche limitate ad alcune aree con temperature più elevate rispetto al valore medio; dalle verifiche effettuate queste zone non rappresentano aree con particolari emissioni di biogas.

Dalle misure di emissioni diffuse risultano valori complessivi di biogas calcolato di 7,07 m<sup>3</sup>/h con un rapporto molare fra  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  pari a 0,84 (rispettivamente 3,23 m<sup>3</sup>/h di  $\text{CH}_4$  e di 3,85 m<sup>3</sup>/h di  $\text{CO}_2$ ), mentre per  $\text{H}_2\text{S}$  e COV sono stati rilevati alcuni valori superiore al L.O.Q. del metodo impiegato; a scopo cautelativo metà del valore limite rilevabilità è stato utilizzato per calcolare un flusso specifico nel caso di valori non rilevabili (Vedi Rapporti ISTISAN 04/15" edito da Istituto Superiore della Sanità).

I valori più elevati sono posizionati nella parte più a nord della discarica ma non sono così numerosi e aggregati per individuare un 'area con maggiori emissioni.

Rispetto allo storico i valori misurati risultano inferiori rispetto i dati dell'anno 2023.

### 6.2 Zona con copertura provvisoria.

L'area in oggetto si sviluppa per circa 59.029 m<sup>2</sup> e presenta una superficie molto irregolare.

Durante l'indagine sono stati riscontrati alcuni fori da cui veniva rilasciata una modesta quantità di biogas in atmosfera, alcuni altri punti critici sono stati rilevati in corrispondenza di pozzetti e del terreno a ridosso degli stessi. Le anomalie principali sono state segnalate alla gestione discarica che è successivamente intervenuta per risolverle.

Dalle misure di emissioni diffuse risultano valori complessivi di biogas calcolato di 8,1 m<sup>3</sup>/h con un rapporto molare fra CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> pari a 0,49 (rispettivamente 2,61 m<sup>3</sup>/h di CH<sub>4</sub> e di 5,31 m<sup>3</sup>/h di CO<sub>2</sub>), mentre per H<sub>2</sub>S e COV sono stati rilevati pochi valori superiore al L.O.Q. del metodo impiegato; a scopo cautelativo metà del valore limite rilevabilità è stato utilizzato per calcolare un flusso specifico (Vedi Rapporti ISTISAN 04/15" edito da Istituto Superiore della Sanità).

I fori rilevati contribuiscono in modo limitato ai flussi complessivi per quest'area, rispettivamente 0,12 m<sup>3</sup>/h di CH<sub>4</sub> e 0,09 m<sup>3</sup>/h di CO<sub>2</sub>).

Per i composti organici e l'acido solfidrico sono entrambi con valori prossimi o inferiori al limite di rilevabilità strumentale.

In generale, i dati del monitoraggio hanno permesso di determinare l'efficienza di captazione dell'impianto biogas che è risultata essere adeguata.