

Discarica per rifiuti Solidi Urbani (RSU) indifferenziati



Reattore biochimico

Reagenti = rifiuti (materia organica e materiali di natura essenzialmente inorganica) e l'acqua

Prodotti = **percolato** e **biogas**

Miscela di gas; utilizzato per il recupero energetico

Refluo liquido con elevato carico organico, che deve essere depurato

Prodotti

Raccolta ed estrazione (impianti di captazione)

CARATTERISTICHE E COMPOSIZIONE DEL BIOGAS

Miscela gassosa:

- ✧ *gas principali*

(limite inferiore 0,1% v/v, secco);

si formano nelle reazioni di biodegradazione della frazione organica dei rifiuti.

- ✧ *gas in tracce*

(limite superiore 0,1% v/v, secco);

sono le SOV: per la loro potenziale tossicità, alcune possono costituire un rischio per la salute e per l'ambiente.

Effetti del biogas sull'ambiente

Effetti locali (sull'ambiente circostante la discarica, entro un raggio di 3 km)
Effetti globali (determinano variazioni della composizione atmosferica).

La tossicità del biogas per l'uomo è dovuta soprattutto alle elevate concentrazioni di anidride carbonica. La CO_2 può infatti intervenire nei processi di scambio dell'ossigeno con il sangue, alte concentrazioni possono portare a disturbi nervosi e circolatori.

Gli effetti del biogas sulla vegetazione si possono esplicitare sia sull'apparato fogliare sia su quello radicale.

Gli stessi effetti sono dovuti alla presenza di metano o di etilene che può inibire la crescita anche a concentrazioni molto basse, di poco superiori a 0,1 ppm.

Un differente effetto ambientale è legato all'emissione di odori molesti dovuti alla formazione di composti organici (acidi grassi), di composti di zolfo o di azoto. Le quantità prodotte possono essere modeste, ma in certi casi sono necessarie diluizioni di oltre mille volte per riportare le concentrazioni entro la soglia di odore.

I gas principali

Componenti	Frazione percentuale
Metano	45-60
Biossido di carbonio	40-60
Azoto	2-5
Ossigeno	0,1-1,0
Solfuri, disolfuri, mercaptani, ecc,	0-1,0
Ammoniaca	0,1-1,0
Idrogeno	0-0,2
Monossido di carbonio	0-0,2
Gas in traccia	0,01-0,6
Caratteristiche	
Temperatura, °C	38-50
Contenuto di umidità	saturo
Potere calorifico superiore, kcal/Nm ³	3500-5000

H₂S

I gas principali

Peso molecolare e densità (0° C e 1 atm) dei gas principali emessi dalle discariche

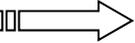
Gas	Formula	PM	Densità g/L
Aria		28,97	1,2928
Ammoniaca	NH ₃	17,03	0,7708
Azoto	N ₂	28,02	1,2507
Biossido di carbonio	CO ₂	44,00	1,9768
Idrogeno	H ₂	2,016	0,0898
Idrogeno solforato	H ₂ S	34,08	1,5392
Metano	CH ₄	16,03	0,7167
Monossido di carbonio	CO	28,00	1,2501
Ossigeno	O ₂	32,00	1,4289

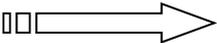
 **Il metano forma una miscela esplosiva (5 e 15% in aria).**

Esplosioni all'interno di una discarica: non esistono volumi di accumulo di gas di entità tale da consentire l'innesco di una esplosione.

La formazione di miscele esplosive è possibile nel sottosuolo all'esterno della discarica, se il biogas emigra nel suolo circostante mescolandosi con l'aria.

I gas in tracce SOV

Meccanismi:  evaporazione di composti già esistenti; reazioni chimiche; degradazione microbiologica di composti liquidi o solidi.

 la loro concentrazione nel biogas dipende quindi dall'equilibrio di ripartizione gas-liquido e gas-solido.

Composto	Concentrazione					
	media			massima		
	ppm(v/v)	mg/Nm ³	%	ppm(v/v)	mg/Nm ³	%
Benzene	2,057	6,57	1,59	39	124,6	1,55
Toluene	34,907	131,55	31,82	280	1055,2	13,09
Stirene	1,517	6,46	1,56	87	370,6	4,60
Etilbenzene	7,334	31,85	7,70	87,5	380,0	4,71
Xileni	2,651	11,51	2,78	38	165,0	2,05
Acetone	6,838	16,24	3,93	240	570,1	7,07
Metietilchetone	3,092	9,12	2,21	130	383,4	4,76
Diclorometano	25,694	89,25	21,59	620	2153,6	26,72
1,1-Dicloroetano	2,801	11,34	2,74	36	145,7	1,81
trans-1,2-Dicloroetene	0,036	0,15	0,04	0,85	3,4	0,04
1,1-Dicloroetene	0,13	0,52	0,12	4	15,9	0,20
Dietilene cloruro	2,835	16,59	4,01	20	117,1	1,45
Cloroformio	0,245	1,20	0,29	12	58,6	0,73
1,1,1-Tricloroetano	0,615	3,36	0,81	14,5	79,1	0,98
Tricloroetilene	2,079	11,17	2,70	32	172,0	2,13
1,1,2,2-Tetracloroetano	0,246	1,69	0,41	16	109,8	1,36
Tetracloroetilene	5,244	35,57	8,60	180	1220,8	15,15
Clorobenzene	0,082	0,38	0,09	1,64	7,6	0,09
Cloruro di vinile	3,508	8,97	2,17	32	81,8	1,01
Acetato di vinile	5,663	19,94	4,82	240	845,1	10,49
TOTALE		413,41			8059,3	

~80% dei SOV

Produzione del biogas

La quantità di biogas prodotto in una discarica dipende da tre tipologie di fattori.

- 1 Composizione merceologica del rifiuto (percentuale di sostanza organica biodegradabile presente nel RSU).

Questi fattori condizionano sia la quantità massima di biogas producibile sia la dinamica di produzione.

Generalmente, i materiali a base organica presenti nei RSU possono essere distinti in:

- i. materiali che si decompongono rapidamente, ossia nell'arco di tempo compreso tra tre mesi e cinque anni;
- ii. materiali che si decompongono lentamente, nell'arco di tempo compreso tra cinque e cinquanta, o più, anni.

1

	Biodegradabile rapidamente	Biodegradabile lentamente
Componente organica (RSU)		
Rifiuti da alimentari	x	
Giornali	x	
Carta	x	
Cartoni	x	
Plastica ^{a)}		
Tessili		x
Gomma		x
Pelle		x
Rifiuti da giardinaggio	x ^{b)}	x ^{c)}
Legno		x
Miscela organica		x

a) Le plastiche sono normalmente considerate non biodegradabili

b) Foglie ed erba tagliata. Tipicamente costituiscono il 60% dei rifiuti da giardinaggio

c) Frazione legnosa dei rifiuti da giardinaggio

La quantità di biogas prodotto dipende dalla frazione di materia organica biodegradabile effettivamente disponibile per la degradazione che, a sua volta, dipende fortemente dal contenuto in lignina.

1

	Contenuto in Lignina	Frazione biodegradabile ^{a)}
	(% di VS)	(%)
Rifiuti alimentari	0,4	82
Giornali	21,9	22
Carta	0,4	82
Cartoni	12,9	47
Rifiuti da giardinaggio	4,1	72

a) Frazione biodegradabile = $(0,83 - (0,028) * LC) * 100$;

Contenuto di Lignina, LC = % di VS, Solidi Volatili

Produzione del biogas

La quantità di biogas prodotto in una discarica dipende da tre tipologie di fattori.

2

“Grado di vuoto” nella massa di RSU nella discarica.
Grado di comminuzione (dimensioni delle parti solide) e grado di compattazione dei RSU.

Determinati dalle modalità di gestione dell’impianto durante la fase di “coltivazione” e, in particolare, dalle modalità di triturazione e di compattazione, dalla qualità e quantità di materiale di riporto utilizzato per il ricoprimento.

3

Condizioni metereologiche locali. Influenzano e condizionano il processo fermentativo perché determinano il bilancio idrico dell’impianto e, quindi, il grado di umidità presente nella massa in fermentazione.
L’acqua libera e quella presente in forma combinata condizionano sia la natura che l’attività degli enzimi.

Fattori che influenzano la produzione di biogas

- Composizione del rifiuto**
- Umidità**
- Sostanze nutritive**
- Densità e dimensioni caratteristiche del materiale**
- Temperatura**
- Concentrazione di ossigeno**
- Concentrazione di CO₂**
- pH**
- Pretrattamento di RSU**
- Compattazione**
- Sostanze tampone**

❑ **Composizione del rifiuto**

La composizione del RSU può variare da punto a punto della massa e, di conseguenza, la produzione di biogas può essere diversa in punti diversi. In presenza di sostanze tossiche che inibiscono la fermentazione, la produzione può ridursi fino al 50%; i composti inibenti possono essere già presenti nel RSU o originarsi nei processi ossidativi.

❑ **Umidità**

L'acqua è uno dei due reagenti, costituisce il mezzo di trasferimento dei nutrienti, determina l'attività enzimatica ed esercita un'azione di diluizione sui "reagenti" delle reazioni.

La formazione di biogas aumenta all'aumentare del tasso di umidità. Mediamente, i RSU hanno un contenuto di umidità compreso tra il 20% e il 35%. In discariche ubicate nel Nord Italia, sono state misurate variazioni di umidità del 45-70% nel corso di un anno.

❑ **Sostanze nutritive**

Devono essere disponibili in quantità sufficiente, nelle forme chimiche utili e in certe proporzioni ben definite.

□ Densità e dimensioni caratteristiche del materiale

Un aumento di densità comporta:

- (i) la riduzione della “capacità di campo” e l’aumento della dispersione e della distribuzione all’interno della massa dei rifiuti dei composti presenti nella fase acquosa;
- (ii) la diminuzione della superficie totale di contatto liquido-solido → diminuzione velocità di biodegradazione delle sostanze organiche.

Influenza sulla natura dei processi biologici: a bassi valori di densità, aumenta la diffusione dell’aria negli strati superficiali del materiale e i processi aerobici sono favoriti rispetto a quelli anaerobici.

□ Temperatura

La temperatura influenza fortemente la produzione di biogas.

La massima produzione si ha per temperature comprese tra 32 e 35 °C. Valori di temperatura maggiori di 75 - 80 °C possono interrompere la produzione di metano; le basse temperature incidono negativamente sulla formazione del biogas rallentando l’attività batterica.

I batteri termofili mostrano generalmente un tasso di produzione di biogas più elevato dei mesofili ma la maggior parte delle discariche presenta un ambiente microbico che opera in campo mesofilo (35 - 45 °C).

□ Concentrazione di ossigeno

La totale assenza di ossigeno nella matrice del rifiuto è condizione primaria per lo sviluppo delle popolazioni microbiche metanogene. L'ossigeno atmosferico può diffondere all'interno dello strato più superficiale della discarica ed essere utilizzato dai batteri aerobi, con formazione di acqua e anidride carbonica. La presenza di un sistema di captazione forzata di biogas può creare un campo di depressioni tale da richiamare l'ossigeno nel terreno circostante i pozzi di aspirazione, riavviando i processi aerobici negli strati superiori.

□ Concentrazione di anidride carbonica

Una elevata pressione parziale di anidride carbonica può inibire la successiva fase di metanogenesi, specialmente durante la fase aerobica.

□ pH

Le condizioni ottimali per lo sviluppo di biogas si hanno in ambiente neutro (pH 7,0 - 7,2); valori superiori a pH = 8 o inferiori a pH = 6 inibiscono fortemente l'attività batterica.

❑ Pretrattamento del RSU

Triturazione e macinazione per aumentare la superficie specifica reattiva, e vagliatura per separare la frazione organica da quella inorganica. Aumento della resa di produzione di biogas per effetto dell'aumentata superficie di scambio solido-acqua ma diminuzione della resa per effetto della diminuzione della capacità di campo del rifiuto.

❑ Compattazione

Compattazione del rifiuto effettuata durante le operazioni di coltivazione della discarica, e fenomeni di assestamento, che perdurano per anni anche dopo la chiusura della discarica.

La compattazione favorisce la produzione di biogas se il tasso di umidità è nettamente inferiore alla capacità di campo mentre, se il tasso di umidità è molto elevato, la compattazione ha un effetto negativo perché porta alla formazione di liquido che può ostacolare la produzione e la migrazione del biogas.

❑ Sostanze tampone

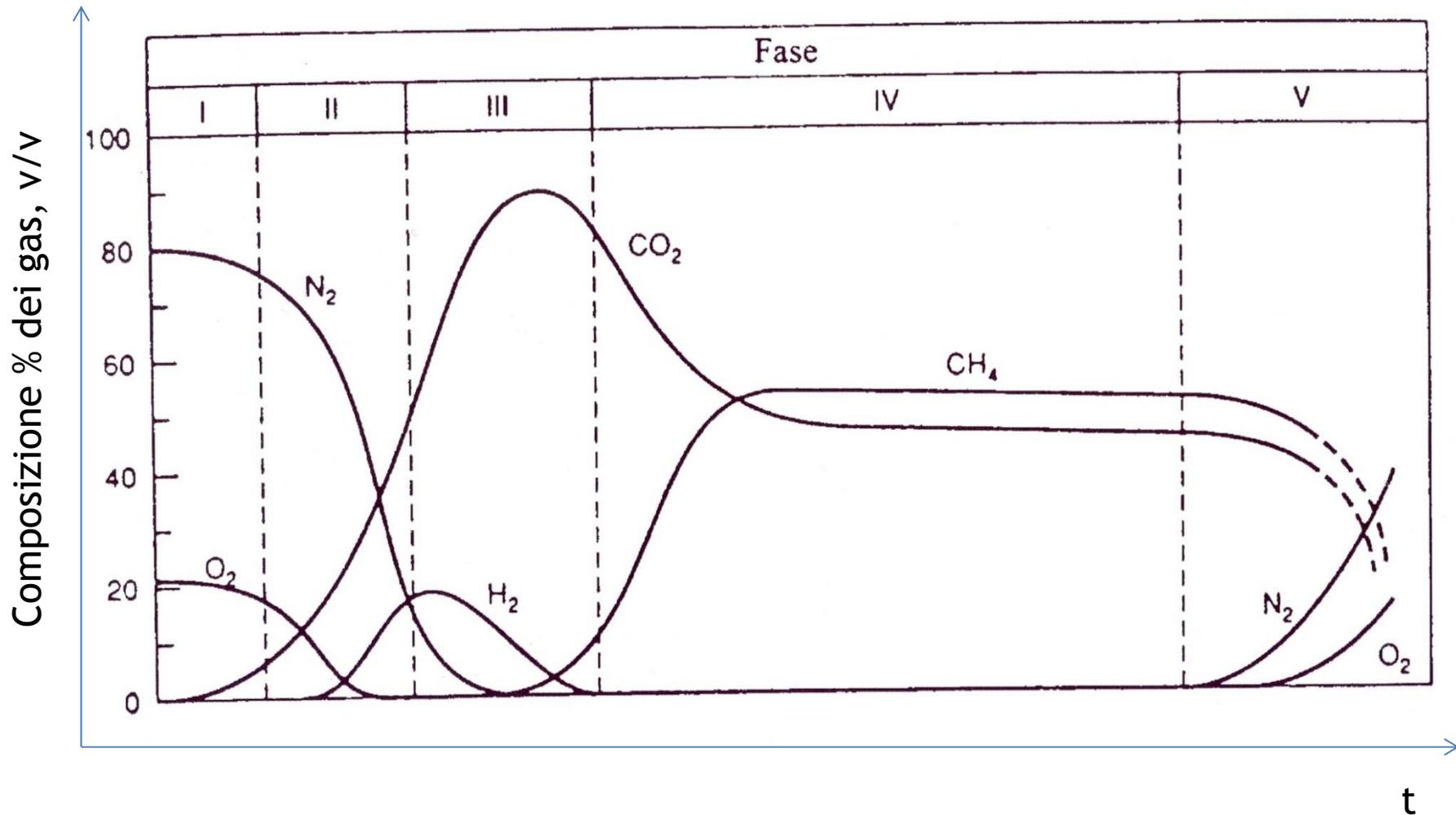
L'aggiunta di sostanze con azione tampone accelera il processo di fermentazione, mantiene il pH nell'intervallo ottimale per l'attività batterica.

Le sostanze tampone più comuni sono i bicarbonati di sodio e di calcio. Questi composti possono essere apportati.

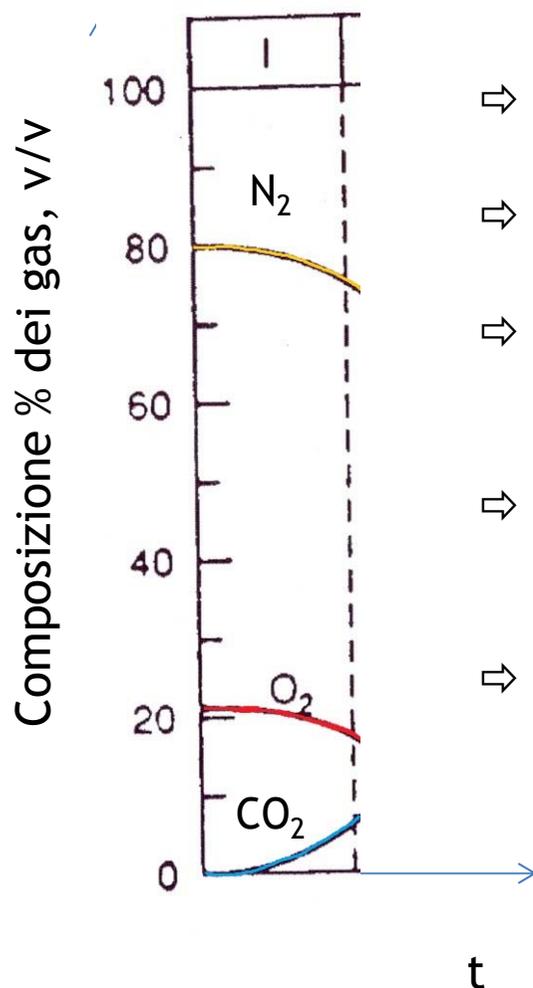
Si deve tuttavia tenere presente che un eccesso di alcalinità (pH maggiori di 9) comporta un blocco dell'attività metanigena e può portare a una mobilizzazione di sostanze inibenti sciolte nel percolato.

FORMAZIONE DEI COMPOSTI PRESENTI NEL BIOGAS

Reazioni di formazione dei gas principali

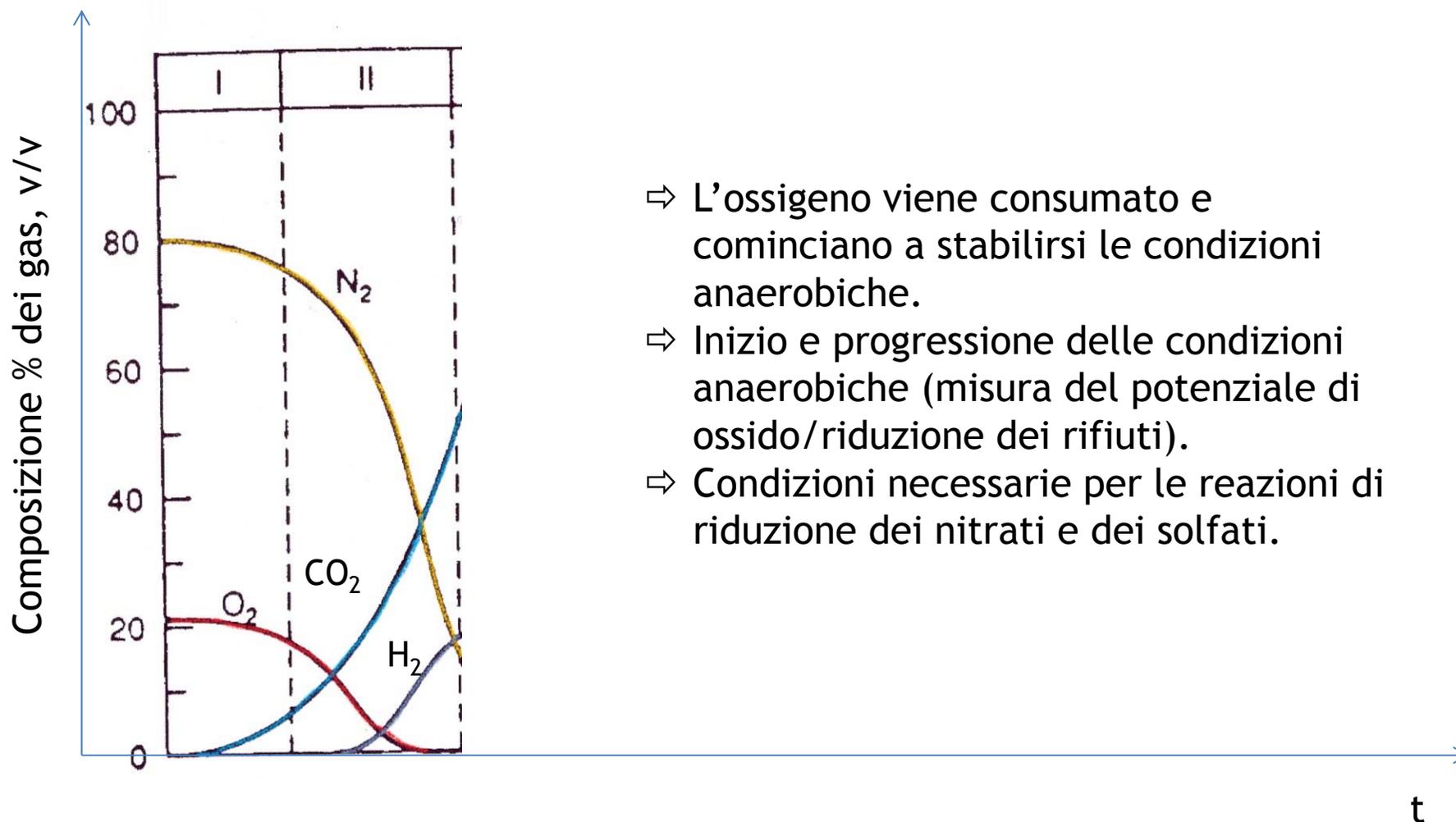


Fase I: La formazione iniziale e



- ⇒ Comincia subito dopo la messa in discarica dei RSU e continua per un certo periodo di tempo.
- ⇒ Inizia l'attacco dei microorganismi ai componenti organici biodegradabili dei RSU.
- ⇒ Decomposizione in condizioni aerobiche (nello strato di rifiuti appena ricoperti è presente una certa concentrazione di ossigeno).
- ⇒ I microorganismi, sia aerobici che anaerobici, sono presenti nel terriccio e nel materiale che viene utilizzato per la copertura della discarica.
- ⇒ Altre fonti di microorganismi possono essere i fanghi da trattamento di acque urbane e il percolato riciclato in discarica.

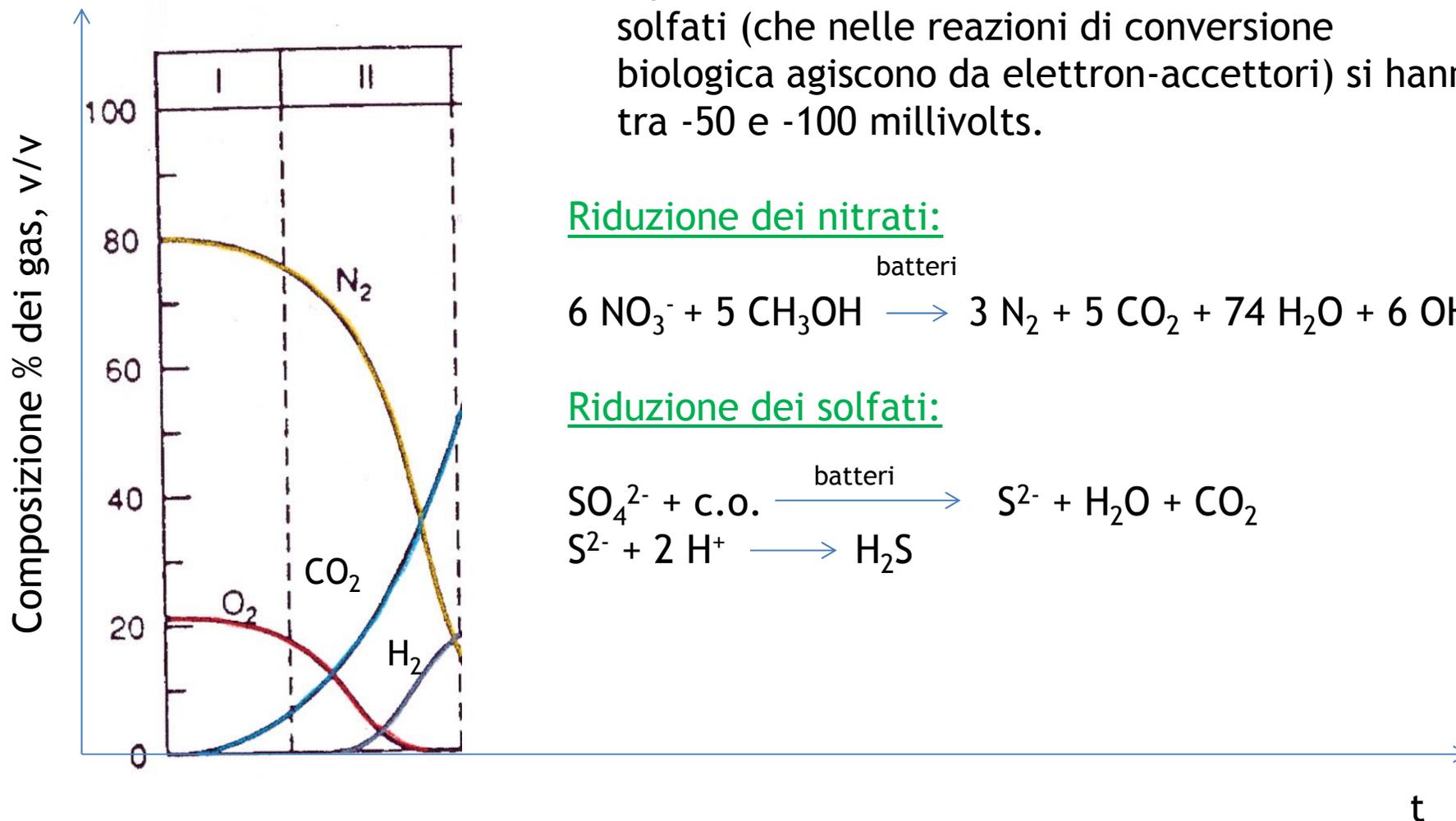
Fase II: La fase di transizione



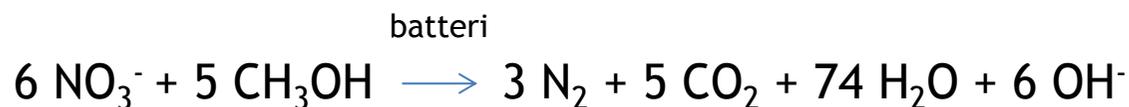
- ⇒ L'ossigeno viene consumato e cominciano a stabilirsi le condizioni anaerobiche.
- ⇒ Inizio e progressione delle condizioni anaerobiche (misura del potenziale di ossido/riduzione dei rifiuti).
- ⇒ Condizioni necessarie per le reazioni di riduzione dei nitrati e dei solfati.

Fase II: La fase di transizione

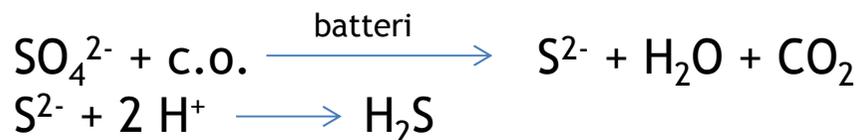
⇒ Tipiche le reazioni di riduzione dei nitrati e dei solfati (che nelle reazioni di conversione biologica agiscono da elettroni-accettori) si hanno tra -50 e -100 millivolts.



Riduzione dei nitrati:

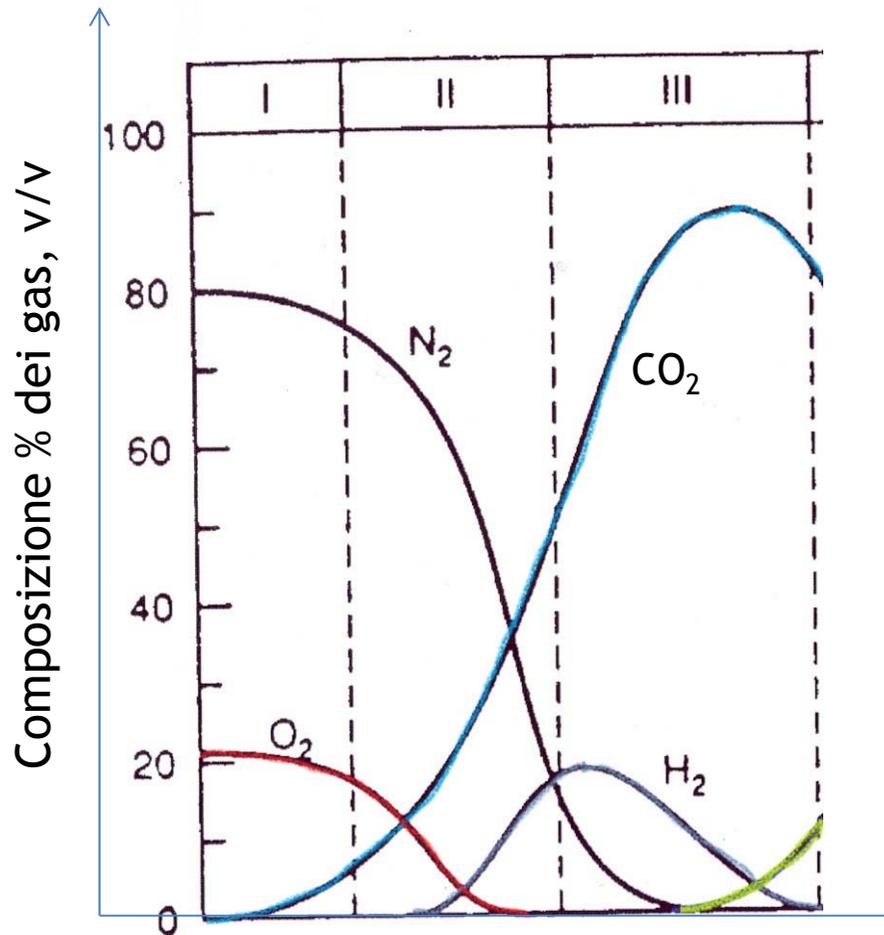


Riduzione dei solfati:



Fase III: La fase acida

A valori del potenziale di ossido/riduzione inferiori a -150 millivolts, la velocità delle reazioni biologiche aumenta notevolmente e cominciano a prevalere i microorganismi responsabili della trasformazione del materiale organico in acidi organici e altri prodotti intermedi.

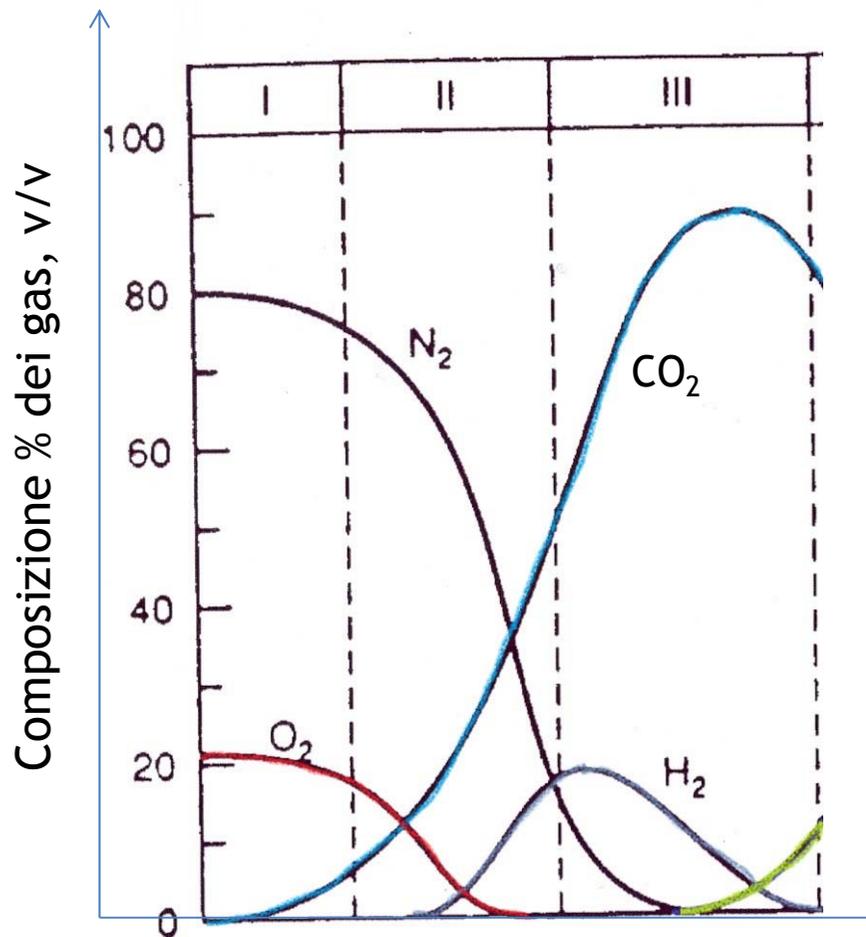


Nel **primo stadio** i composti organici a elevato peso molecolare (lipidi, polisaccaridi, proteine e acidi nucleici) subiscono reazioni di idrolisi mediate da enzimi, che portano alla formazione di composti di peso molecolare minore, adatti per essere utilizzati dai microorganismi come sorgente di energia e di carbonio per la sintesi cellulare.

Nel **secondo stadio** del processo, le reazioni di acidogenesi i prodotti delle reazioni del primo stadio in composti a peso molecolare ancora più basso: tipicamente CH₃COOH, e piccole quantità di acido fulvico e altri acidi organici più complessi. Batteri acidogenici o generatori di acidi.

Fase III: La fase acida

Il gas prodotto in maggiori quantità in questa fase è l'anidride carbonica, assieme a piccole quantità di idrogeno.



Per effetto della solubilità in acqua dei composti organici che si formano in questa fase, aumentano la domanda biochimica di ossigeno (BOD), la domanda chimica di ossigeno (COD) e la conducibilità del percolato.

Infine, anche molti nutrienti essenziali per la sintesi cellulare vengono solubilizzati dal percolato e sottratti ai rifiuti; può essere quindi opportuno un parziale riciclo del percolato.

Se non si ha produzione di percolato, i prodotti delle reazioni che avvengono in questa fase rimangono tutti all'interno della discarica, adsorbiti nel materiale solido oppure disciolti nell'acqua comunque presente.

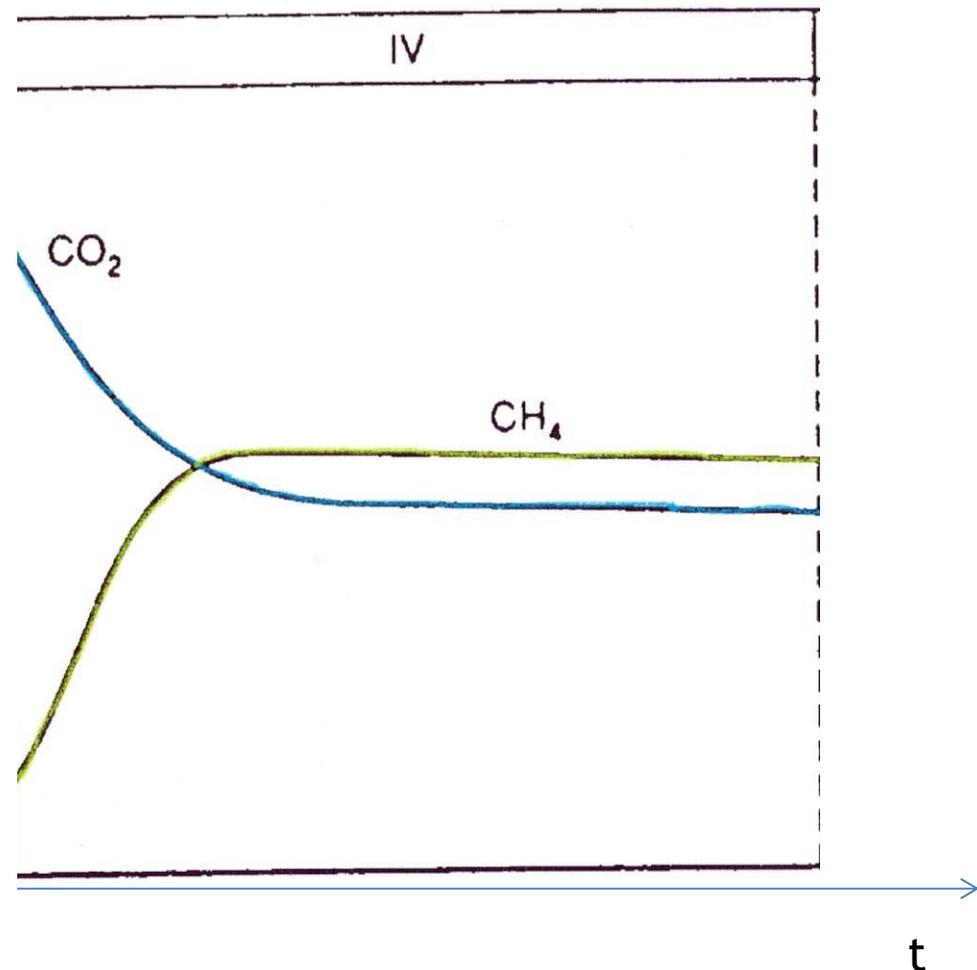
Fase IV: La fase di fermentazione a metano

⇒ microorganismi (metanogenici) che operano la conversione in CH_4 e CO_2 degli acidi organici e dell'idrogeno formati durante la fase III, operano in condizioni strettamente anaerobiche.

Il pH all'interno della discarica tra 6,8 e 8,0.

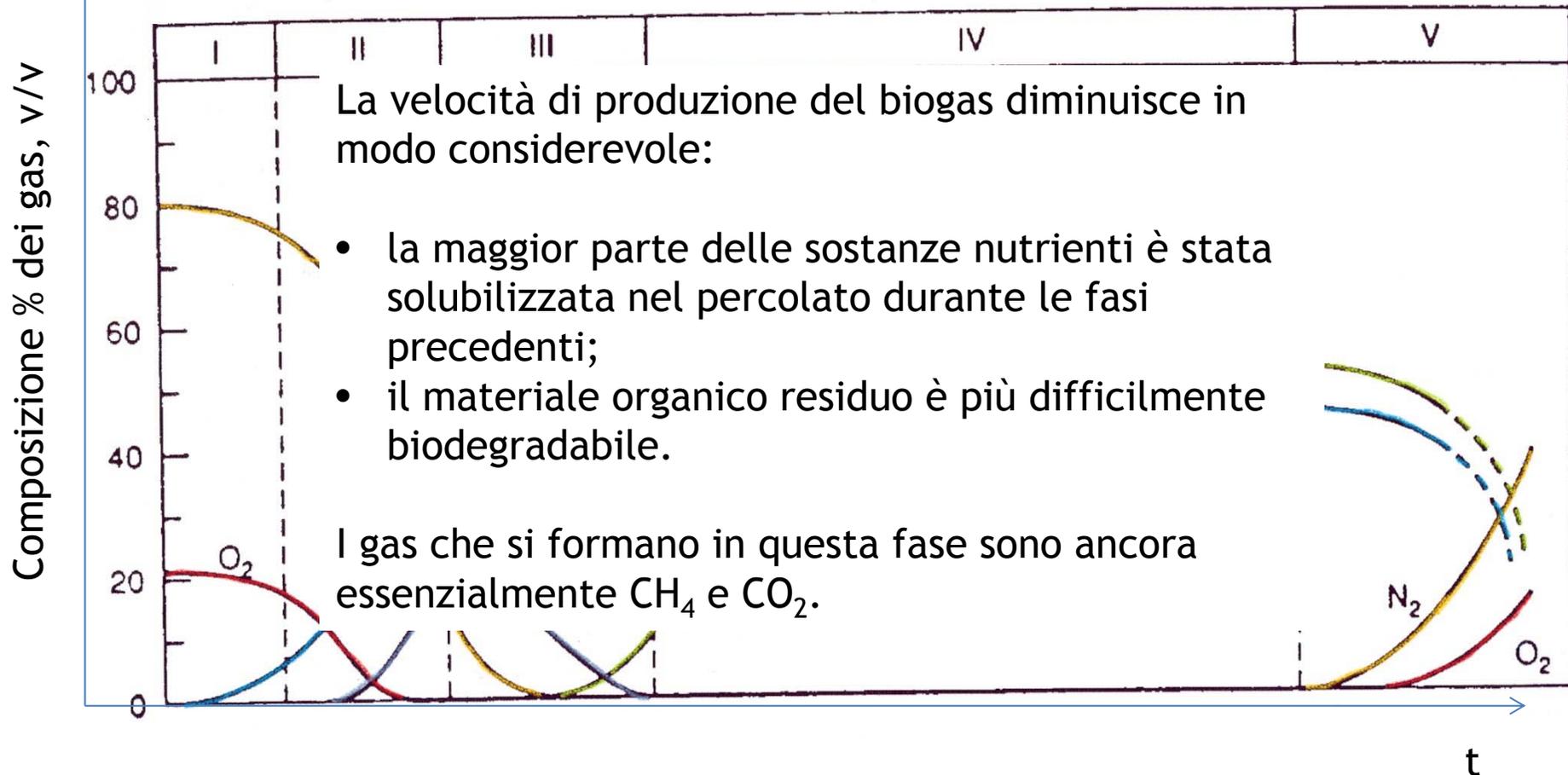
Anche il pH del percolato tende ad aumentare; a questi valori di pH molti metalli pesanti tendono a precipitare, con conseguente diminuzione della loro concentrazione nel percolato.

Per effetto delle reazioni di riduzione, diminuiscono anche il BOD, il COD e la conducibilità del percolato.



Fase V: La fase di maturazione

- ⇒ Inizia quando tutto il materiale organico facilmente accessibile alle reazioni di biodegradazione è stato trasformato.
- ⇒ Per effetto del flusso di acqua attraverso i rifiuti, diventa disponibile per le reazioni di biodegradazione anche il materiale organico che inizialmente era difficilmente accessibile.

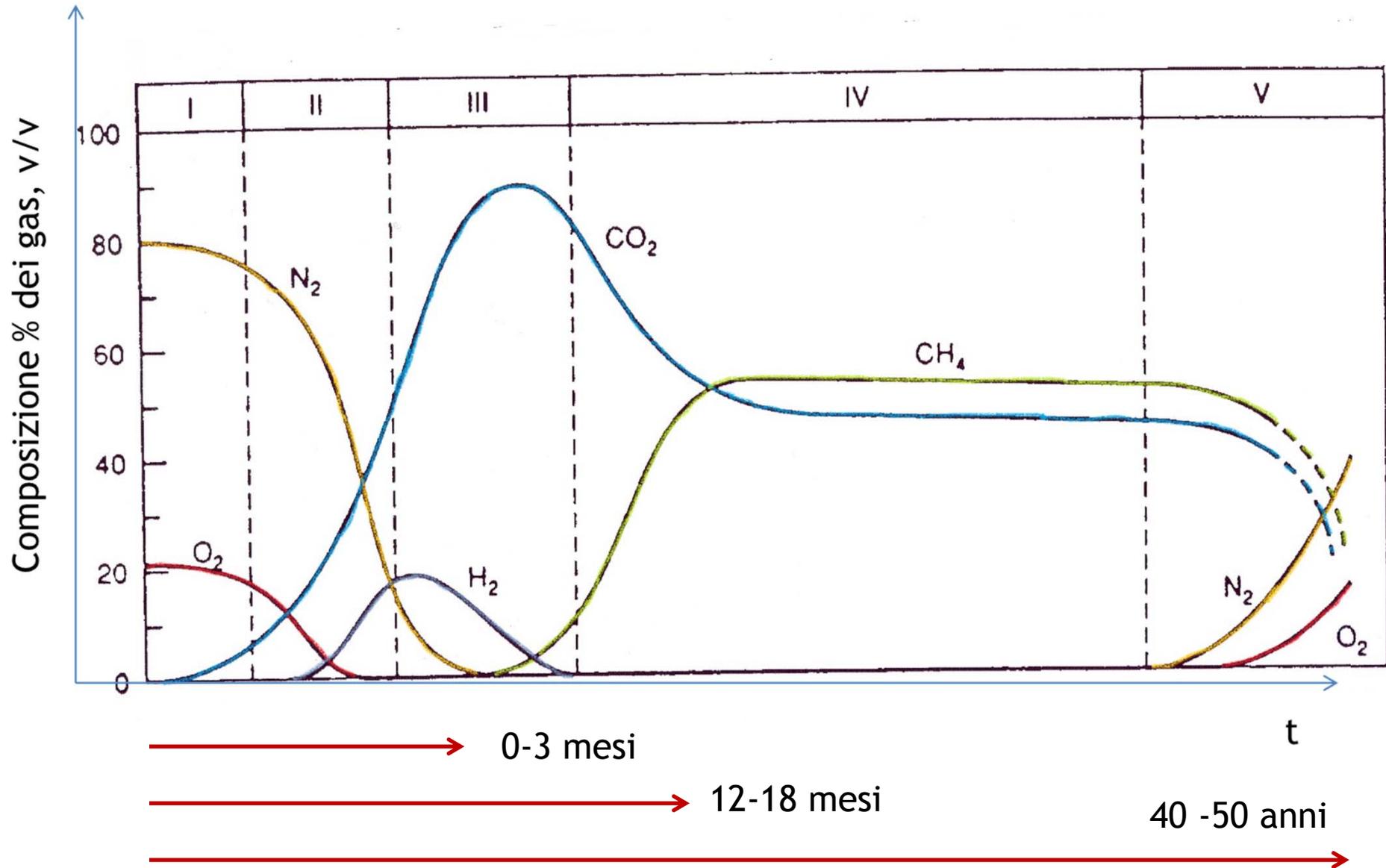


Durata del I e fasi

La durata di ciascuna fase di produzione del biogas è molto variabile e dipende da:

- quantità di RSU smaltiti
- loro composizione iniziale
- distribuzione del materiale organico all'interno della massa
- compattazione iniziale
- Biodegradabilità
- disponibilità di nutrienti
- presenza di sostanze inibenti
- umidità iniziale dei rifiuti
- circolazione di acqua all'interno della massa
- temperatura e dal pH.

Durata del I e fasi



Stima della produzione di biogas

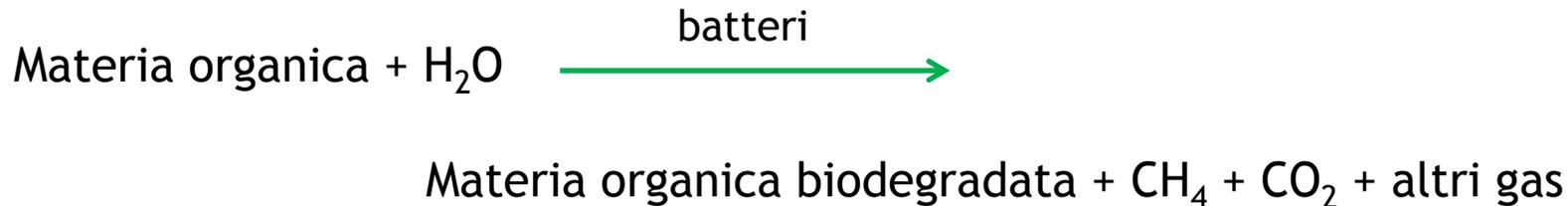
La quantità di biogas producibile da una discarica può essere espressa come stima:

- i. del volume totale di biogas prodotto dall'unità di massa di RSU (Nm^3/t), ossia come stima del biogas prodotto in tempi dell'ordine di grandezza di quello dell'esaurimento della discarica;
- ii. della velocità specifica di produzione ($\text{Nm}^3/\text{t anno}$)

Stima della produzione di biogas

Stima del volume di biogas prodotto per unità di massa (Nm³/t)

La reazione per la decomposizione anaerobica dei RSU:



La quantità totale teorica di biogas prodotto è determinata dalla stechiometria della reazione.

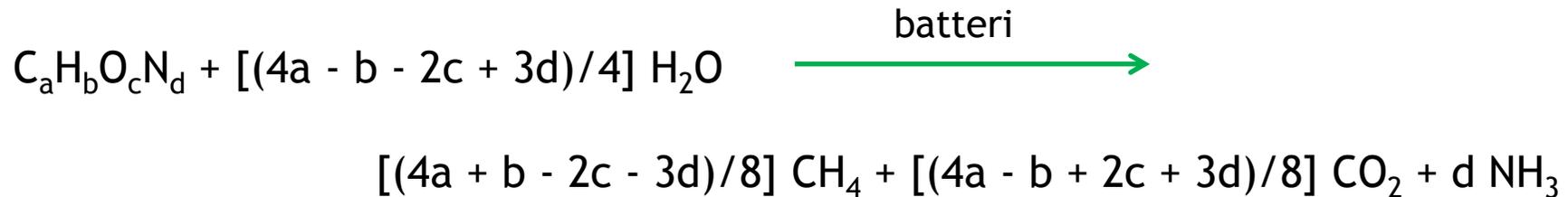
La quantità reale, la velocità di produzione e l'arco temporale di produzione sono fortemente condizionati dalle condizioni micrometeorologiche e idrogeologiche locali.

Si assume che:

- la formula minima dei composti organici presenti nei RSU sia $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$.
- la materia organica sia completamente biodegradabile (resa del 100% rispetto alla formazione di metano e anidride carbonica).

Stima della produzione di biogas

Stima del volume di biogas prodotto per unità di massa (Nm³/t)



I valori di a, b, c e d stimati a partire da una composizione merceologica media dei RSU.

- C₆₈H₁₁₁O₅₀N per i materiali rapidamente biodegradabili.
- C₂₀H₂₉O₉N per i materiali difficilmente biodegradabili.

La quantità totale teorica di biogas generato per tonnellata di materia organica secca è di 870 Nm³/t e di 1040 Nm³/t rispettivamente per materiali rapidamente difficilmente biodegradabili.

La quantità di biogas realmente prodotta è certamente inferiore perché non tutta la materia organica biodegradabile è disponibile per la degradazione.

I valori sperimentali di produzione di biogas sono estremamente variabili: sono stati misurati infatti valori compresi tra 100 e 650 Nm³/t.

Stima della produzione di biogas

Stima empirica della produzione specifica di biogas (Nm³/t anno)

Modello empirico per la stima della produzione specifica di biogas:

$$p = A (t - l)^B \exp [- C(t - l)]$$

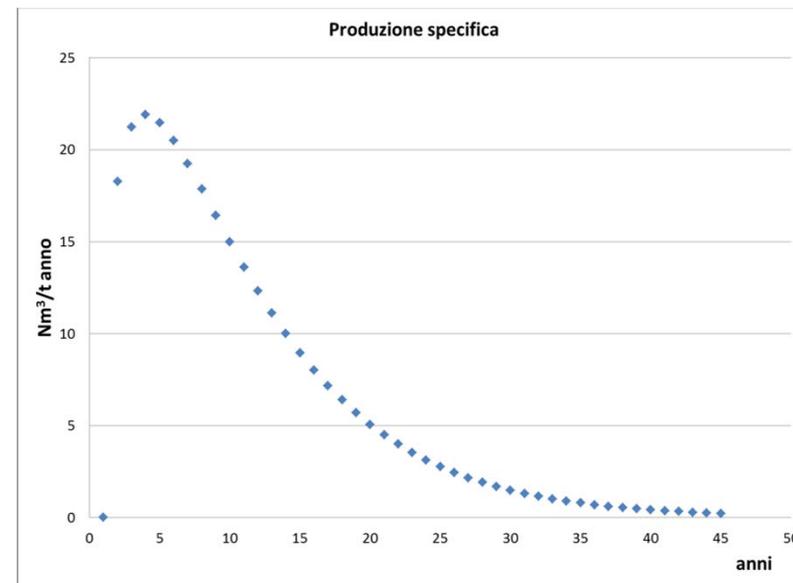
I valori delle costanti stimati per una discarica situata nel Nord Italia sono:

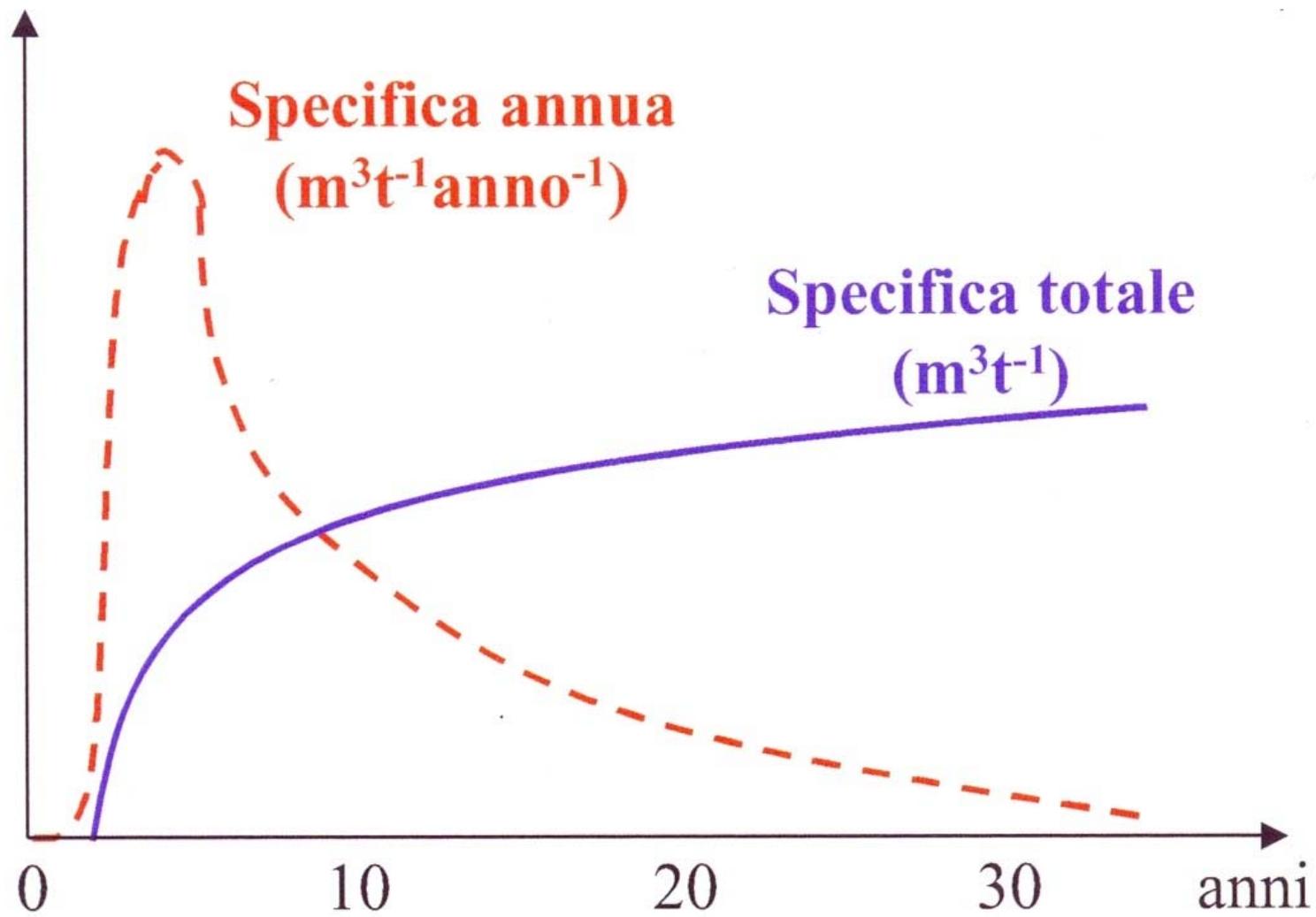
$$l = 1 \text{ anno}$$

$$A = 21 \text{ [Nm}^3\text{/t(anno)}^{1+B}\text{]};$$

$$B = 0,42 \text{ [costante adimensionale]};$$

$$C = 0,14 \text{ [anno}^{-1}\text{]}$$





Reazioni di formazione dei gas in tracce

- ⇒ I SOV possono essere già presenti nei rifiuti smaltiti oppure possono formarsi come prodotti nelle reazioni chimiche (abiotiche) e nelle reazioni di degradazione microbiologica (biotiche) che avvengono nella discarica.
- ⇒ La maggior parte dei composti in tracce derivano dall'evaporazione di composti liquidi già presenti nei rifiuti.
- ⇒ La formazione e la distruzione di ciascuno dei composti presenti in tracce comporta reazioni chimiche e biochimiche che avvengono con meccanismi complessi. Per esempio, il cloruro di vinile si forma come sottoprodotto della degradazione di dicloroetilene e tricloroetilene. Si deve inoltre tenere presente che i SOV sono composti organici e quindi possono essere facilmente adsorbiti dai materiali presenti in discarica.
- ⇒ Allo stato attuale, le conoscenze sulle velocità di formazione e distruzione di SOV nelle discariche sono piuttosto ridotte.

Sulla base delle conoscenze scientifiche disponibili, i tempi di emivita dei vari composti possono variare da qualche frazione di anno a centinaia di anni.

Stima dei tempi di volatilizzazione di alcuni composti liquidi volatili presenti in discariche

Composto	Tempo di evaporazione ^{a)} giorni
Cloroetene	0,0
Diclorometano	1,2
Triclorometano	4,4
Benzene	6,4
Tetraclorometano	9,6
Tricloroetene	13,6
Toluene	23,4
Tetracloroetene	62,6
Clorobenzene	76,0
1,2-Dibromoetano	128,2
o-Diclorobenzene	497,6

a) Definiti sulla base di una sfera di 10 mm di liquido volatile a 25°C, in una discarica con una porosità di 0.5

GESTIONE OPERATIVA - TRATTAMENTO FINALE DEL BIOGAS

I possibili trattamenti finali per il biogas sono:

- La semplice combustione senza recupero di energia (torcia)
- Combustione con recupero di energia

In entrambi i casi può essere necessario un trattamento preliminare del biogas, specialmente nel caso di recupero energetico, a causa della presenza di composti dannosi per i dispositivi di conversione dell'energia, che devono essere rimossi prima della combustione.

Component	Effect	Pre-treatment	System
Water	gas duct obstruction	gravity separation	condense separator
	acid condensate formation	condensing	cooler
		absorption	glycol absorption
		adsorption	molecular filter
Carbon dioxide	combustion modification	absorption	
	acid condensate	adsorption	
Sulphur compounds	acid condensate	adsorption	iron
	SO ₂ production in combustion		activated carbon
	odours		molecular filter
Chloride compounds	HCl production in combustion	adsorption	activated carbon
	toxicity		molecular filter
Fluoride	HF production in combustion		
	atmosphere pollution		
Silica organic compounds	abrasion of mechanical parts in energy conversion devices		

TRATTAMENTO BIOGAS

COMBUSTIONE SEMPLICE SENZA RECUPERO ENERGETICO (TORCIA)

Caratteristiche minime (in termini di concentrazione di metano) ai fini del recupero energetico:

- nel caso di MCI deve essere almeno 40% in volume
- nel caso di combustione in caldaie convenzionali, il limite inferiore può essere 20% in volume.

La presenza di CO_2 nel biogas, riduce fortemente il PCI e deteriora le caratteristiche di combustione, riduce la velocità di propagazione della fiamma. Combustione corretta → limite inferiore del rapporto CH_4/CO_2 e circa 1.

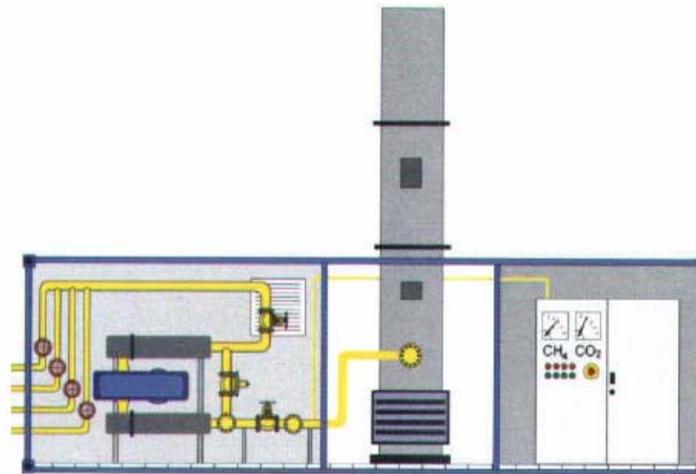
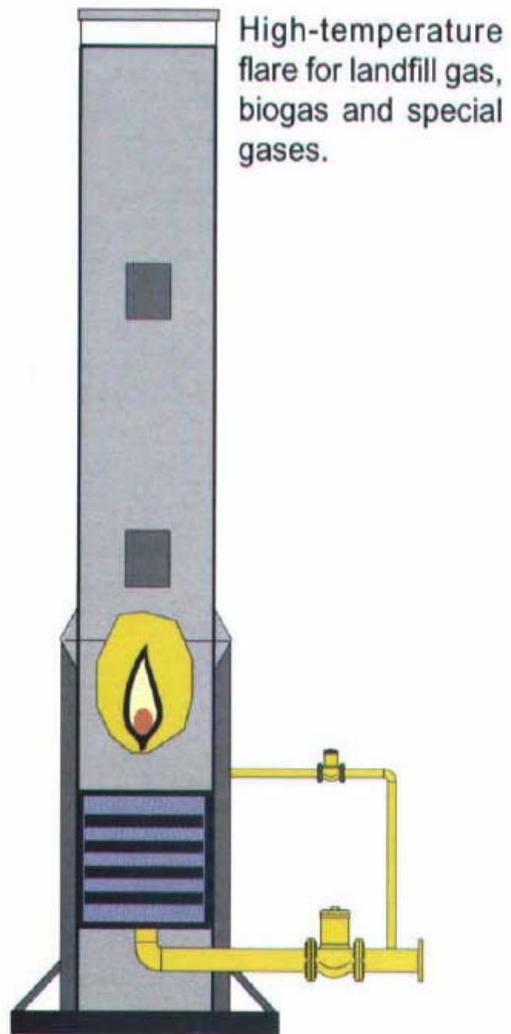
Per le piccole discariche e dove la produzione di biogas non è di buona qualità è necessario l'uso della torcia. Generalmente, le torce vengono utilizzate anche nelle grandi discariche durante i periodi di in inizio operatività.

Questo valore è legato al limite inferiore teorico per non produrre fumosità, che corrisponde ad un PCI di circa 2500 kcal/m^3 : considerando una miscela di inerte e metano, tale limite corrisponde ad una percentuale di 28% di metano

Il range di portata che una torcia può trattare è compreso fra $250 \text{ m}^3/\text{h}$ e $2000 \text{ m}^3/\text{h}$ e per ciascuna torcia la regolazione va dal 20% al 100%.

TRATTAMENTO BIOGAS

COMBUSTIONE SEMPLICE SENZA RECUPERO ENERGETICO (TORCIA)



Containerized degassing system with separate rooms for booster, high-temperature flare and monitoring/control facilities.



Location: landfill Remo, Belgium
Specifications: mobile booster / high-temperature flare unit



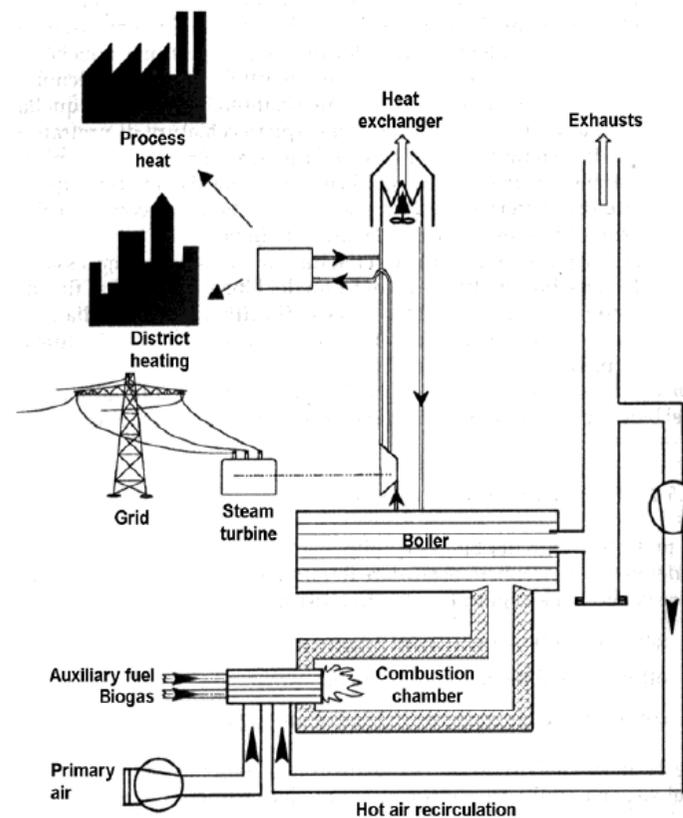
TRATTAMENTO BIOGAS COMBUSTIONE CON RECUPERO ENERGETICO

Il biogas, dopo opportuni trattamenti, può essere usato allo scopo di produrre energia elettrica: Combustione del biogas in una caldaia convenzionale per produrre acqua/vapore o per fornire calore

E' possibile produrre acqua alla temperatura di 130-180°C, a seconda della pressione, per fornire energia termica ad utenze prossime alla discarica. In caso di utenti lontani, per il trasporto più lungo, è necessario produrre vapore. In tal caso le pressioni e le temperature sono più elevate (fino a 50 bar e 400°C).

L'efficienza di questo tipo di sistemi è piuttosto elevata, a seconda della distanza dell'utenza finale, variando fra 85 - 90%.

Problemi connessi alla presenza di SO₂ e SO₃ (se lo zolfo non è stato precedentemente rimosso) per il potenziale corrosivo. Per evitare la loro condensazione la temperatura degli esauti deve essere mantenuta al di sopra di 180-200 °C.



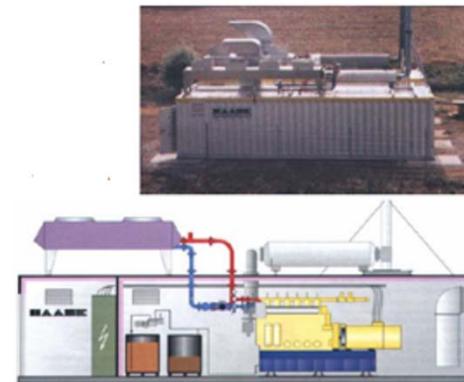
TRATTAMENTO BIOGAS - COMBUSTIONE IN MCI

I MCI sono piuttosto sensibili alla presenza di sostanze corrosive e alla deposizione di sedimenti.

Si può verificare la presenza nel biogas di composti organici quali silossani. Durante la combustione, questi composti possono essere convertiti in microcristallini di biossido di silicio, specialmente sulle parti fredde del cilindro del motore, contribuendo alla abrasione della superficie della camera di combustione fino a causare la rottura del motore.

La loro presenza è originata dalla decomposizione di sostanze contenenti silicio, che possono essere ritrovati nei rifiuti. Il limite superiore è per i MCI 15 mg/Nm³. I metodi di rimozione dei silossani devono tenere conto della presenza nel biogas di altri composti come idrocarburi, solfuri e ammine, con il rischio di alte perdite specifiche di efficienza.

L'efficienza di conversione energetica del processo è piuttosto bassa: 30 - 35% (può raggiungere 40%). L'efficienza di cogenerazione può essere abbastanza elevata, fino a 85%, quando si applica il recupero di calore dal sistema di raffreddamento e lubrificazione. Devono essere controllate le emissioni di NO_x e CO.

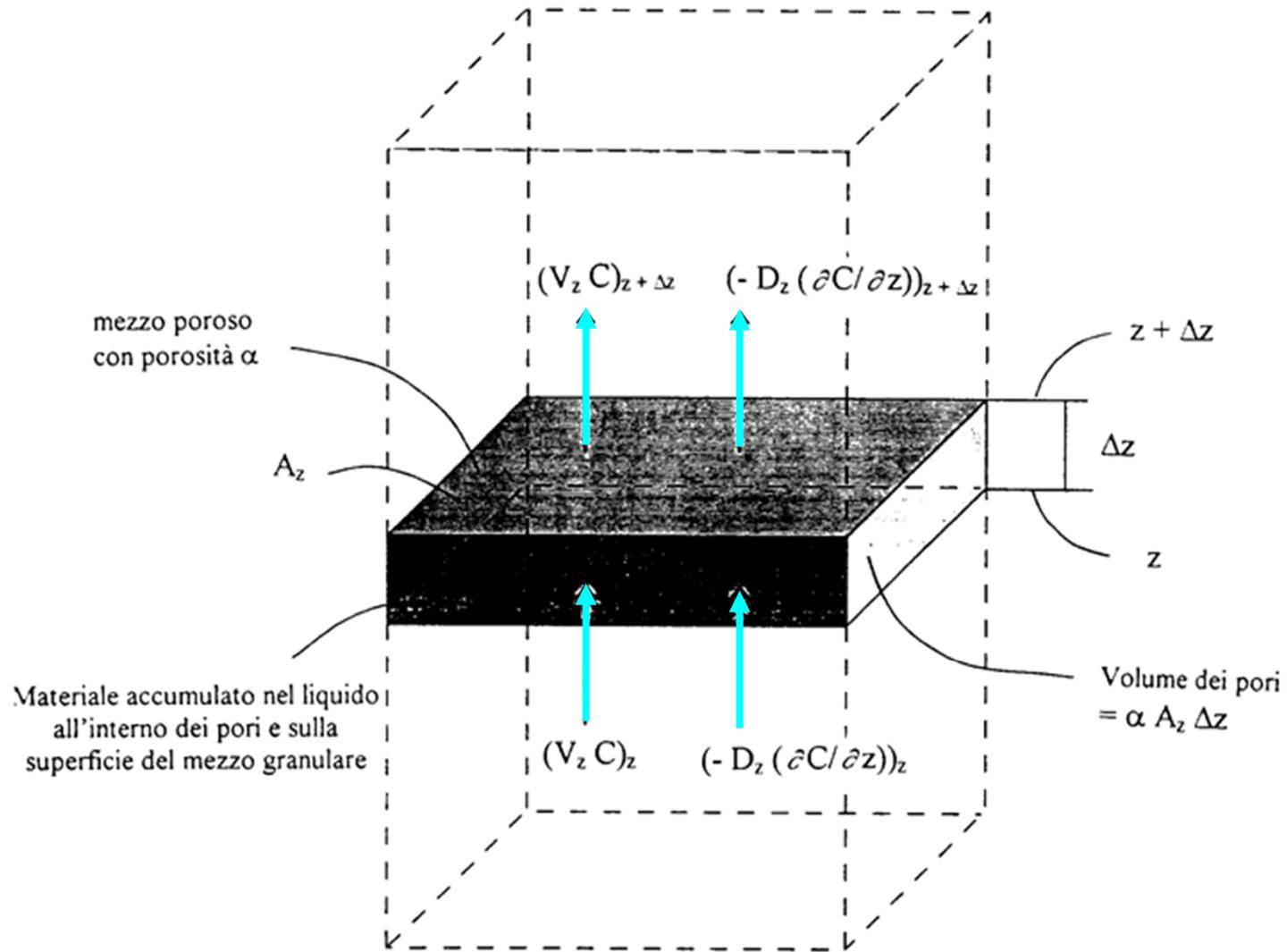


Equazioni di trasporto del biogas

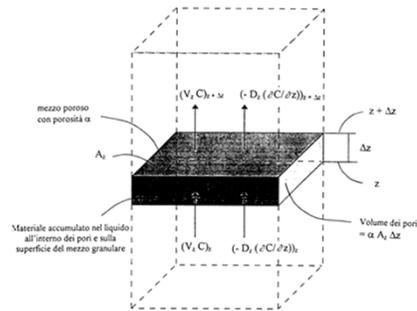
In condizioni normali, i gas prodotti in un suolo vengono trasportati in atmosfera per diffusione molecolare.

In una discarica attiva, la pressione interna è maggiore della pressione atmosferica; il biogas può muoversi per effetto del gradiente di pressione (flusso *convettivo*) oppure per *diffusione* molecolare. Altri fenomeni che devono essere inclusi nella modellizzazione sono l'*adsorbimento* dei gas nei materiali liquidi e solidi e le *reazioni* chimiche e biochimiche di *formazione* e *distruzione* dei composti allo stato gassoso.

Equazione generale del trasporto



Trasporto monodimensionale (verticale) in un volume elementare



Trasporto monodimensionale (verticale) in un volume elementare

$$\phi(1 + \beta) (\partial C_A / \partial t) = -V_z (\partial C_A / \partial z) + D_e (\partial^2 C_A / \partial z^2) + G$$

ϕ = *porosità totale* della massa, ossia il volume di spazio vuoto per unità di volume di spazio pieno, $[L^3/L^3]$

β = *fattore di ritardo*, che include gli effetti di adsorbimento e di variazione di fase, $[\text{numero adimensionato}]$

C_A = *concentrazione* del composto A, $[M/L^3]$

V_z = *velocità convettiva* nella direzione verticale, $[L/t]$

D_e = *coefficiente di diffusione effettivo*, $[L^2/t]$

G = un *parametro cinetico* che tiene conto delle reazioni di formazione, $[M/L^3t]$

z = *altezza* dello strato attraversato, $[L]$

$$\phi(1 + \beta) (\partial C_A / \partial t) = -V_z (\partial C_A / \partial z) + D_e (\partial^2 C_A / \partial z^2) + G$$

Semplificazioni

- ❑ Stato stazionario;
- ❑ Formazione o scomparsa di A (adsorbimento / desorbimento, reazioni) trascurabile - termine G;

$$0 = -V_z (\partial C_A / \partial z) + D_e (\partial^2 C_A / \partial z^2)$$

presenti soltanto i termini di trasporto convettivo e diffusivo

$$\phi(1 + \beta) (\partial C_A / \partial t) = -V_z (\partial C_A / \partial z) + D_e (\partial^2 C_A / \partial z^2) + G$$

Equazione del trasporto convettivo

La velocità convettiva, V_z , nella direzione verticale z , può essere stimata mediante l'equazione di Darcy

$$V_z = - (k/\mu) (\partial P / \partial z)$$

k = *permeabilità intrinseca*, [L²]

μ = *viscosità* della miscela gassosa, [M/L⁴t]

P = *pressione*, [M/L²t²]

Valori tipici della velocità convettiva per i gas principali in una discarica sono compresi tra 0,01 e 0,15 m/giorno.

$$\phi(1 + \beta) (\partial C_A / \partial t) = -V_z (\partial C_A / \partial z) + D_e (\partial^2 C_A / \partial z^2) + G$$

Equazione del trasporto diffusivo

Quando il biogas non viene più prodotto in quantità significative, il termine di trasporto diffusivo diventa largamente prevalente:

$$J_A = - D_e (\partial C_A / \partial z) \longrightarrow J_A = \text{flusso di gas, [M/L}^2\text{t]}.$$

D_e (diffusività molecolare, porosità del suolo) \longrightarrow Relazioni empiriche.

Trasporto diffusivo dei vapori di lindano in un suolo:

$$D_e = D (\phi_{\text{gas}})^{10/3} / \phi^2$$

D = *coefficiente di diffusione*, [L²/t]

ϕ = *porosità totale*, [L³/L³]

ϕ_{gas} = *porosità ridotta*, intesa come la porosità del materiale quando i pori sono parzialmente riempiti da gas e da vapor d'acqua, [L³/L³]

Oppure:

$$D_e = D \phi \zeta$$

ζ = *fattore di tortuosità* (valore tipico per discariche: $\zeta = 0,67$).

Trasporto del biogas

La resa di captazione raggiunge al massimo valori del 75 - 80%.
Il restante 20-25% può migrare lateralmente e verticalmente.

Il biogas dovrebbe entrare in contatto con l'esterno della "vasca" soltanto attraverso la superficie di copertura della discarica.

In realtà, a causa delle fessurazioni, più o meno grandi, che quasi inevitabilmente si producono nei "tessuti" utilizzati per l'impermeabilizzazione, sono possibili:

- ⇒ la migrazione laterale verso il sottosuolo. Sono state misurate nell'aria interstiziale concentrazioni di CH_4 fino al 40% (v/v), anche a distanze di 400-500 m. Se nel raggio di diffusione del metano sono presenti edifici, il metano può accumularsi nelle fondamenta o nei piani inferiori con conseguente rischio di formazione di miscele esplosive;
- ⇒ la migrazione verso il fondo della discarica (CO_2 , densità maggiore di quella dell'aria).
- ⇒ la migrazione del biogas verso l'alto.

Trasporto dei gas principali i

La maggior parte del metano non captato migra verso la superficie della discarica e può essere emesso in atmosfera.

Il flusso diffusivo attraverso la copertura di una discarica può essere calcolato assumendo che:

- il gradiente di concentrazione sia lineare;
- il suolo sia secco e quindi $\phi_{\text{gas}} = \phi$ (assunzione conservativa: l'infiltrazione di acqua nella copertura della discarica riduce il valore di ϕ_{gas} e quindi di J_A).

Sapendo che: $D_e = D (\phi_{\text{gas}})^{10/3} / \phi^2$ $J_A = - D_e (\partial C_A / \partial z)$

$$J_A = - D \phi^{4/3} (C_{Ae} - C_{Ai}) / L$$

J_A = *flusso* di metano (o CO₂), [M/L²t]

C_{Ae} = *concentrazione* di metano (o CO₂) al *bordo esterno* della copertura superficiale della discarica, [M/L³]

C_{Ai} = la *concentrazione* di metano (o CO₂) al *bordo interno* della copertura superficiale della discarica, [M/L³]

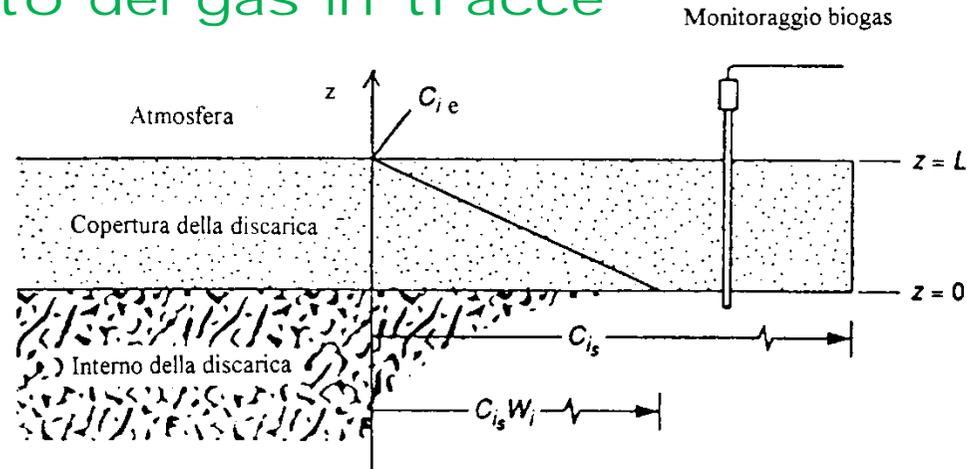
L = l'*altezza* dello strato di copertura, [L]

I coefficienti di diffusione del CH₄ e della CO₂ hanno tipicamente valori di 0,20 cm/s e 0,13 cm/s, rispettivamente.

Trasporto dei gas in tracce

Assumendo che:

- ❑ il gradiente di concentrazione sia lineare;
- ❑ il suolo sia secco



$$J_i = - D \phi^{4/3} (C_{ie} - C_{is} W_i) / L$$

C_{is} = concentrazione di saturazione
 W_i = frazione in massa

J_i = il *flusso* dell'i-esimo SOV (SOV_i), $[M/L^2t]$

C_{ie} = la *concentrazione* del SOV_i al *bordo esterno* della copertura superficiale della discarica, $[M/L^3]$

C_{is} = la *concentrazione di saturazione* dei vapori del SOV_i nella massa della discarica, $[M/L^3]$

W_i = la *frazione in massa* del SOV_i nella massa della discarica, [numero adimensionato]

$C_{is}W_i$ = la *concentrazione* del SOV_i alla sommità della discarica, in corrispondenza dell'inizio della copertura superficiale, $[M/L^3]$

L = l'*altezza* dello strato di copertura, $[L]$

Trasporto dei gas in tracce

$$J_i = - D \phi^{4/3} (C_{ie} - C_{is} W_i) / L$$

Si può assumere $C_{ie} = 0$

Il SOV, una volta giunto in contatto con l'atmosfera, è trascinato subito via dal vento e diluito nell'aria. Assunzione conservativa.

Quindi:

$$J_i = D \phi^{4/3} C_{is} W_i / L$$

La misura sperimentale della concentrazione del SOV_i alla sommità della discarica, in corrispondenza dell'inizio della copertura superficiale, può essere effettuata inserendo una sonda nella copertura della discarica fino a raggiungere la superficie della massa dei rifiuti e rilevando contemporaneamente la concentrazione del composto di interesse e la temperatura.

In alternativa

	Coefficiente di diffusione	Concentrazione di saturazione	Frazione in massa	Tensione di vapore
Stima a 30°C	D	C _{is}	W _i	p _v
	cm ² /s	g/m ³		mm Hg
Benzene	0,081	504,6	0,0004	122
Toluene	0,068	180,4	0,01	37
Etilbenzene	0,062	73,08	0,01	13
Diclorometano	0,091	2410	0,0005	536
1,2-Dicloroetano	0,077	560,7	0,001 ^{a)}	107
1,2-Dicloroetene	0,092	2048	0,001 ^{a)}	399
Cloroformio	0,080	1517	0,00001	240
1,1,1-Tricloroetano	0,071	1081	0,0001	153
Tricloroetilene	0,072	654,5	0,0002	94
Tetracloruro di carbonio	0,071	1124	0,001 ^{a)}	138
Tetracloroetilene	0,065	210,7	0,01	24
Cloruro di vinile	0,098	11090	0,0001 ^{b)}	3350

a) La frazione in massa non è nota. Valore proposto in letteratura in assenza di informazioni.

b) La frazione in massa non è nota. Poiché il cloruro di vinile è un sottoprodotto della biodegradazione di dicloroetilene (vedi nota a) e tricloroetilene ($W_i=0,0002$), la frazione in massa è stata assunta uguale al 50% di quella del tricloroetilene.

Valori di porosità per diversi tipi di argilla sono compresi tra 0,010 e 0,30.

W_i da misure sperimentali; in assenza, si può utilizzare il valore W_i = 0,001.

Esercizio n° 1

Calcolare il volume totale di biogas prodotto per unità di massa secca di composti organici presenti nei RSU, distinguendo tra componenti rapidamente biodegradabili e componenti lentamente biodegradabili

Componente organica del RSU	Biodegradabile rapidamente	Biodegradabile lentamente
Rifiuti da alimentari	x	
Giornali	x	
Carta	x	
Cartoni	x	
Plastica ^{a)}		
Tessili		x
Gomma		x
Pelle		x
Rifiuti da giardinaggio	x ^{b)}	x ^{c)}
Legno		x
Miscela organica		x

Sono dati:

La densità del metano (0,7176 g/L) e dell'anidride carbonica (1,978 g/L).

La massa e la composizione chimica elementare di ciascuna classe merceologica in 100 kg di RSU.

Classe	Massa (kg)		Composizione elementare, kg			
	umida	secca	C	H	O	N
Componenti rapidamente biodegradabili						
Rifiuti alimentari	4,08	1,22	0,59	0,08	0,45	0,03
Carta	15,42	14,52	6,31	0,87	6,38	0,05
Cartone	2,72	2,59	1,14	0,15	1,14	0,01
Rifiuti giardinaggio	5,03	2,00	0,95	0,12	0,77	0,06
	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Totali	27,25	20,33	8,99	1,22	8,74	0,15
Componenti lentamente biodegradabili						
Tessili	0,91	0,82	0,44	0,05	0,24	0,03
Gomma	0,23	0,23	0,17	0,02	-	0,01
Pelli	0,23	0,18	0,11	0,01	0,02	0,02
Rifiuti giardinaggio	3,36	1,36	0,64	0,08	0,51	0,04
Legno	0,91	0,72	0,35	0,05	0,30	-
	—————	—————	—————	—————	—————	—————
Totali	5,64	3,31	1,71	0,21	1,07	0,10

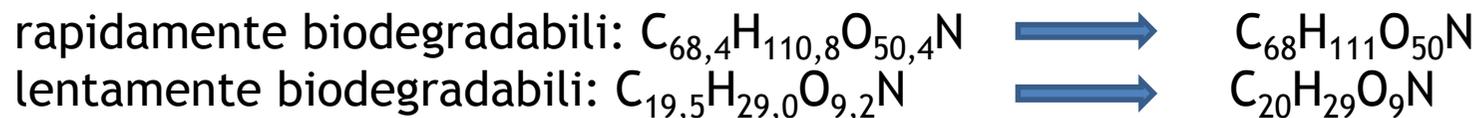
1) Calcolo della composizione molare

Elementi	C	H	O	N
Massa atomica, kg/mole	12,01	1,01	16,00	14,01
Moli totali				
rapidamente biodegradabili	0,7486	1,2046	0,5461	0,0109
lentamente biodegradabili	0,1424	0,2117	0,0672	0,0073

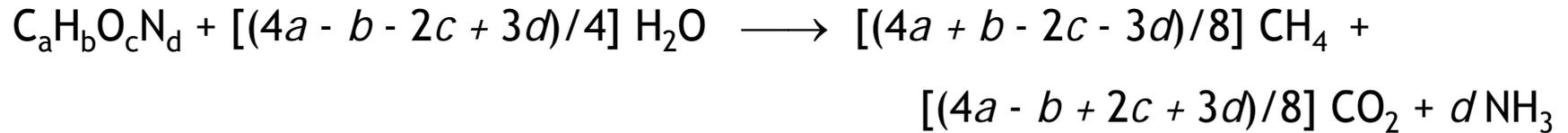
2) Calcolo della formula minima

Rapporto molare	C	H	O	N
rapidamente biodegradabili	68,4	110,8	50,4	1
lentamente biodegradabili	19,5	29,0	9,2	1

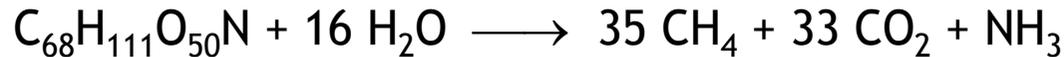
La formula chimica minima è:



3) Calcolo del volume di biogas prodotto per unità di massa secca di sostanza organica

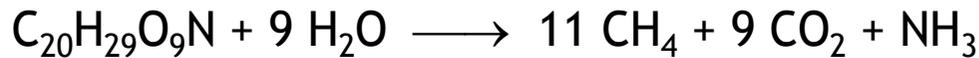


(i) rapidamente biodegradabili



PM 1742.8 288 561.8 1452

(ii) lentamente biodegradabili



PM 427.5 176.6 396.1

Componenti
rapidamente
biodegradabili su base
secca

i) rapidamente biodegradabili

$$CH_4 \rightarrow [(20,33/1742,8) 561,8]/0,7176 = 9,132 Nm^3$$

$$\frac{\text{massa}}{PM} \left[\frac{kg}{kg / mol} \right] \times PM_{CH_4} \left[\frac{kg}{mol} \right] \times \frac{1}{\text{densità}} \left[\frac{m^3}{kg} \right] = m^3$$

i) rapidamente biodegradabili

$$\text{CH}_4 \rightarrow [(20,33/1742,8) 561,8]/0,7176 = 9,132 \text{ Nm}^3$$

$$\text{CO}_2 \rightarrow [(20,33/1742,8) 1452,3]/1,978 = 8,565 \text{ Nm}^3$$

ii) lentamente biodegradabili

$$\text{CH}_4 - [(3,31/427,5) 176,6]/0,7176 = 1,905 \text{ Nm}^3$$

$$\text{CO}_2 - [(3,31/427,5) 396,1]/1,978 = 1,550 \text{ Nm}^3$$

Volume totale di biogas prodotto per unità di massa secca

(i) rapidamente biodegradabili

$$(9,132 + 8,565)/20,33 \times 10^{-3} = 870,4 \text{ Nm}^3/\text{t secco}$$

(ii) lentamente biodegradabili

$$(1,905 + 1,550)/3,31 \times 10^{-3} = 1043,8 \text{ Nm}^3/\text{t secco}$$

Esercizio n° 2

Calcolare le emissioni di gas in tracce (es. toluene) dalla superficie di una discarica, separatamente per trasporto diffusivo e per trasporto convettivo.

Dati:

Temperatura: 30° C

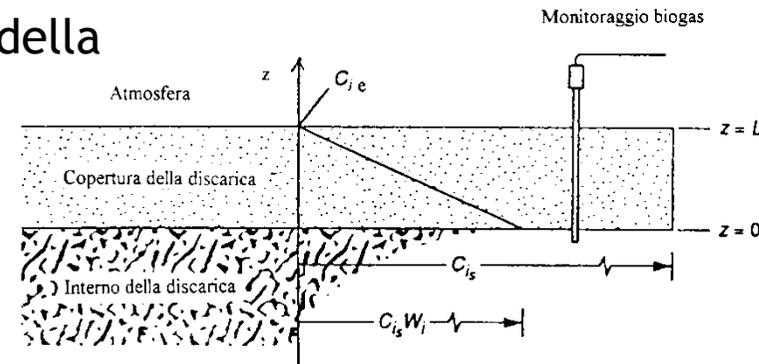
Materiale di copertura della discarica: misto argilla-terriccio

	D	ϕ	C_{is}	W_i	L
	cm ² /s		g/m ³		cm
Toluene	0,068	0,3	180,4	0,01	100

Trasporto diffusivo

Calcolo della concentrazione di toluene alla sommità della discarica, in corrispondenza dell'inizio della copertura della superficiale

$$J_i = D \phi^{4/3} C_{is} W_i / L$$



C_{is} = concentrazione di saturazione
 W_i = frazione in massa

Trasporto diffusivo $J_i = D \phi^{4/3} C_{is} W_i / L$

Calcolo della concentrazione di toluene alla sommità della discarica, in corrispondenza dell'inizio della copertura della superficiale

$C_{is} = 180,4 \text{ g/m}^3$; $W_i = 0,01$.

Si ricava: $C_{is} W_i = 1,804 \text{ g/m}^3$

$D = 0,068 \text{ cm}^2/\text{s} = 0,59 \text{ m}^2/\text{giorno}$

$(J_i)_{\text{diffusivo}} = 0,59 \times 0,3^{4/3} \times 1,804 = 0,213 \text{ g/m}^2 \times \text{giorno}$

Trasporto convettivo $J_{\text{convettivo}} = V_z C_{is} W_i / L$

In mancanza dei parametri necessari per il calcolo di V_z , il calcolo viene effettuato assumendo il valore più basso (0,01 m/giorno) e il valore più elevato (0,15 m/giorno) della velocità convettiva

$(J_i)_{\text{convettivo}}^{\text{min}} = 0,01 \text{ (m/giorno)} \times 1,804 \text{ (g/m}^3) = 0,018 \text{ g/m}^2 \times \text{giorno}$

$(J_i)_{\text{convettivo}}^{\text{max}} = 0,15 \text{ (m/giorno)} \times 1,804 \text{ (g/m}^3) = 0,271 \text{ g/m}^2 \times \text{giorno}$

Stima delle emissioni di VOC da una discarica per trasporto diffusivo e per trasporto convettivo. Il trasporto convettivo può essere di un ordine di grandezza inferiore o dello stesso ordine di grandezza del trasporto diffusivo.

						Rilascio per diffusione	Rilascio convettivo
	D	Φ	C_{is}	W_i	L	N_i	N_i
	cm ² /s		g/m ³		cm	g/(m ² giorno)	g/(m ² giorno)
Benzene	0,081	0,3	504,6	0,0004	100	0,02837	0,03028
Toluene	0,068	0,3	180,4	0,01	100	0,21286	0,27060
Etilbenzene	0,062	0,3	73,08	0,01	100	0,07862	0,10962
Diclorometano	0,091	0,3	2410	0,0005	100	0,19027	0,18075
1,2-Dicloroetano	0,077	0,3	560,7	0,001	100	0,07491	0,08411
1,2-Dicloroetene	0,092	0,3	2048	0,001	100	0,32693	0,30720
Cloroformio	0,080	0,3	1517	0,00001	100	0,00211	0,00228
1,1,1-Tricloroetano	0,071	0,3	1081	0,0001	100	0,01332	0,01622
Tricloroetilene	0,072	0,3	654,5	0,0002	100	0,01635	0,01964
Tetracloruro carbonio	0,071	0,3	1124	0,001	100	0,13847	0,16860
Tetracloroetilene	0,065	0,3	210,7	0,01	100	0,23764	0,31605
Cloruro di vinile	0,098	0,3	11090	0,0001	100	0,18858	0,16635

Stima della produzione del biogas

Strumenti modellistici in grado di simulare le reazioni naturali di degradazione della componente organica. Devono considerare l'insieme dei fattori morfologici, fisici e chimico-fisici che caratterizzano il sistema .

I modelli più comunemente utilizzati si differenziano, essenzialmente, nell'approccio metodologico utilizzato come base descrittiva del processo e nell'esigenza di un numero variabile di parametri in ingresso. Tali parametri caratterizzano la complessità e le potenzialità applicative del singolo modello.

Sintesi descrittiva degli approcci di valutazioni messi a punto da:

- ✓ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC 1996)
- ✓ metodologia di stima sviluppata in Italia da Andreottola e Cossu (1988)



- ✓ Modello Inemar (Regione Lombardia, 2000), sviluppato per la realizzazione dell'inventario regionale lombardo delle emissioni atmosferiche.

**2006 IPCC Guidelines for
National Greenhouse Gas Inventories**
Volume 5
Waste

Treatment and disposal of municipal, industrial and other solid waste produces significant amounts of CH₄. In addition to CH₄, solid waste disposal sites (SWDS) also produce biogenic carbon dioxide (CO₂) and non-methane volatile organic compounds as well as smaller amounts of nitrous oxide (N₂O), nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO). CH₄ produced at SWDS contributes approximately 3 to 4 percent to the annual global anthropogenic greenhouse gas emissions (IPCC, 2001).

The IPCC methodology for estimating CH₄ emissions from SWDS is based on the First Order Decay (FOD) method → the degradable organic component (degradable organic carbon, DOC) in waste decays slowly throughout a few decades, during which CH₄ and CO₂ are formed. If conditions are constant, the rate of CH₄ production depends solely on the amount of carbon remaining in the waste. As a result emissions of CH₄ from waste deposited in a disposal site are highest in the first few years after deposition, then gradually decline as the degradable carbon in the waste is consumed by the bacteria responsible for the decay.

http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_3_Ch3_SWDS.pdf

METHANE EMISSIONS

Part of the CH₄ generated is oxidised in the cover of the SWDS, or can be recovered for energy or flaring. The CH₄ actually emitted from the SWDS will hence be smaller than the amount generated.

$$\text{CH}_4 \text{ (emesso)} = \left(\sum_x \text{CH}_4 \text{ generato}_{x,T} - R_T \right) (1-\text{OX})$$

TABLE 3.2 OXIDATION FACTOR (OX) FOR SWDS	
Type of Site	Oxidation Factor (OX) Default Values
Managed ¹ , unmanaged and uncategorised SWDS	0
Managed covered with CH ₄ oxidising material ²	0.1
¹ Managed but not covered with aerated material	
² Examples: soil, compost	

METHANE GENERATION

The CH₄ generation potential of the waste that is disposed in a certain year will decrease gradually throughout the following decades. In this process, the release of CH₄ from this specific amount of waste decreases gradually. The FOD model is built on an exponential factor that describes the fraction of degradable material which each year is degraded into CH₄ and CO₂.

One **key input** in the model is the amount of **degradable organic matter (DOCm)** in waste.

This is estimated based on information on disposal of different waste categories (municipal solid waste (MSW), sludge, industrial and other waste) and the different waste types/material (food, paper, wood, textiles, etc.).

The CH₄ potential that is generated throughout the years can be estimated on the basis of the amounts and composition of the waste disposed into SWDS and the waste management practices at the disposal sites. The basis for the calculation is the amount of **Decomposable Degradable Organic Carbon, DDOCm**, that is the part of the organic carbon that will degrade under the anaerobic conditions in SWDS

METHANE GENERATION

Using DDOC_m accumulated in the SWDS the above eq. can be used to calculate the total CH₄ generation potential of the waste remaining in the SWDS

DDOC_m equals the product of the waste amount (W), the fraction of degradable organic carbon in the waste (DOC), the fraction of the degradable organic carbon that decomposes under anaerobic conditions (DOC_f), and the part of the waste that will decompose under aerobic conditions (prior to the conditions becoming anaerobic) in the SWDS, which is interpreted with the methane correction factor (MCF).

Equations for estimating the CH₄ generation

As the mathematics are the same for estimating the CH₄ emissions from all waste categories/waste types/materials, no indexing referring to the different categories/waste materials/types is used in the equations below.

METHANE GENERATION

EQUATION 3.2

DECOMPOSABLE DOC FROM WASTE DISPOSAL DATA

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF$$

Where:

$DDOC_m$ = mass of decomposable DOC deposited, Gg

W = mass of waste deposited, Gg

DOC = degradable organic carbon in the year of deposition, fraction, Gg C/Gg waste

DOC_f = fraction of DOC that can decompose (fraction)

MCF = CH_4 correction factor for aerobic decomposition in the year of deposition (fraction)

EQUATION 3.3

TRANSFORMATION FROM $DDOC_m$ TO L_o

$$L_o = DDOC_m \cdot F \cdot 16/12$$

Where:

L_o = CH_4 generation potential, Gg CH_4

$DDOC_m$ = mass of decomposable DOC, Gg

F = fraction of CH_4 in generated landfill gas (volume fraction)

$16/12$ = molecular weight ratio CH_4/C (ratio)

FIRST ORDER DECAY BASICS

With a first order reaction, the amount of product is always proportional to the amount of reactive material. This means that the year in which the waste material was deposited in the SWDS is irrelevant to the amount of CH₄ generated each year. It is only the total mass of decomposing material currently in the site that matters.

This also means that when we know the amount of decomposing material in the SWDS at the start of the year, every year can be regarded as year number 1 in the estimation method, and the basic first order calculations can be done by these two simple equations, with the decay reaction beginning on the 1st of January the year after deposition.

EQUATION 3.4

DDOCm ACCUMULATED IN THE SWDS AT THE END OF YEAR T

$$DDOCma_T = DDOCmd_T + (DDOCma_{T-1} \cdot e^{-k})$$

EQUATION 3.5

DDOCm DECOMPOSED AT THE END OF YEAR T

$$DDOCm\ decomp_T = DDOCma_{T-1} \cdot (1 - e^{-k})$$

Where:

T = inventory year

DDOCma_T = DDOCm accumulated in the SWDS at the end of year T, Gg

DDOCma_{T-1} = DDOCm accumulated in the SWDS at the end of year (T-1), Gg

DDOCmd_T = DDOCm deposited into the SWDS in year T, Gg

DDOCm decomp_T = DDOCm decomposed in the SWDS in year T, Gg

k = reaction constant, $k = \ln(2)/t_{1/2}$ (y⁻¹)

t_{1/2} = half-life time (y)

METHANE GENERATION

CH₄ generated from decomposable DDOC_m

The amount of CH₄ formed from decomposable material is found by multiplying the CH₄ fraction in generated landfill gas and the CH₄/C molecular weight ratio.

EQUATION 3.6

CH₄ GENERATED FROM DECAYED DDOC_m

$$CH_4 \text{ generated}_T = DDOCm \text{ decomp}_T \cdot F \cdot 16/12$$

Where:

CH₄ generated_T = amount of CH₄ generated from decomposable material

DDOC_m decomp_T = DDOC_m decomposed in year *T*, Gg

F = fraction of CH₄, by volume, in generated landfill gas (fraction)

16/12 = molecular weight ratio CH₄/C (ratio)

METHANE GENERATION

EQUATION 3.7
ESTIMATES DOC USING DEFAULT CARBON CONTENT VALUES

$$DOC = \sum_i (DOC_i \cdot W_i)$$

Where:

DOC = fraction of degradable organic carbon in bulk waste, Gg C/Gg waste

DOC_{*i*} = fraction of degradable organic carbon in waste type *i*
e.g., the default value for paper is 0.4 (wet weight basis)

W_{*i*} = fraction of waste type *i* by waste category
e.g., the default value for paper in MSW in Eastern Asia is 0.188 (wet weight basis)

METHANE GENERATION

FRACTION OF DEGRADABLE ORGANIC CARBON WHICH DECOMPOSES (DOC_f)

Fraction of degradable organic carbon which decomposes (DOC_f) is an estimate of the fraction of carbon that is ultimately degraded and released from SWDS, and reflects the fact that some degradable organic carbon does not degrade, or degrades very slowly, under anaerobic conditions in the SWDS . The recommended default value for DOC_f is 0.5 (under the assumption that the SWDS environment is anaerobic and the DOC values include lignin, see Table 2.4 in Chapter 2 for default DOC values) (Oonk and Boom, 1995; Bogner and Matthews, 2003). DOC_f value is dependent on many factors like temperature, moisture, pH, composition of waste, etc. National values for DOC_f or values from similar countries can be used for DOC_f, but they should be based on well-documented research.

TABLE 3.1
SWDS CLASSIFICATION AND METHANE CORRECTION FACTORS (MCF)

Type of Site	Methane Correction Factor (MCF) Default Values
Managed – anaerobic ¹	1.0
Managed – semi-aerobic ²	0.5
Unmanaged ³ – deep (>5 m waste) and /or high water table	0.8
Unmanaged ⁴ – shallow (<5 m waste)	0.4
Uncategorised SWDS ⁵	0.6

¹ **Anaerobic managed solid waste disposal sites:** These must have controlled placement of waste (i.e., waste directed to specific deposition areas, a degree of control of scavenging and a degree of control of fires) and will include at least one of the following: (i) cover material; (ii) mechanical compacting; or (iii) levelling of the waste.

² **Semi-aerobic managed solid waste disposal sites:** These must have controlled placement of waste and will include all of the following structures for introducing air to waste layer: (i) permeable cover material; (ii) leachate drainage system; (iii) regulating pondage; and (iv) gas ventilation system.

³ **Unmanaged solid waste disposal sites – deep and/or with high water table:** All SWDS not meeting the criteria of managed SWDS and which have depths of greater than or equal to 5 metres and/or high water table at near ground level. Latter situation corresponds to filling inland water, such as pond, river or wetland, by waste.

⁴ **Unmanaged shallow solid waste disposal sites:** All SWDS not meeting the criteria of managed SWDS and which have depths of less than 5 metres.

⁵ **Uncategorised solid waste disposal sites:** Only if countries cannot categorise their SWDS into above four categories of managed and unmanaged SWDS, the MCF for this category can be used.

Sources: IPCC (2000); Matsufuji *et al.* (1996)